



# ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

## ТРУДЫ *одиннадцатой всероссийской конференции с международным участием*

10 – 14 октября 2022 г.  
Москва

Москва  
НИУ МЭИ  
2022

УДК 620.92.004.14(063)  
ББК 31.15я5  
Э 653

Э 653 **Энергосбережение – теория и практика:** Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием «Энергосбережение – теория и практика» (Москва, 10–14 октября 2022 г.) – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2022. – 439 с.

ISBN 978-5-907292-73-4

Публикуемые доклады содержат результаты исследований ученых и преподавателей из многих регионов России, а также из-за рубежа по вопросам теории и практики энергосбережения, касающихся оптимизации систем генерации энергии и систем потребления ТЭР различных видов в промышленности и ЖКХ, термодинамического анализа энергогенерирующих систем, использования нетрадиционных источников энергии, использования энергетического потенциала бытовых отходов и местных топлив, получения дизельного топлива, теплонасосных установок, интенсификации процессов тепло- и массообмена, совершенствования механизмов реализации энергосберегающего потенциала в промышленности и ЖКХ.

УДК 620.92.004.14(063)  
ББК 31.15я5

ISBN 978-5-907292-73-4

© Авторы, 2022  
© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2022

## **Участникам XI Всероссийской конференции с международным участием «Энергосбережение – теория и практика»**

Уважаемые участники конференции!

Поздравляем вас с открытием XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергосбережение – теория и практика».

Наша конференция была организована 20 лет назад, в 2002 году в форме школы-семинара для молодых ученых, занимающихся исследованиями в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Это произошло еще до того, как проблема эффективного использования энергии была поднята в таких документах, как Указ Президента РФ "О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики" (2008 г.) и Федеральный закон РФ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...» (2009 г.).

За время существования школы на ней читали лекции ведущие ученые страны. В их числе: академики РАН А.И. Леонтьев, О.Н. Фаворский, С.П. Филиппов, члены-корреспонденты РАН: В.В. Клименко и Г.Г. Ольховский, представители таких научных учреждений, как Институт Энергетики РАН, Объединенный институт высоких температур, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский теплотехнический институт и другие. Опубликовано более тысячи докладов, прочитано более пятидесяти лекций. География участников охватывала всю страну. Школа являлась международной. В ней участвовали представители Казахстана, Белоруссии, Германии, Аргентины, Вьетнама, Доминиканской республики.

Состоявшиеся в 2002 - 2020 годах школы-семинары доказали свою необходимость и значимость. Они стали традиционным мероприятием, проводимым университетом, с целью повышения качества обучения бакалавров, магистров, аспирантов, а также молодых учёных и специалистов, для обмена научными знаниями о методах энергосбережения в технике и технологиях.

Сейчас Конференция изменила формат. Теперь это уже не молодежная школа-семинар, а Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием. Это связано с все большим интересом, который проявляется к повышению энергетической

эффективности учеными России и ростом числа научных исследований в данной области.

Сейчас проблема энергосбережения приобретает все большую актуальность. Необходимость снижения затрат на производство продукции, желание сохранить энергетические ресурсы для новых поколений, озабоченность общества состоянием окружающей среды и изменением климата, – все это побуждает людей экономить энергию. Современная ситуация показала, что именно наличие и эффективное использование доступных энергетических ресурсов являются важнейшими условиями не только экономического роста, но и комфортной жизни людей.

Конференция будет проведена на базе Института энергетической эффективности и водородных технологий НИУ «МЭИ» с привлечением других подразделений университета.

В этом году одним из организаторов конференции стало Российское энергетическое агентство (РЭА). Мы уверены, что сотрудничество НИУ «МЭИ» и РЭА повысит уровень конференции, будет способствовать внедрению результатов представленных исследований в практическую деятельность.

На конференции традиционно будут представлены доклады по результатам исследований энергосбережения при генерации, транспортировке, потреблении энергии, развитию малой и нетрадиционной энергетики, технологиям водородной энергетики, экономическим вопросам энергосбережения, снижению углеродного следа и охране окружающей среды.

В этом году в программе конференции появилась новая секция – «Актуальные философские вопросы снижения потребления ресурсов».

Проведение нашей конференции является еще одним подтверждением того, что НИУ «МЭИ», как ведущий энергетический вуз страны, готовит специалистов и проводит научные исследования не только в области генерации и распределения энергии, но и в области энергосбережения и энергетической эффективности.

Желаем участникам конференции плодотворной работы, творческих успехов, научных достижений, а также их успешного внедрения в практической деятельности.

**Оргкомитет XI конференции  
«Энергосбережение – теория и практика»**

# Организаторы конференции

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Институт энергоэффективности и водородных технологий  
НИУ «МЭИ»

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Российское Энергетическое Агентство» Минэнерго России

Отделение энергетики, машиностроения, механики и  
процессов управления РАН

Российская инженерная академия

Комитет Российского Союза НИО по сушке и  
термовлажностной обработке материалов

Ассоциация теплоснабжающих организаций Московской  
области «Мособлтеплоэнерго»

## При поддержке



Торгово-производственного холдинга «Русклимат»

## Информационные партнеры:

журнал «Промышленная энергетика»



# Научно-организационный комитет

**И.А. Щербатов** – председатель, к.т.н., и.о. директора Института энергоэффективности и водородных технологий ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**А.Б. Гаряев** – зам. председателя, профессор, зав. кафедрой «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при потреблении энергии".

**Е.В. Цепляева** – зам. председателя, к.т.н., доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**М.С. Пурдин** – секретарь, к.т.н., доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**С.В. Вишняков** – к.т.н., доцент, директор Института информационных и вычислительных технологий ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Диагностика, мониторинг, информационно-аналитические системы в энергосбережении".

**Г.П. Власенко** – к.т.н., доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**М.В. Горелов** – к.т.н., доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**Е.В. Жигулина** – к.т.н., доцент, начальник Отдела аспирантуры и докторантуры ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**И.И. Комаров** – к.т.н., доцент кафедры «Инновационные технологии наукоемких отраслей», директор Центра инновационного развития ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при генерации тепловой и электрической энергии".

**О.Е. Кондратьева** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Инженерная экология и охраны труда» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Снижение углерод-

ного следа и охрана окружающей среды".

**Н.В. Кулешов** – д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Химия и электрохимическая энергетика» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Технологии водородной энергетики".

**С.К. Попов** – д.т.н., профессор кафедры «Инновационные технологии наукоемких отраслей».

**А.Н. Роголев** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Инновационные технологии наукоемких отраслей».

**Н.М. Савченкова** – к.т.н., доцент кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель отдела иностранной аспирантуры ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**Ю.В. Соколова** – к.т.н., доцент, зав. кафедрой "Философии, политологии, социологии им. Г.С. Арефьевой" ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Актуальные философские вопросы снижения потребления ресурсов".

**М.Г. Тягунов** – д.т.н., профессор кафедры "Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии" ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Малая энергетика, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, вторичные энергетические ресурсы".

**Д.Г. Шувалова** – к.э.н., доцент кафедры «Экономика в энергетике и промышленности» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Экономические аспекты энергосбережения".

**М.Ю. Юркина** – к.т.н., доцент, зам. директора Института энергоэффективности и водородных технологий ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

**Ю.В. Яворовский** – к.т.н., зав. кафедрой «Промышленные теплоэнергетические системы» ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при транспортировке энергии".

# **СОДЕРЖАНИЕ СБОРНИКА ТРУДОВ XI Всероссийской конференции с международным участием «Энергосбережение – теория и практика»**

**Секция 1.** Энергосбережение при генерации тепловой и электрической энергии

**Секция 2.** Энергосбережение при транспортировке энергии

**Секция 3.** Энергосбережение при потреблении энергии

**Секция 4.** Технологии водородной энергетики

**Секция 5.** Диагностика, мониторинг, информационно-аналитические системы в энергосбережении

**Секция 6.** Малая энергетика, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, вторичные энергетические ресурсы

**Секция 7.** Экономические аспекты энергосбережения

**Секция 8.** Снижение углеродного следа и охрана окружающей среды

**Секция 9.** Актуальные философские вопросы снижения потребления ресурсов



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одинадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 1

*Энергосбережение  
при генерации тепловой и  
электрической энергии*

Д.Д. Голдобин<sup>1</sup>, М.А. Савелков<sup>1</sup>, С.Н. Петин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ПАРОВОЙ КОНВЕРСИЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТКОВ ТЕПЛА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрена проблема повышения эффективности объектов генерации за счет комбинированного производства водорода. Проведено моделирование производства водорода паровой конверсией природного газа совместно с производством электрической энергии в программной среде Aspen Hysys. Произведено анализ технических параметров схемы от коэффициента  $\beta$  – отношение пара к природному газу, подаваемого в качестве сырья в реактор паровой конверсии метана. Представлены результаты моделирования и проведен их анализ. Оценен эксергетический КПД схемы при варьировании коэффициента  $\beta$ . Получено, что наиболее эффективным значением коэффициента  $\beta$  является 4,5, который характеризуется наименьшим значением удельного расхода природного газа на производство водорода. Коэффициент  $\beta$  можно снизить путем применения эффективных катализаторов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика является современным и перспективным направлением развития мировой и отечественной энергетики, так как водород является эффективным энергоресурсом для декарбонизации экономики, промышленности и энергетики. Необходимость декарбонизации была закреплена в 2015 г. на международном уровне в Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций (далее ООН) об изменении климата [1], в цели которого входит удержание прироста глобальной средней температуры ниже 2 °С и повышение способности адаптироваться к неблагоприятным воздействиям изменения климата. Результатирующими показателями является снижение выбросов углекислого газа к 2030 г. на 70% от уровня выбросов 1990 г., а к 2050 г. достижение нулевых глобальных выбросов. В 2021 г. прошла очередная Рамочная конвенция ООН об изменении климата, в которой подтверждены цели Парижского соглашения и подчеркнута необходимость ускорить процесс декарбонизации, удвоить финансирование для поддержки борьбы с изменениями климата, а также постепенного отказа от угля, в качестве энергоресурса [2].

В Российской Федерации (далее РФ) развитие водородной энергетики закреплено на государственном уровне [3-6]. Так в энергетической стратегии РФ до 2035 г. поставлена задача развития производства и применения водородного топлива и достижения целевых экспортных показателей к 2024 и 2035 году. Для проектов в области энергети-

ки (новых и существующих) поставлены цели в области устойчивого развития [7] и критерии их определения [8], которые позволяют привлекать бюджетное финансирование.

РФ имеет самые большие подтвержденные запасы природного газа в мире (37,4 трл м<sup>3</sup> (19,9% от всего запаса мире)) [9], что позволяет развивать способы производства водорода из природного газа. На сегодняшний день из природного газа производится наибольшая доля водорода способом паровой конверсии природного газа (далее ПВК) [10]. Преимуществом такого способа является высокий уровень готовности технологии и низкая стоимость произведенного водорода. К основным направлениям развития ПВК можно отнести дальнейшее снижение удельных затрат энергоресурсов на производство водорода, внедрение установок по улавливанию углекислого газа, а также разработка более эффективных катализаторов на различные технологические стадии производства.

Достичь снижения удельных затрат энергоресурсов на производство водорода можно путем комбинированной работы с генерацией электрической и/или тепловой энергии. Схема такого способа работы запатентован в ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» [11] Более подробно пути повышения эффективности генерации энергии на тепловых электрических станциях за счет производства дополнительных энергоносителей рассмотрены в [12].

На данный момент существует большое количество программных сред, в которых можно произвести моделирование схемы используя реальные или теоретические параметры работы блоков, чтобы определить эффективность исследуемой схемы. Моделирование схем позволяет предварительно определить характеристики системы перед внедрением ее в существующие процессы генерации энергии и оценить эффекты от такого внедрения без существенных экономических затрат.

### 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ПАРОВОЙ КОНВЕРСИЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТКОВ ТЕПЛА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для определения технических параметров производства водорода паровой конверсией природно-

го газа совместно с производством электрической энергии было проведено моделирование в программной среде Aspen Hysys. Избытки технологической тепловой энергии, которые образуются в процессе производства водорода после парового риформинга метана и высокотемпературной и низкотемпературной реакции водяного сдвига, направляются на производство электрической энергии. Помимо утилизации избытков технологической тепловой энергии, в схеме организована утилизация тепловой энергии из дымовых газов. Схема модели производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации избытков тепла для производства электрической энергии представлена на рис. 1. Результаты моделирования и анализ компонентного состава после реакторов конверсии природного и низкотемпературного водяного сдвига приведены в таблице 1 и 2 соответственно.

Для разрабатываемой модели в качестве реактора конверсии метана выбран Реактор Гиббса, а для высокотемпературной и низкотемпературной реакции водяного сдвига выбран Реактор равновесия. При моделировании используются только механизмы, заложенные в программной среде Aspen Hysys, и не производится моделирование катализатора из-за отсутствия данных, которые возможно получить только опытно-экспериментальным путем.

Разработанная схема работает следующим образом: в горелки поступает смесь топлива (метан), окислителя (воздуха) и отдувочного водорода (имеется в виду водород, который направляется совместно с отдувочными газами, из установки выделения методом короткоциклового адсорбции (далее КЦА)).

Сжигание топливной смеси необходимо для обеспечения условия прохождения конверсии метана в соответствующем реакторе. Дымовые газы, которые образуются в процессе сжигания топливной смеси, нагревают парогазовую смесь, которая имеет температуру 400 °С (такая температура получена за счет утилизации тепловой энергии дымовых газов горелки и технологических потоков производства водорода), до 500 °С в теплообменнике. Далее дымовые газы от горелки выбрасываются в атмосферу отдав свою теплоту, метану, воде и воздуху. Нагретая до 500 °С смесь поступает в реактор предриформинга, где при данной температуре начинается реакция конверсии метана с образованием синтез-газа. Далее смесь направляется в реактор парового риформинга, где на выходе она имеет температуру 850 °С. Так как для высокотемпературного реактора водяного сдвига температура должна быть 400 °С, предусмотрен теплообменник, в котором происходит генерация пара. Аналогичным способом (через теплообменник) синтез-газ далее поступает в Низкотемпературный реактор водяного сдвига с температурой 200 °С. Далее полученная смесь поступает в систему выделения водорода методом КЦА через сепаратор (для удаления воды).

Разработанная схема применима в первую очередь к объектам теплоэнергетики, которые работа-

ют по принципу когенерации (в первую очередь теплоэлектроцентралям (далее ТЭЦ)), в качестве топлива используется природный газ, имеется возможность увеличить расход природного газа и воды и имеется свободное место на территории генерации для размещения оборудования для производства водорода. Для существующих ТЭЦ возможно следующий способ реализации – ТЭЦ работает традиционным способом, на объекте генерации располагается производство водорода, к которому дополнительно подводится природный газ и вода. Электрическая энергия, которая производится в схеме может быть направлена в общую сеть (потребителю) или на обслуживание электрических нужд производства водорода. Альтернативным, но не последним, способом реализации производства водорода на ТЭЦ может быть способ, представленный в [11], однако он потребует дополнительных капитальных (внедрения дополнительных установок (электролизера, высокотемпературного пароперегревателя и т.д.), прокладки дополнительных соединительных труб и возможно модернизации существующего оборудования (парового котла и паровой турбины)) и операционных (на обслуживание дополнительных установок) затрат, однако таким способом возможно добиться более высокого увеличения эффективности, чем в предыдущем рассматриваемом способе реализации.

По результатам моделирования проведен анализ технических параметров схемы от коэффициента  $\beta$  – отношение водяного пара к природному газу, подаваемого в качестве сырья в реактор паровой конверсии метана, расчет которого проходит по формуле (1):

$$\beta = \frac{V_{H_2O}}{V_{CH_4}} \quad (1)$$

где  $V_{H_2O}$  – объемный расход водяного пара, направляемый в реактор конверсии метана, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{CH_4}$  – объемный расход природного газа в реактор конверсии метана, м<sup>3</sup>/ч.

Оценка данного коэффициента позволяет оценивать эффективность работы катализаторов в реакторе паровой конверсии метана. Подбор и использование эффективных катализаторов позволит снизить удельные затраты энергии на обеспечения процесса (например, путем снижения температуры конверсии при сохранении постоянного выхода водорода) и снизить расход пара.

На рис. 2 представлено отношение удельного расхода природного газа на производство водорода в зависимости от коэффициента  $\beta$ .

Как видно на рис. 2 оптимальным отношением  $\beta$ , является 4,5. В данной точке достигаются самые низкие затраты природного газа на производство водорода. При соотношениях  $\beta$  равных 3 – 4,5 схема работает в условиях, когда большое количество природного газа не вступает в реакцию конверсии метана, что подтверждает по снижению доли метана в газовой смеси после реактора низкотемпературного водяного сдвига в таблице 2. При соотношениях  $\beta$  равных 4,5 – 6 схема работает в условиях избытка

водяного пара. В данном режиме затрачивается избыточная энергия на обогрев избытков водяного пара. Как видно в составе синтез-газа на выходе из реактора 0,0099 моли метана, что говорит о высокой степени конверсии метана в реакторе. При  $\beta$  равной 3 и 6 прореагировало на 80 % больше метана при

снижении выхода водорода на 20 % в связи с тем, что часть водорода переходит в водяной пар (увеличивается выход водяного пара в исследуемой смеси на 30%) и снижается доля монооксида углерода на 43%.

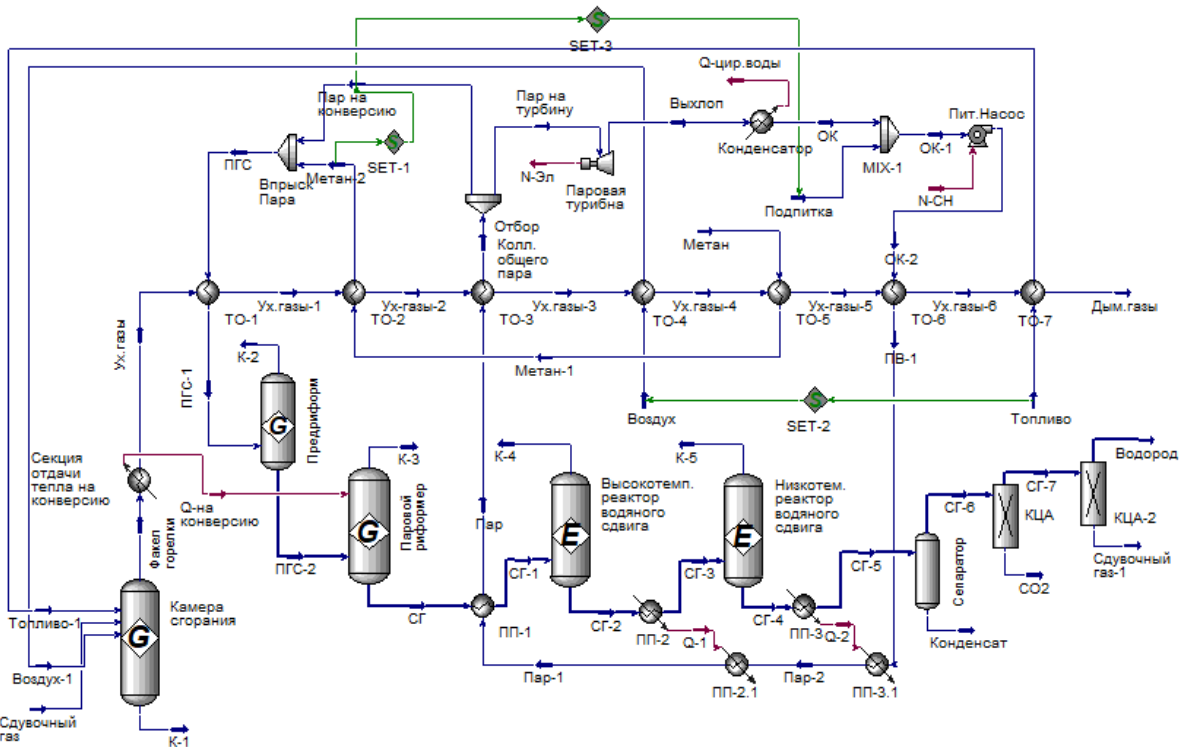


Рис 1. Схема производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации избытков тепла для производства электрической энергии

ПГС – парогазовая смесь, К- отвод конденсата, СГ – синтез-газ, ТО – теплообменник, ПП – подогреватель питательной воды (пара), ПВ – питательная вода, ОК – основной конденсат.

Таблица 1. Результаты моделирования

Параметр	Значение						
Коэффициент $\beta$	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Расход природного газа на конверсию, кг/ч	23345,60	23345,60	23345,60	23345,60	23345,60	23345,60	23345,60
Расход природного газа на горение, кг/ч	8791,56	9433,00	9998,98	10898,89	12424,73	15033,93	19243,43
Общий расход природного газа, кг/ч	32137,16	32778,60	33344,58	34244,49	35770,33	38379,53	42589,03
Расход пара на конверсию, кг/ч	81442,79	95250,05	108590,39	122164,19	135737,99	149311,79	162885,59
Расход пара на производство электроэнергии, кг/ч	42809,35	46031,56	49253,77	56149,30	67940,65	86964,03	117401,44
Общий расход пара, кг/ч	124252,14	141281,61	157844,16	178313,49	203678,64	236275,82	280287,03
Производство водорода, кг/ч	8204,30	9109,25	9543,88	9911,42	10215,73	10467,14	10674,52
Выработка электроэнергии, МВт	9,01	9,69	10,36	11,82	14,30	18,30	24,71
Удельный расход природного газа на производство водорода, кг <sub>CH4</sub> /кг <sub>H2</sub>	3,92	3,60	3,49	3,46	3,50	3,67	3,99

Таблица 2. Анализ компонентного состава

Наименование компонента	Содержание, мольные доли						
	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Состав синтез-газа после ПВК (температура потока 850 °С)							
CH <sub>4</sub>	0,0480	0,0362	0,0273	0,0209	0,0162	0,0126	0,0099
H <sub>2</sub> O	0,3700	0,4047	0,4331	0,4603	0,4852	0,5081	0,5294
CO	0,0754	0,0680	0,0622	0,0566	0,0517	0,0472	0,0433
CO <sub>2</sub>	0,0561	0,0574	0,0582	0,0584	0,0584	0,0581	0,0575
H <sub>2</sub>	0,4505	0,4337	0,4192	0,4037	0,3886	0,3740	0,3599
Состав синтез-газа после низкотемпературного реактора водяного сдвига, мольные доли (температура потока 200 °С)							
CH <sub>4</sub>	0,0480	0,0358	0,0273	0,0209	0,0162	0,0126	0,0099
H <sub>2</sub> O	0,2963	0,3368	0,3719	0,4044	0,4342	0,4614	0,4866
CO	0,0017	0,0013	0,0010	0,0008	0,0006	0,0005	0,0004
CO <sub>2</sub>	0,1298	0,1245	0,1194	0,1143	0,1094	0,1048	0,1004
H <sub>2</sub>	0,5242	0,5017	0,4804	0,4595	0,4396	0,4207	0,4028

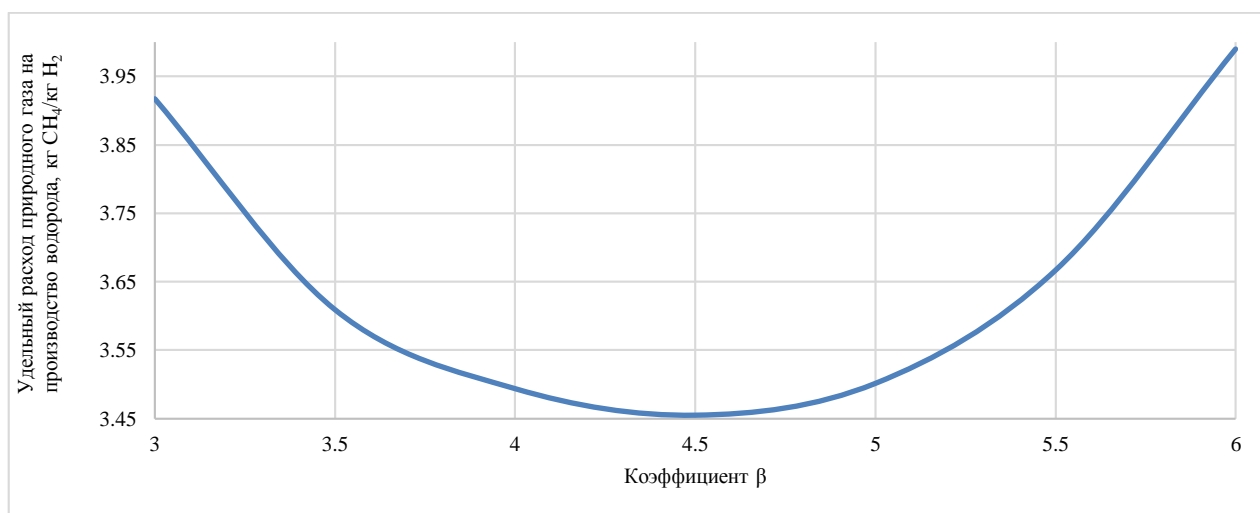


Рис. 2 Отношение удельного расхода природного газа на производство водорода в зависимости от коэффициента β

Увеличение коэффициента β увеличивает вырабатываемую электрическую мощность станции. При коэффициенте β равной 3 электрическая мощность станции на 23,77% меньше, чем при коэффициенте β равной 4,5. При увеличении коэффициента β до 6, электрическая мощность вырастет на 52,17% по сравнению с β равной 4,5.

### 3. ОЦЕНКА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО КПД МОДЕЛИРОВАННОЙ СХЕМЫ

Для оценки эффективности производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации тепла для производства электроэнергии был проведен расчет эксергетического КПД для схемы представленной на рис. 1.

Эксергия термодинамической системы определяется количеством энергии, не характеризующейся энтропией, которое может быть получено внешним потребителем энергии от системы или подведено от внешнего источника к системе при ее обратимом переходе из данного состояния в состояние полного равновесия с окружающей средой [13]. Методика расчета подробно изложена в работах [13-15].

Расчет эксергетического КПД проводится по формуле (2):

$$\eta_e = \frac{\sum E_{\text{ВЫХ}}}{\sum E_{\text{ВХ}}}, \quad (2)$$

где  $\sum E_{\text{ВЫХ}}$  и  $\sum E_{\text{ВХ}}$  — результирующий эксергетический поток на выходе и на входе установки соответственно, МДж. Для определения результирующего эксергетического потока используются формулы (3)-(6), где формула (3), используется для оценки эксергии потока:

$$E_{\text{пот}} = G_{\text{пот}} \cdot [(h_{\text{пот}} - h_0) - T_0 \cdot (s_{\text{пот}} - s_0)], \quad (3)$$

где  $G_{\text{пот}}$  — объемный расход потока топлива, м<sup>3</sup>/ч;  $h_{\text{пот}}$  — энтальпия потока при заданных параметрах, кДж/кг;  $s_{\text{пот}}$  — энтропия потока при заданных параметрах, кДж/(кг·К);  $h_0$  — энтальпия потока при параметрах окружающей среды, кДж/кг;  $s_0$  — энтропия потока при параметрах окружающей среды, кДж/(кг·К);  $T_0$  — температура окружающей среды, К. Для оценки эксергии тепловой энергии используется формула (4):

$$E_{\text{теп}} = Q_{\text{теп}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{теп}}}\right), \quad (4)$$

где  $Q_{\text{теп}}$  — подводимое тепло, кДж/ч;  $T_{\text{теп}}$  — температура подводимого потока тепла, К.

Оценка эксергии потока электроэнергии происходит по формуле (5):

$$E_э = N_э, \quad (5)$$

где  $N_э$  – количество выработанной электроэнергии за исследуемый промежуток времени, МДж.

Для оценки эксергетического потока топлива используется формула (6):

$$E_{\text{топ}} = V_{\text{т}} \cdot (1,04 \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} + [(h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)]), \quad (6)$$

где  $V_{\text{т}}$  – объемный расход потока топлива, м<sup>3</sup>/час;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания топлива, выделяемой при полном сгорании топлива без конденсации водяного пара, кДж/ч.

На рис. 3 представлена схема «модели черного ящика» для эксергетического анализа производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации тепла для производства электроэнергии. Для полноты расчета принимается, что электрические затраты на:

- собственные нужды составляют 0,366 МВт;

- работу установки производства водорода составляют 1,216 МВт.

Среди входящих потоков учитываются затраты природного газа в качестве топлива (обеспечение тепловых условий процесса) и сырья (метан для конверсии) и затраты деминерализованной воды на конверсию и электрический цикл. На выходе в оценке учитывается поток генерируемой электроэнергии с учетом затрат на собственные нужды системы (в которые входят потребление электричества водородной установки и на прочие собственные нужды), а также поток продуктового водорода.

Результаты оценки эксергетического КПД в зависимости от коэффициента  $\beta$  представлены в таблице 3. На рис. 4 представлена зависимость эксергетического КПД от коэффициента  $\beta$ .

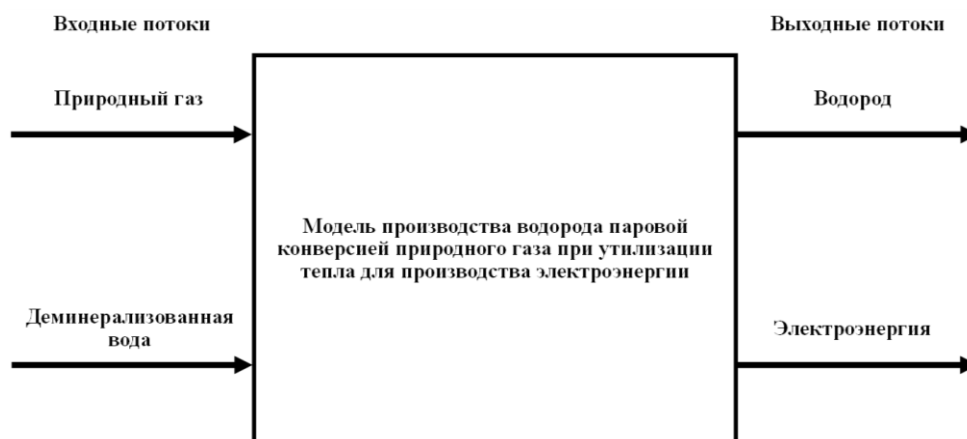


Рис. 3. Схема «модели черного ящика» для эксергетического анализа производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации тепла для производства электроэнергии

Таблица 3. Результаты оценки эксергетического КПД в зависимости от коэффициента  $\beta$

Параметр	Значение						
	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Входные потоки							
Эксергия топлива, МДж	1690090,94	1723822,08	1753586,89	1800913,03	1881156,75	2018374,22	2239751,24
Эксергия деминерализованной воды, МДж	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Результирующий входной эксергетический поток, МДж	1690091,15	1723822,29	1753587,10	1800913,24	1881156,96	2018374,43	2239751,46
Выходные потоки							
Эксергия водорода, МДж	1049419,93	1165172,96	1220766,90	1267779,30	1306703,88	1338861,98	1365388,15
Эксергия электрической энергии, МДж	26736,80	29177,92	31619,04	36843,03	45776,06	60188,01	83247,14
Результирующий выходной эксергетический поток, МДж	1076156,73	1194350,88	1252385,94	1304622,33	1352479,95	1399049,99	1448635,30
Эксергетический КПД, %	63,67%	69,29%	71,42%	72,44%	71,90%	69,32%	64,68%



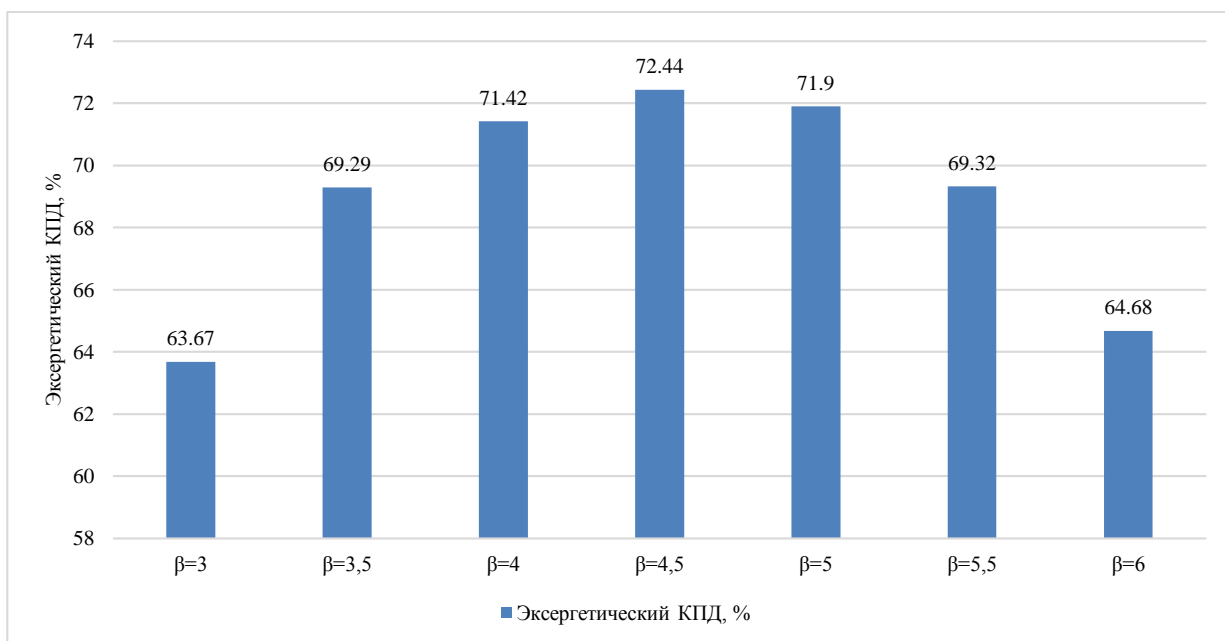


Рис. 4. Зависимость эксергетического КПД от коэффициента  $\beta$

Как видно на рис. 4, самым высоким эксергетическим КПД обладает система при коэффициенте  $\beta$  равным 4,5. Результаты эксергетического КПД подтверждают результаты, представленные на рис. 2. Данный режим дает прирост в 8,77%, по сравнению с  $\beta$  равным 3 и на 7,76% с  $\beta$  равным 6. Это связано с тем, что в этом режиме достигаются минимальный удельный расход природного газа на производство водорода. Стоит заметить, что несмотря на то, что удельный расход природного газа на производство водорода при  $\beta$  равным 6 больше, чем при  $\beta$  равным 3 (3,99 и 3,92 кгСН<sub>4</sub>/кгН<sub>2</sub>) на 1,75%, эксергетический КПД при  $\beta$  равным 6 больше на 1,01%.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено моделирование схемы производства водорода паровой конверсией природного газа при утилизации избытков тепла для производства электрической энергии при варьировании коэффициента  $\beta$ . Получено, что наиболее оптимальным отношением  $\beta$ , является 4,5. В данной точке достигаются самые низкие затраты природного газа на производство водорода. При коэффициентах  $\beta$  равных 3 – 4,5 схема работает в условиях, когда большее количество природного газа не вступает в реакцию конверсии метана, а при коэффициентах  $\beta$  равных 4,5 – 6 схема работает в условиях избытка водяного пара. При  $\beta$  равной 3 и 6 прореагировало на 80 % больше метана при снижении выхода водорода на 20 % в связи с тем, что часть водорода переходит в водяной пар (увеличивается выход водяного пара в исследуемой смеси на 30%) и снижается доля монооксида углерода на 43%.

2. Увеличение коэффициента  $\beta$  увеличивает вырабатываемую электрическую мощность станции. При коэффициенте  $\beta$  равной 3 электрическая мощность станции на 23,77% меньше, чем при коэффициенте  $\beta$  равной 4,5. При увеличении коэффициенте

$\beta$  до 6, электрическая мощность вырастет на 52,17% по сравнению с  $\beta$  равной 4,5.

3. Самым высоким эксергетическим КПД обладает система при коэффициенте  $\beta$  равным 4,5. Результаты эксергетического КПД подтверждают результаты, представленные на рис. 2. Данный режим дает прирост в 8,77%, по сравнению с  $\beta$  равным 3 и на 7,76% с  $\beta$  равным 6. Это связано с тем, что в этом режиме достигаются минимальный удельный расход природного газа на производство водорода. Стоит заметить, что несмотря на то, что удельный расход природного газа на производство водорода при  $\beta$  равным 6 больше, чем при  $\beta$  равным 3 (3,99 и 3,92 кгСН<sub>4</sub>/кгН<sub>2</sub>) на 1,75%, эксергетический КПД при  $\beta$  равным 6 больше на 1,01%.

4. Производство водорода на объектах генерации электрической энергии позволит снизить удельные расходы на производство водорода за счет утилизации избытков тепловой энергии на производство электрической энергии, что позволит достичь повышения выработки электрической энергии. В случае локального применения водорода на электрической станции возможно будет частичное или полное снижение выбросов парниковых газов путем добавления водорода в топливную смесь на объекте генерации энергии. Альтернативным путем использования водорода является внедрение высокотемпературных пароперегревателей на водород-кислородной топливной смеси или охлаждения водородом турбинного блока. Развитие локального использования водорода позволит отказаться от систем крупнотоннажного хранения и транспортировки водорода до развития крупных потребителей, которыми в обозримом будущем может стать транспортная отрасль.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

К- отвод конденсата;  
КЦА – короткоцикловая адсорбция;

ОК – основной конденсат.  
ООН – Организация Объединенных Наций  
ПВ – питательная вода;  
ПВК – паровая конверсия природного газа;  
ПГС – парогазовая смесь;  
ПП – подогреватель питательной воды (пара);  
РФ – Российская Федерация  
СГ – синтез-газ;  
ТО – теплообменник;  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль.  
КЦА – короткоцикловая адсорбция

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adoption of The Paris Agreement. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://unfccc.int/sites/default/files/russian\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf) (дата обращения: 08.06.2022).
2. COP26: Together for our planet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.un.org/en/climatechange/cop26> (дата обращения: 08.06.2022).
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.11. 2009 № 1715-р.
4. План мероприятий «Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Утвержден распоряжением Правительства РФ от 12.10.2020 № 2634-р.
5. План мероприятий по реализации Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. Утвержден распоряжением Правительства РФ от 01.06.2021 №1447-р.
6. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Утверждена распоряжением Правительством РФ от 05.08.2021 № 2162-р.
7. Постановление «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации». Утвержден распоряжением Правительства РФ от 21.09.2021 № 1587.
8. Цели и основные направления устойчивого (в том числе зеленого) развития Российской Федерации. Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 № 1912-р.
9. BP Statistical Review of World Energy 2021. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-natural-gas.pdf> (дата обращения: 08.06.2022).
10. **Аксютин, О.Е.** Роль российского природного газа в развитии водородной энергетики / О.Е. Аксютин, А.Г. Ишков, К.В. Романов, Р.В. Тетеревлев // Энергетическая политика, № 3, 2021. – 6-19 с.
11. **Пат. 2708936 (РФ), СПК F01K/13.** Мультигенерирующий комплекс с комбинированным топливом при дополнительном производстве водорода и кислорода / С.Н. Петин, Д.Д. Голдобин, П.Н. Борисова, А.В. Бурмакина, Г.А. Романов. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2019104173. заявл. 14.02.2019 // Изобретения. 2019. № 35.
12. **Голдобин, Д.Д.** Обзор путей повышения эффективности генерации энергии на ТЭС за счет дополнительных энергоносителей / Д.Д. Голдобин, С.Н. Петин, А.В. Бурмакина // Энергосбережение – теория и практика: Труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 19–23 октября 2020 г.) – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. – 189-193 с.
13. **Бродянский, В.М.** Эксергетический метод термодинамического анализа. –М.: Энергия. 1973. – 296 с.
14. **Киселев, Г.П.** Варианты расчета удельных показателей эффективности работы ТЭЦ / Методическое пособие по курсу «ТЭС и АЭС» для студентов, обучающихся по направлению «Теплоэнергетика». М.: Изд-во МЭИ. 2003.-32 с.
15. **Клименко, А.В.** Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа/ А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова, С.Н. Петин // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – № 6. – С. 961-968.

А.М. Латыпов<sup>1</sup>, Н.Б. Садартынов<sup>2</sup>, Н.А. Татарникова<sup>1</sup>, А.В. Стерхов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», Россия

<sup>2</sup>АО «Нижевартовская ГРЭС», Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Россия

## О РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ТЭС, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРЯМОТОЧНУЮ СИСТЕМУ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Для большинства ТЭС производство электроэнергии сопряжено с потреблением большого количества водных ресурсов. Данная потребность сохраняется и в момент снижения доступности водных ресурсов в регионе, например, из-за роста населения, колебаний осадков и изменения цен на водопользование. Ограничения на водные ресурсы могут повлиять на выбор технологии производства электроэнергии в данном районе, на географическое размещение станции, и её эксплуатацию.

Для каждого электрогенерирующего объекта потребности в воде индивидуальны, но в большинстве случаев более 90% от общего потребления воды на электростанции приходится на систему охлаждения. Поэтому многие организации во всем мире стремятся оптимизировать использование воды на электростанциях, разрабатывая технологии для сокращения доли использования воды.

### 1. ПРОБЛЕМА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ПРЯМОТОЧНЫХ ТЭС И АЭС

Большинство существующих на сегодняшнее время в РФ электростанций большой мощности имеют прямоточные системы технического водоснабжения (СТВ), которые подразумевают под собой значительное потребление количества воды из естественных источников водоснабжения. По данным Минэнерго, прямоточные системы водоснабжения используют около 80 российских ТЭС и две АЭС с общей установленной электрической мощностью 49,52 ГВт. Это лишь 26% от общей установленной электрической мощности в РФ и 32% всей электрической мощности ЕЭС, но на долю прямоточных ТЭС приходится почти 90% (21,7 млрд куб. м) от всего объёма воды, используемой электрогенерирующими предприятиями в нашей стране [1].

Норма части 1 статьи 46 Водного кодекса РФ, в соответствии с которой использование водных объектов для целей производства электрической энергии должно осуществляться с соблюдением требований рационального использования и охраны водных объектов, и постановление Правительства РФ

от 26 декабря 2014 г. № 1509 "О ставках платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности", заставляют персонал энергогенерирующих предприятий, производящих водозабор из естественных источников водоснабжения (т.е. использующих прямоточную СТВ), проводить мероприятия по сокращению потребления водных ресурсов путем увеличения доли последовательно используемой охлаждающей воды, необходимой для выработки электроэнергии [2,3].

Одним из основных способов сокращения водозабора из источников водоснабжения является перевод прямоточных систем охлаждения и технического водоснабжения в оборотные и прямоточно-оборотные системы с многократным использованием охлаждающей воды в технологическом процессе выработки электроэнергии. Известна система прямоточного водоснабжения, в которой для сокращения водозабора из источника водоснабжения часть теплой воды из отводящего канала подают в градирни. Охлажденная в градирнях вода вместе с некоторым количеством поступающей речной воды транспортируется по напорным трубам к конденсаторам турбин (рис. 1) [4].

Однако не всегда представляется возможным по топографическим условиям или другим причинам расположить градирни компактной группой, поэтому их размещают в стороне от главного корпуса, что влечет за собой значительное удлинение коммуникаций, а также сооружение дополнительных циркуляционных насосных станций. При таких системах мало используются сооружения, предназначенные для прямоточной системы водоснабжения, велика удельная стоимость сооружений с искусственными охладителями, несутся большие эксплуатационные

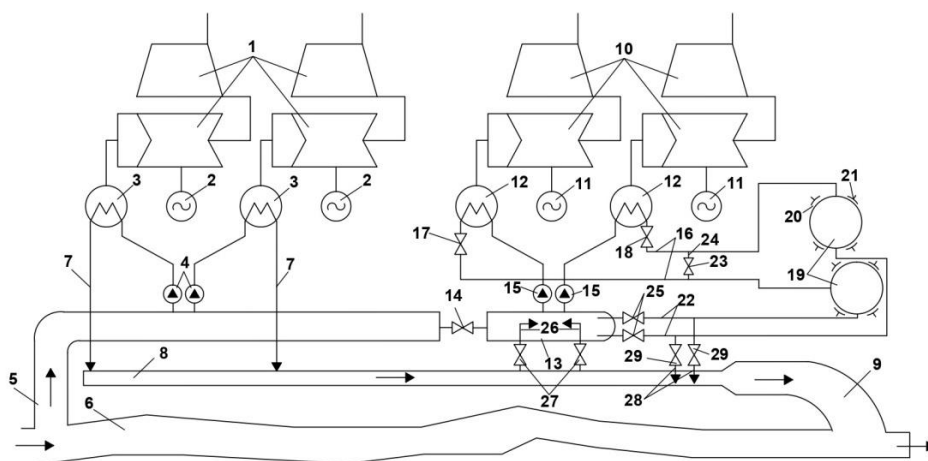


Рис. 1. Схема системы технического водоснабжения конденсаторов по SU 1 744 277 А1: 1, 10 – паротурбинная установка; 2, 11 – генератор; 3, 12 – конденсатор паровой турбины; 4 – циркуляционные насосы контура прямого технического водоснабжения; 5 – водоподводящий канал; 6 – источник водоснабжения; 7, 6, 22 – трубопровод сливной водопроводной воды; 8 – водоотводящий канал; 9 – выходной участок; 13 – сливная емкость; 14 – трубопровод с задвижкой; 15 – циркуляционные насосы контура обратного технического водоснабжения; 17, 18, 23, 25, 27, 29 – задвижки; 19 – градирни; 20 – воздушные окна градирен; 21 – затворы воздушных окон; 24, 26, 28 – трубопроводы.

расходы на обслуживание данных систем.

Энергетики привлекали внимание властей к проблеме прямоточных ТЭС и АЭС с момента начала повышения ставок, но окончательно закрыть вопрос удалось лишь к 2020 году. Изменения в правилах расчёта ставок для прямоточных ТЭС и АЭС были внесены Постановлением Кабмина № 1211. В 2020 году дифференцированные ставки по бассейнам заморожены на уровне 2019 года. В 2021–2025 годах для всех прямоточных электростанций установлена единая ставка 636 рублей за 1 тыс. куб. м вне зависимости от речного бассейна. Начиная с 2026 года плата будет ежегодно увеличиваться на уровень официальной инфляции. Единственным исключением оказались ТЭС, берущие воду из бассейна Байкала. Из-за изначально высоких базовых ставок – 576 рублей за 1 тыс. куб. м – для озера было сделано исключение: для бассейна рек Байкала единая ставка была установлена на уровне 636 рублей с 2020 года, без переходного периода в 2020 году.

Урегулирование проблемы роста водопользовательских ставок позволило предотвратить избыточную тарифную нагрузку для крупных потребителей водных ресурсов в сфере тепловой энергетики. Но пока нерешённым остаётся вопрос строительства новой генерации, а также реконструкции уже имеющихся энергоблоков ТЭС. Несмотря на то, что прямоточные системы водоснабжения наряду с обратными (замкнутыми) признаны властями наилучшими доступными технологиями (НДТ), в Водном кодексе РФ (ст. 60) до сих пор содержится прямой запрет на проектирование и строительство прямоточных электростанций.

Запрет на прямоток был введён в Водный кодекс более 10 лет назад. Причиной стало ртутное загрязнение Братского и Усть-Илимского водохранилищ, обусловленное сбросом сточных вод Братским цел-

люлозно-бумажным комбинатом, горно-обогатительным комбинатом и предприятиями химической промышленности, то есть заводами, к энергетике отношения не имеющими. Экологические риски, связанные с использованием прямоточных систем этими предприятиями, были необоснованно распространены на любые системы прямоточного водоснабжения, указывают в Минэнерго.

Между тем у промпредприятий вода является составной частью производственного процесса, напрямую контактирует с химическими элементами и необходима для получения конечного продукта. Но вода, потребляемая прямоточными электростанциями, возвращается в природные источники в неизменном виде: 98% сточных вод таких ТЭС являются «нормативно чистыми без очистки», и лишь 2% – недостаточно очищенными. При этом до 86,4% сточных вод обрабатывающих производств, предприятий по добыче полезных ископаемых, утилизации отходов классифицируются как загрязнённые. Принудительное замыкание водооборота – это, прежде всего, дополнительные расходы, не имеющие экологических или экономических предпосылок, указывают энергетики. По данным «Интер РАО – Электрогенерация», на которые ссылается Минэнерго, запрет на проектирование прямоточных систем технического водоснабжения при строительстве энергоблока ПГУ-800 МВт Пермской ГРЭС привёл к увеличению затрат на 1,78 млрд рублей.

По оценкам «РусГидро», мораторий увеличивает стоимость реконструкции действующей Владивостокской ТЭЦ-2 (вывод части турбин, ввод двух ПГУ мощностью до 400 МВт) на 2 млрд рублей (создание сухих вентиляторных градирен). Те же сухие градирни обошлись в те же 2 млрд рублей при модернизации «РусГидро» Сахалинской ГРЭС-2. Аналогичное решение для Ириклинской ГРЭС, согласно расчётам «Интер РАО» 2016 года, обошлось бы в 1,15 млрд рублей (без НДС) со сроком окупаемости

почти 11 лет, при этом топливные расходы станции выросли бы на 470 тыс. т. у. т. в год [1].

Необходимо понимать, что и прямоточная, и оборотная системы тех. водоснабжения относятся к НДТ. Комплексный анализ показывает, что прямоточные системы при этом имеют ряд преимуществ. Так, КПД таких станций в среднем на 1,5% выше, чем при использовании оборотных систем. Кроме того, они имеют в 1,5–2 раза меньший уровень безвозвратного потребления воды (в виду отсутствия испарения части воды при охлаждении в искусственных охлаждающих сооружениях, таких как: брызгальные бассейны и башенные испарительные градирни), существенно снижены сбросы химических веществ в окружающую среду [1].

## 2. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ КАК СПОСОБ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ПРЯМОТОЧНЫХ ТЭС/АЭС

Известны системы технического водоснабжения электростанций с рециркуляцией части охлаждающей воды. В таких системах происходит смешение холодной воды, забираемой из источника водоснабжения, с частью сбросной теплой воды. На ряде таких станций (Нижевартовская, Ириклинская, Костромская ГРЭС) проектом предусмотрен канал обогрева/обводной канал (рис. 2).

Основной целью данного канала является: поддержание заданной температуры циркуляционной воды на входе в конденсационные установки паровых турбин (как правило, это 10-12°C), а также борьба с шугой в осенне-зимний период. В настоящее время, в целях экономии водных ресурсов в

условиях повышения платы за водопользование, данный канал может быть применен для более интенсивного последовательного использования охлаждающей воды путем увеличения доли рециркуляции охлаждающей воды.

Рециркуляция воды осуществляется посредством перепуска сливной циркуляционной воды в подводящий канал через канал обогрева (канал рециркуляции).

К примеру, запуск канала рециркуляции позволил Костромской ГРЭС перейти с прямоточной системы технического водоснабжения на частично оборотную систему технического водоснабжения, а также увеличить долю повторного использования воды в зимний период до 60% от водопотребления энергоблоков. Экономический эффект достигается благодаря уменьшению водозабора из источника водоснабжения – реки Волги и, соответственно, снижению условно-переменных затрат за водопользование энергопредприятия. Ожидаемый срок окупаемости проекта составляет 4 года. [5].

Однако при использовании данного метода возрастает температура охлаждающей воды на входе в конденсаторы паровых турбин, что влечёт за собой повышение давления пара в конденсаторе и, как следствие, падение экономичности паросиловых блоков и увеличение удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии. Поэтому к задаче по сокращению платы за пользование водными ресурсами путем применения рециркуляции охлаждающей воды необходимо подходить с точки зрения определения оптимальной температуры охлаждающей воды на входе в конденсаторы паровых турбин.



Рис. 2. Схема технического водоснабжения Ириклинской ГРЭС

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прямоточная, и обратная системы тех. водоснабжения относятся к НДТ. Комплексный анализ данных СТВ показывает, что прямоточные системы обладают рядом преимуществ перед обратными, такими как: достигается более высокий КПД энергогенерирующего оборудования при работе с данной СТВ, меньший уровень безвозвратных потерь водных ресурсов, существенно более низкие сбросы химических веществ в окружающую среду, меньшие эксплуатационные расходы.

В рамках текущего законодательства РФ наиболее рациональным решением задачи по сокращению забора (изъятия) водных ресурсов для прямоточных систем охлаждения, а также сокращения издержек, связанных с ежегодно повышающейся ставкой платы за водопользование, является применение рециркуляции охлаждающей воды. Однако к задаче по сокращению платы за пользование водными ресурсами путем применения рециркуляции охлаждающей воды необходимо подходить с точки зрения определения оптимальной температуры охлаждающей воды на входе в конденсаторы паровых турбин.

Данное техническое решение требует гораздо меньше капитальных затрат на переустройство СТВ прямоточных ТЭС, чем перевод последних на замкнутую систему технического водоснабжения. При этом применение рециркуляции части охлаждающей воды оказывает наименьшее негативное влияние на эффективность работы энергоблоков

ТЭС, чем их полный или частичный перевод на обратные системы технического водоснабжения.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭС — тепловая электростанция  
АЭС — атомная электростанция  
СТВ — системы технического водоснабжения  
НДТ — наилучшие доступные технологии  
ПГУ — парогазовая установка  
ГРЭС — государственная районная электростанция  
ТЭЦ — теплоэлектроцентраль  
НДС — налог на добавленную стоимость  
КПД — коэффициент полезного действия

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «**Порядок на воде**» журнал «Энергия без границ» // 2020. №5(64). С. 8-12.
2. «**Водный кодекс** Российской Федерации» от 03.06.2006 N 74-ФЗ (ред. от 31.10.2016).
3. **Постановление** Правительства РФ от 26.12.2014 N 1509 "О ставках платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности, и внесении изменений в раздел I ставок платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности".
4. **Патент** на изобретение SU 1744277 A1 – «Система технического водоснабжения конденсаторов».
5. На Костромской ГРЭС введен в эксплуатацию канал рециркуляции // СМИ44 URL: <https://smi44.ru/news/economy/na-kostromskoy-gres-vveden-v-ekspluatatsiyu-kanal-retsirkulyatsii/> (дата обращения: 15.05.2022).



*В.Ю. Наумов, С.К. Осипов, О.В. Злышко, В.О. Киндра*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В УГЛЕКИСЛОТНЫХ ЦИКЛАХ БРАЙТОНА И РЕНКИНА

### АННОТАЦИЯ

Рост стоимости топлива и ужесточение экологических норм предопределяет важность энергосбережения в различных отраслях промышленности. В частности, возрастает актуальность полезного использования различных низкопотенциальных источников теплоты, температура которых не превышает 300-400°C. Применение низкотемпературных энергоустановок, работающих на низкокипящих теплоносителях, для производства электроэнергии является актуальным решением проблемы. В качестве рабочего тела был выбран углекислый газ, который является невоспламеняющимся, нетоксичным, доступным, а также имеет низкий потенциал глобального потепления и нулевой потенциал разрушения озонового слоя. Были рассмотрены энергетические установки на основе циклов Ренкина и Брайтона без и с регенерацией, работающие на углекислом газе. Моделирование проводилось при условии поддержания температуры источников подвода теплоты на постоянном и переменном уровнях. По результатам расчетов получено, что при температурах на входе в турбину 50-200°C наибольшее значение КПД нетто достигается для цикла Ренкина с регенерацией, а при начальных температурах 250-350°C - цикла Брайтона с регенерацией. При утилизации теплоты потока газов с температурой 152°C наибольший КПД нетто, равный 9,9%, достигается при использовании циклов Ренкина и Брайтона с регенерацией, при температуре греющего потока 184°C – 12,1% при использовании цикла Брайтона с регенерацией, а при температуре 226°C – 13,6% при использовании цикла Брайтона без регенерации.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рост стоимости топлив и ужесточение экологических норм предопределяет важность применения энергосберегающих мероприятий для промышленных предприятий. В частности, перспективным направлением является утилизация источников низкопотенциальной теплоты (НПТ). Средний характерный температурный диапазон источников НПТ составляет 50-350°C согласно [1,2]. Для полезной утилизации источников НПТ возможно применение низкотемпературных энергоустановок для производства электроэнергии. Данные энергоустановки могут работать на различных видах низкокипящих теплоносителей, включая органические теплоносители, диоксид углерода, смесь воды и аммиака и других. Однако одним из наиболее дешевых, а также отличающихся низкой токсичностью, воспламеняемостью, нулевым потенциалом разрушения озоново-

го слоя и незначительным потенциалом глобального потепления является диоксид углерода [3].

Использование углекислотных сверхкритических циклов рассматривалось еще в 1968 в работе итальянского ученого Ангелино [4]. В работе он оценил эффективность углекислотного цикла Брайтона с регенерацией, прекомпрессией, рекомпрессией, с разделенным расширением, частичным охлаждением, частичным охлаждением и улучшенной регенерацией. Начальные температуры равнялись 500-800°C. Различные углекислотные циклы для производства электроэнергии на ТЭС и АЭС рассматривались и более поздних статьях [5–8].

В литературе также рассмотрены отдельные случаи утилизации низкопотенциального тепла в углекислотных циклах.

В статье [9] углекислотный цикл Ренкина с воздушным конденсатором и регенератором использовался для производства электроэнергии из теплоты конденсации пара. Выхлоп паровой турбины с противодавлением поступал в конденсатор, где отдавал теплоту углекислому газу, конденсируясь при температуре 208°C. Использование углекислотного цикла позволило повысить мощность нетто установки на 10,8% при температуре наружного воздуха - 30°C.

Также углекислотный цикл Ренкина рассматривался в статье [10] для утилизации теплоты уходящих газов ПГУ. Температура уходящих газов варьировалась в диапазоне 100-180°C в зависимости от используемой тепловой схемы. Использование низкопотенциального цикла (НПЦ) в одноконтурной ПГУ позволило повысить КПД нетто на 0,56%.

Углекислотный цикл Брайтона был рассмотрен для утилизации теплоты уходящих газов дизельного газопоршневого генератора [11]. Температура газов составляла 300°C, а в качестве дополнительного источника НПТ была использована вода из охлаждающей рубашки. Использование углекислотного цикла позволило повысить мощность установки на 68,4 кВт или 6,9%.

Таким образом, существует большое количество циклов с использованием углекислого газа. Большинство исследований на данный момент проведено при утилизации теплоты для одного выбранного источника.

В то же время для различных задач стоит учитывать характер горячего источника. В частности, при утилизации НПТ пара в конденсаторе температура горячего источника не меняется, что значительно отличается от утилизации теплоты уходящих газов. Во втором случае источник ПНТ меняет температуру и нагрев рабочей среды в НПЦ оказывается ограничен критериями температурного напора на всем протяжении теплообменного аппарата. Следовательно, существует задача сравнения эффективности использования углекислотных циклов Ренкина и Брайтона для утилизации НПТ источников с постоянной и переменной температурой, решение которой позволит выделить рекомендации по выбору тепловой схемы и параметров утилизационных углекислотных установок.

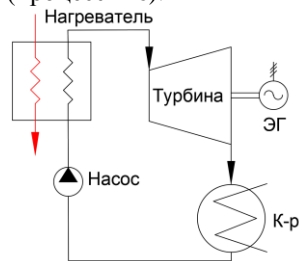
## 2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Критические параметры диоксида углерода составляют  $30,98^{\circ}\text{C}$  и  $7,38\text{ МПа}$ . Таким образом, низкотемпературные циклы с использованием углекислого газа могут представлять собой циклы Ренкина или циклы Брайтона в зависимости от конечного давления и температуры в конденсаторе.

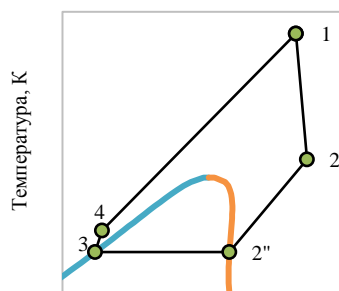
При низких начальных температурах цикла достаточно низкой является и температура рабочего тела на выходе из турбины. Из-за этого при низких температурах на входе в турбину потенциал регенерации внутри цикла за счет передачи теплоты от потока на выходе турбины к потоку на выходе из насоса оказывается незначительным. Это ведет к снижению эффективности использования развитых систем регенерации по сравнению с более простыми циклами при низких начальных параметрах. Кроме того, при небольших мощностях НПЦ увеличение доли регенерации за счет роста количества регенеративных теплообменников, компрессоров и турбин может оказаться экономически невыгодным из-за небольшого прироста эффективности и значительного увеличения капиталоёмкости. Поэтому в рамках данной работы было произведено исследование использования углекислотного цикла Ренкина и Брайтона с и без регенератора.

Тепловая схема энергетической установки, работающей по циклу Ренкина, изображена на рисунке 1. Из-за низких критических параметров циклы будут сверхкритическими (рисунки 1б и 1г). В случае цикла без регенерации рабочее тело в цикле расширяется в турбине (процесс 1-2), затем отработавшая среда попадает в конденсатор, в котором протекают процесс охлаждения (процесс 2-2'') и конденсации (процесс 2''-3). Образовавшийся конденсат направляется в насос на сжатие (процесс 3-4), а затем поступает к источнику теплоты на нагрев (процесс 4-1). Кроме того, в работе рассмотрен цикл с регенерацией, используемой для снижения потерь в холодном источнике (рисунок 1в). В отличие от простейшего цикла, изображенного на рисунке 1а, здесь поток из турбины поступает в регенератор, в котором за счет его охлажде-

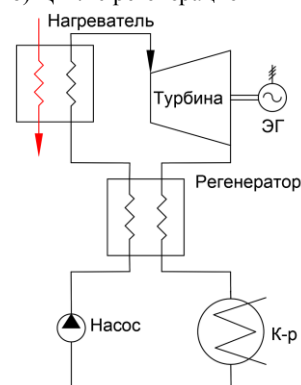
ния (процесс 2-5) осуществляется нагрев потока на после насоса (процесс 4-6).



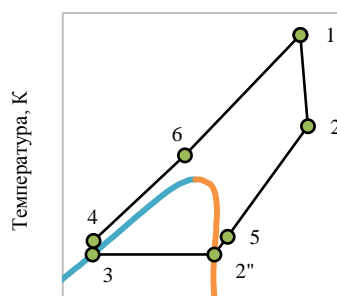
а) Схема без регенерации



б) Цикл с регенерацией



в) Схема с регенерацией



г) Цикл с регенерацией

Рис. 1. Цикл Ренкина без и с регенерацией

Перегрев рабочего тела сверх параметров насыщения снижает риск образования влаги в проточной части турбины. Однако, он также может привести к тому, что рабочая среда на выходе из турбины также может быть перегретой, что приведет к росту среднеинтегральной температуры отвода теплоты и снижению термического КПД цикла.



Цикл Брайтона с использованием углекислого газа показан на рисунке 2. В цикле Брайтона без регенерации диоксид углерода расширяется от точки 1 до точки 2 в турбине, где совершает работу. Далее он охлаждается в охладителе от точки 2 до точки 3, отдавая теплоту охлаждающей воде. После охлаждения рабочее тело поступает в компрессор, где сжимается от точки 3 до точки 4 и далее нагревается до температуры на входе в турбину в точке 1.

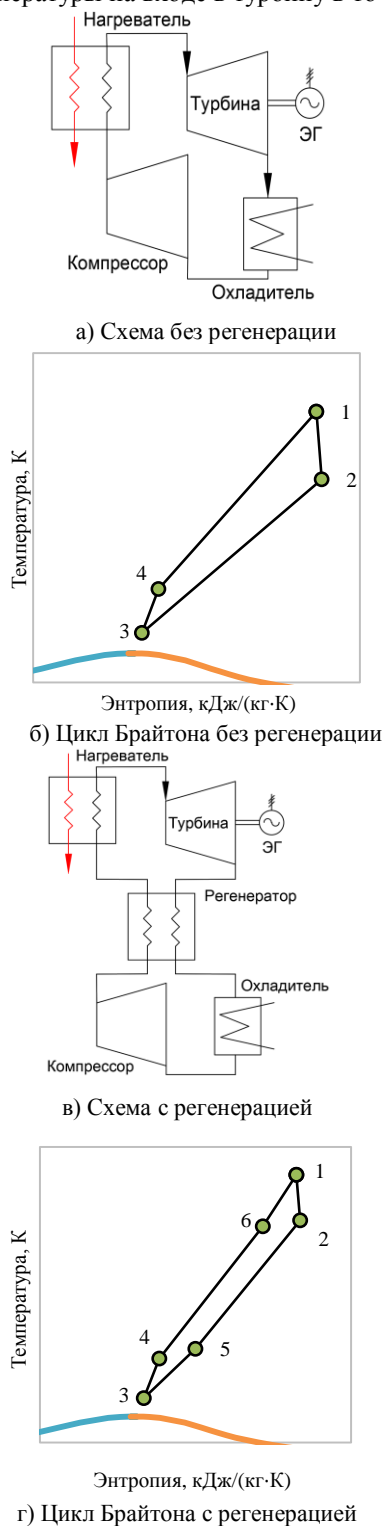


Рис. 2. Цикл Брайтона без и с регенерацией  
Также был рассмотрен цикл с регенерацией, используемой для снижения потерь в холодном ис-

точнике (рисунок 2в). Здесь поток выхлопных газов турбины поступает в регенератор, в котором за счет его охлаждения (процесс 2-5) осуществляется нагрев потока на выхлопе из компрессора (процесс 4-6).

Исходные данные, фиксируемые при всех расчетах рассматриваемых циклов, сведены в таблицу 1 [12,13]. При расчете цикла Брайтона минимальная температура в цикле была принята равной 32°C, так как это значение гарантирует работу в сверхкритической области и рекомендовано в литературе [14]. Минимальное давление было принято равным 7,5 МПа.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Температура рабочего тела на выходе из конденсатора, °С	30
Температура рабочего тела на выходе из охладителя, °С	32
Минимальный недогрев в регенераторе, °С	5
Внутренний относительный КПД насоса/компрессора, %	85
Внутренний относительный КПД турбины, %	85
КПД электрогенераторов и электродвигателей, %	99
Механический КПД, %	99

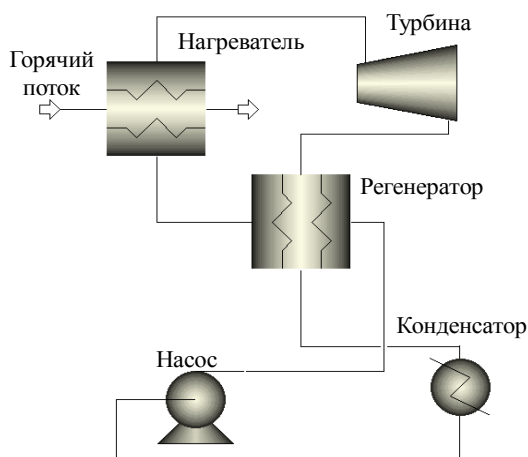
Перечисленные циклы рассматриваются для утилизации теплоты с постоянной (бесконечная теплоемкость) и меняющейся температурой источника. В качестве источника НПТ с переменной температурой рассматривался поток газов, имеющих постоянную теплоемкость.

### 3. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

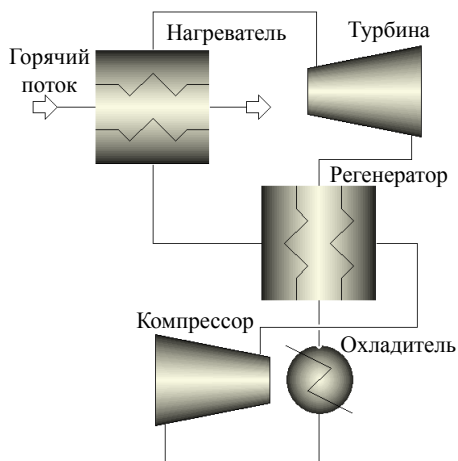
Для разработки всех математических моделей использовался программный пакет Aspen Plus [15]. Для определения теплофизических свойств рабочей среды использовалась база данных NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), которая характеризуется высокой точностью [16]. Математические модели установок с регенерацией представлены на рисунке Рис. 3. Исходные данные для расчета были приняты в соответствии с таблицей 1.

В случае использования НПЦ для утилизации теплоты с постоянным потенциалом (бесконечной теплоемкостью) основным ограничением работы установки является температура источника. Начальная температура утилизационного цикла, в свою очередь, будет меньше, чем температура источника на величину недогрева в нагревателе. Поэтому в качестве основного варьируемого параметра рассматривалась начальная температура на входе в турбину, изменяемая в диапазоне от 50 до 350°C с шагом 50°C. Благодаря постоянной температуре источника критерием оптимизации может служить КПД нетто электрической установки.

В случае с утилизацией НПТ уходящих газов, то есть источника с меняющейся температурой, необходимо учитывать условия теплообмена на всем протяжении нагревателя. Поэтому температура рабочего тела на входе в турбину определялась из условия недогрева на горячем конце нагревателя, равного 20°C. При расчете в случаях, когда минимальный температурный напор в нагревателе оказывался меньше 10°C, расход рабочего тела уменьшался для соблюдения данного условия.



а) Цикл Ренкина



б) Цикл Брайтона

Рис. 3. Математические модели углекислотных циклов в Aspen Plus

В качестве источника греющих газов была выбрана парогазовая установка (таблица 2), поэтому температура уходящих газов на выходе из нагревателя принималась равной минимально возможной с учетом низкотемпературной коррозии, равной 80°C. Для анализа были выбраны три температуры уходящих газов, которые позволяют иметь представление об эффективности рассматриваемых циклов в диапазоне, характерном для уходящих газов ПГУ и двигателей внутреннего сгорания. Так как в общем случае в зависимости от тепловой схемы температура уходящих газов может отличаться, наиболее правильным стоит считать оптимизацию с целью достижения максимальной мощности утилизационного цикла. В данном случае так

как температура уходящих газов фиксировалась возможно производить сравнение по критерию КПД нетто.

При расчете цикла Ренкина основным варьируемым параметром для оптимизации являлось начальное давление с шагом 0,1 МПа. В случае с циклом Брайтона конденсация отсутствует, поэтому помимо начального давления происходила оптимизация конечного давления турбины с шагом 0,5 МПа.

Таблица 2. Параметры греющих газов

Параметр	Значение
Давление, МПа	0,1
Температура потока, °С	152, 184, 226
Расход уходящих газов, кг/с	100
Состав уходящих газов, мол. %:	
N <sub>2</sub>	77,98
O <sub>2</sub>	12,26
CO <sub>2</sub>	3,05
Ar	0,66
H <sub>2</sub> O	6,05

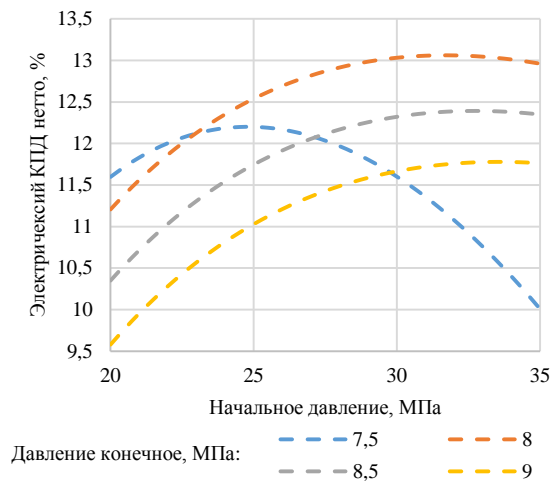
## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ДИСКУССИЯ

### 4.1. Утилизация теплоты с постоянной температурой

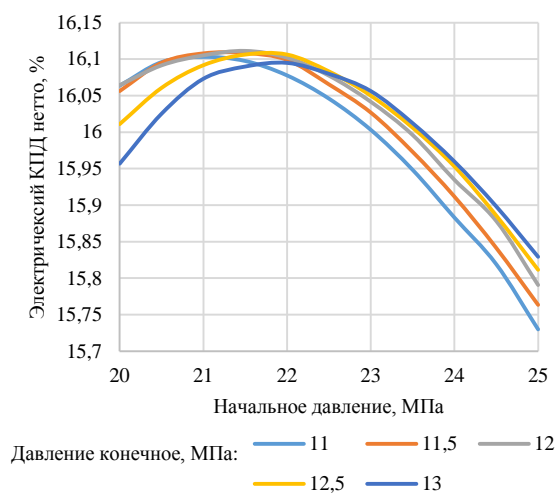
Сначала были проведены расчеты эффективности циклов Брайтона и Ренкина при различных начальных температурах цикла. В случае цикла Ренкина для каждой начальной температуры была проведена оптимизация начального давления, а при использовании цикла Брайтона также конечного давления турбины. В качестве примера на рисунке 4 приведены зависимости КПД нетто цикла Брайтона в зависимости от начального и конечного давления при начальной температуре 200°C.

Обобщение результатов расчетов установок при различных начальных температурах приведено на рисунке 5. При рассмотрении циклов без использования регенерации цикл Ренкина позволяет иметь большую эффективность во всем диапазоне рассматриваемых температур, что объясняется большими затратами энергии в компрессоре по сравнению с затратами в насосе.

КПД нетто циклов Брайтона и Ренкина с регенерацией оказывается достаточно близким. Однако при начальных температурах меньше 230°C большую эффективность демонстрирует цикл Ренкина. При переходе к более высоким начальным температурам больший КПД нетто имеет цикл Брайтона с регенератором. Это вызвано увеличением доли регенерации в цикле при росте начальной температуры. За счет использования газового рабочего тела получается добиться большей степени регенерации в цикле Брайтона, что приводит к более значительному росту эффективности данного цикла, чем в случае с циклом Ренкина.



а) Цикл без регенерации



б) Цикл с регенерацией

Рис. 4. Электрический КПД нетто цикла Брайтона при начальной температуре 200°C в зависимости от давлений

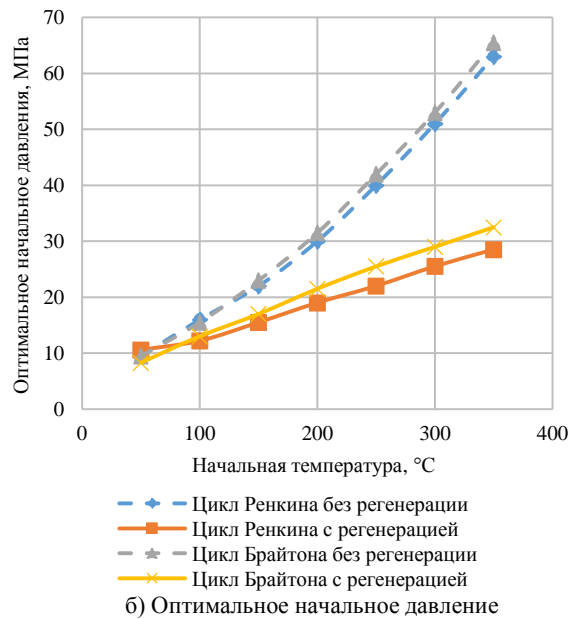
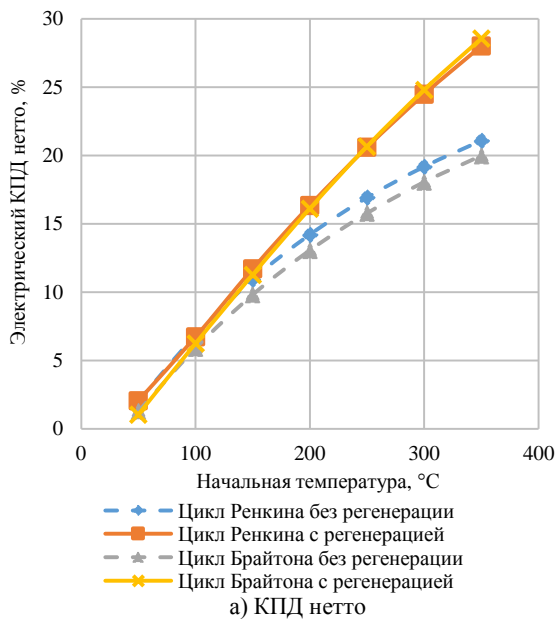


Рис. 5. Параметры углекислотных циклов при различных начальных температурах

Оптимальное начальное давление цикла Ренкина несколько меньше, чем у цикла Брайтона. При переходе к циклу с регенерацией в обоих случаях оптимальное начальное давление оказывается меньше, причем при начальной температуре 350°C в 2 раза. Это вызвано с увеличением значения регенерации в цикле при росте начальной температуры. При использовании регенерации понижение начального давления позволяет увеличить температуру на выходе из турбины и увеличить долю регенерации в цикле, что повышает эффективность. Таким образом, использование регенерации снижает величину оптимального начального давления и при росте начальной температуры цикла этот эффект возрастает.

#### 4.2. Утилизация теплоты с переменной температурой

В процессе расчета параметров углекислотных низкпотенциальных циклов для утилизации НПТ потока газов также происходила оптимизация параметров установки. В качестве примера на рисунке б показана зависимость КПД нетто углекислотного цикла Ренкина от начального давления, температуры горячего потока и использования регенерации. При низких параметрах греющего потока большую эффективность показывает цикл с регенерацией. Однако, при переходе к греющему потоку с температурой 226°C цикл без регенерации позволяет получить большую мощность. При росте температуры греющего потока увеличение КПД нетто происходит неравномерно. Для цикла с регенерацией КПД нетто находится при всех температурах греющего потока в достаточно узком диапазоне, в то время как без регенерации КПД нетто значительно растет. Данный эффект объясняется критериями теплообмена в нагревателе. Из-за низких критических параметров углекислого газа насос работает в зоне низких плотностей, что приводит к значительному повышению температуры

на выходе. При использовании регенерации поток рабочего тела подогревается дополнительно, что приводит к значительным температурам углекислого газа на входе в нагреватель. Из-за этого происходит перераспределение минимальных недогревов в нагревателе и снижение температуры на входе в турбину.

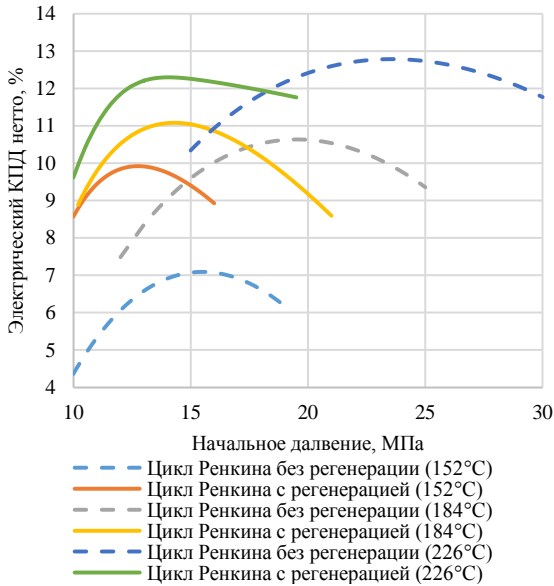


Рис. 6. КПД нетто углекислотного цикла Ренкина в зависимости от начального давления

Основные результаты расчетов установок при различном горячем потоке приведены на рисунке 7. Как было отмечено ранее, в случае с циклом Ренкина при низких параметрах греющего потока большей эффективностью обладает установка с регенератором, но при дальнейшем росте параметров больший КПД нетто имеет цикл без регенерации. Такое же распределение наблюдается при использовании цикла Брайтона.

При температуре греющего потока 152°C наиболее эффективными являются циклы Ренкина и Брайтона с регенерацией. При переходе к греющему потоку с температурой 184°C наиболее эффективным является цикл Брайтона с регенерацией, а потока с температурой 226°C – цикл Брайтона без регенерации.

Данное распределение объясняется, как и в случае с циклом Ренкина, использованием регенерации при необходимости поддержания разницы температур между горячим и холодным потоками газов в нагревателе. Это подтверждается и ограничением оптимального давления при повышении температуры греющего потока (рисунок 7б). При повышении начального давления и температуры горячего потока происходит рост температуры на входе в нагреватель в цикле с регенерацией, что приводит к перераспределению недогревов в данном теплообменном аппарате и снижению температуры на входе в турбину. При этом будет увеличиваться расход рабочей среды.

Таким образом, при низких параметрах горячего источника цикл Ренкина с регенерацией может быть более эффективен чем цикл Брайтона. Однако реализация цикла Ренкина в реальных условиях

затруднена из-за низких критических параметров. Из-за нахождения вблизи критической точки конденсатор должен работать при достаточно постоянных температурах, иначе удельный объем углекислого газа на входе в насос будет значительно меняться, что может сильно снизить характеристики данной объемной машины. Поэтому для работы углекислотного цикла Ренкина необходимо иметь источник холода с достаточно низкой температурой (5-15°C), что может быть недостижимым во многих случаях на протяжении всего года.

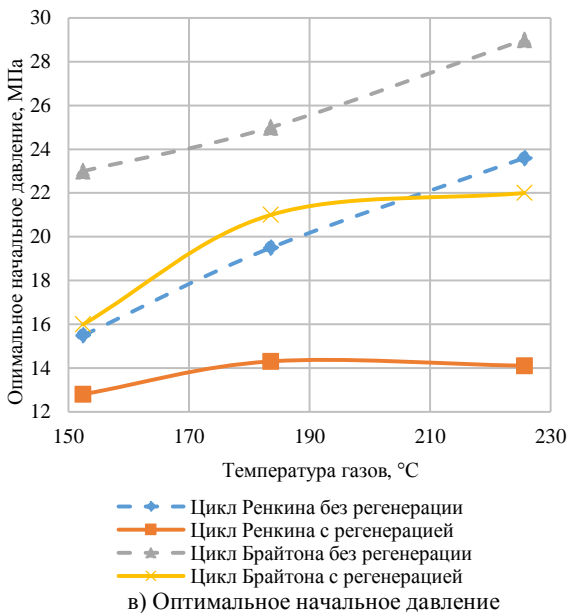
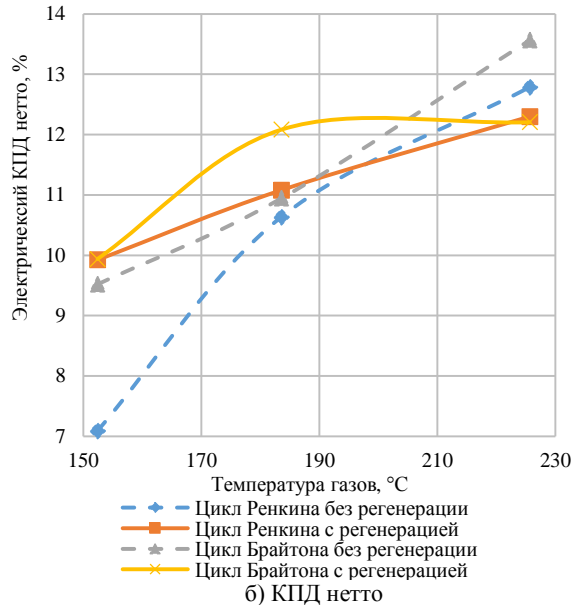


Рис. 7. Параметры углекислотных циклов при различных температурах греющего потока

С другой стороны, цикл Брайтона имеет большую эффективность в широком диапазоне начальных температур и менее зависим от температуры холодного источника за счет работы без конденсации.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были разработаны математические модели энергетических установок, работающих по углекислотным циклам Ренкина и Брайтона: простейшего и с регенерацией.

По результатам расчетов было установлено, что при фиксированной температуре подвода теплоты в цикл для температуры рабочей среды на входе в турбину ниже 230°C наибольший КПД нетто достигается при использовании углекислотного цикла Ренкина с регенерацией: 2-16,3% при начальной температуре 50-200°C и начальном давлении 10,6-19 МПа. При повышении начальной температуры цикла наибольший КПД нетто достигается при использовании углекислотного цикла Брайтона с регенерацией: 20,7-28,6% при начальных температурах и давлениях 250-350°C и 25,5-32,5 МПа соответственно. Таким образом, циклы с регенерацией имеют большую эффективность и меньшее начальное давление.

Кроме того, выявлено, что при утилизации теплоты потока газов с температурой 152°C наибольший КПД нетто достигается при использовании углекислотных циклов Ренкина и Брайтона с регенерацией и составляет 9,9%. При чем цикл Ренкина имеет оптимальное начальное давление, равное 16 МПа, а цикл Брайтона – 12,8 МПа. В свою очередь, при повышении температуры греющего потока до 184°C наиболее эффективным оказывается углекислотный цикл Брайтона с регенерацией с КПД нетто, равным 12,1%, и оптимальным начальным давлением, равным 21 МПа. При повышении температуры греющего потока до 226°C наибольший КПД нетто, равный 13,6%, достигается при использовании углекислотного цикла Брайтона без регенерации с начальным давлением 29 МПа.

Таким образом, оба цикла имеют схожие эффективности в рассматриваемом диапазоне температур. Однако использование цикла Ренкина предполагает необходимость протекания конденсации углекислого газа, что возможно лишь при относительно невысоких температурах окружающей среды, для которых не свойственно значительное колебание в течение всего года (5-15°C). В противном случае возрастает опасность резкого изменения теплофизических свойств (прежде всего, удельного объема) рабочего тела в насосе из-за начала протекания процесса сжатия вблизи критической точки. В свою очередь, для цикла Брайтона за счет работы в сверхкритической области данная проблема не стоит.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в НИУ “МЭИ” при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КПД – коэффициент полезного действия

НПТ – низкопотенциальная теплота  
НПЦ – низкопотенциальный цикл  
ОЦР — органический цикл Ренкина  
ПГУ — парогазовая установка

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sadykov R.A.** et al. Use of a turboexpander in steam power units for heat energy recovery in heat supply systems // *Thermal Engineering*. 2016. Vol. 63, № 5. P. 360–366.
2. **Alekseenko S.V., Ogurechnikov L.A.** Concerning utilization of heat from low-potential sources // *Thermal Science*. 2019. Vol. 23, № 6 Part B. P. 4023–4030.
3. **Kindra V.** et al. Thermodynamic Optimization of Low-Temperature Cycles for the Power Industry // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 9. P. 2979.
4. **Angelino G.** Carbon Dioxide Condensation Cycles For Power Production // *Journal of Engineering for Power*. 1968. Vol. 90, № 3. P. 287–295.
5. **Kulhanek M., Dostal V.** Supercritical carbon dioxide cycles thermodynamic analysis and comparison // *Supercritical CO<sub>2</sub> power cycle symposium*. 2011. P. 24–25.
6. **Рогалев А.** и др. Термодинамические циклы на сверхкритическом диоксиде углерода для ТЭС и АЭС // *Новое в российской электроэнергетике*. 2021. № 1. С. 6–19.
7. **Рогалев А.Н.** и др. Исследование тепловых схем углекислотных энергоблоков с пылеугольными котельными агрегатами // *Новое в российской электроэнергетике*. 2021. № 11. С. 22–31.
8. **Суровцев И., Арбеков А.** Применение сверхкритических углекислотных циклов в установках по утилизации промышленной теплоты // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2013. № 02. С. 335–346.
9. **Rogalev N.** et al. Comparative Analysis of Low-Grade Heat Utilization Methods for Thermal Power Plants with Back-Pressure Steam Turbines // *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 14, № 24. P. 8519.
10. **Киндра В.О.** и др. Тринарные энергетические циклы для высокоэффективного производства электроэнергии из ископаемого топлива // *Новое в российской электроэнергетике*. 2022. № 4. С. 7–25.
11. **Song J.** Performance improvement of a preheating supercritical CO<sub>2</sub> (S-CO<sub>2</sub>) cycle based system for engine waste heat recovery // *Energy Conversion and Management*. 2018. P. 9.
12. **Ryms M., Pyś T., Klugmann-Radziemska E.** Adapting the pinch point analysis to improve the ORC design process: Adapting and using pinch point analysis // *Int. J. Energy Res.* 2014. Vol. 38, № 1. P. 29–40.
13. **Dai Y., Wang J., Gao L.** Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery // *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50, № 3. P. 576–582.
14. **Dostal V., Driscoll M.J., Hejzlar P.** A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors. Massachusetts, USA: MIT Center for Advanced Nuclear Energy Systems (CANES), 2004. 307 p.
15. **Aspen Technology Inc.** Aspen Plus [Electronic resource]: USA. 2013. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> (accessed: 19.07.2021).
16. **Lemmon E.W.** et al. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology. 2018.



Н.А. Татарникова, Р.Н. Такташев, А.Б. Ондар, М.Ю. Горин, И.И. Хрушков

ОАО «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС С БАШЕННЫМИ ИСПАРИТЕЛЬНЫМИ ГРАДИРНЯМИ

### АННОТАЦИЯ

В последние годы вследствие повышения стоимости на различные энергоресурсы, значительное внимание к себе привлекает проблема их эффективного использования. Хорошо известно, что вода имеет исключительное значение и широкое применение на промышленных объектах и электростанциях. Она в большом объеме используется для охлаждения различных агрегатов в производственных системах охлаждения практически на любом производстве, будь то изготовление полиэтиленовой плёнки, заковка стальных деталей, производство тепловой и электрической энергии и т.д. Поддержание уровня охлаждения воды на уровне не ниже проектного является важной задачей эксплуатирующей организации и влияет на экономичность работы оборудования. Поэтому, к расчету и подбору элементов охлаждающего устройства стоит уделять повышенное внимание на этапе проектирования.

### 1. ПРОБЛЕМА НЕДООХЛАЖДЕНИЯ ТЭС С БИГ

Срок службы большинства тепловых электрических станций, работающих в настоящее время в РФ, превышает нормативный (30-35 лет). Отсутствие реконструкций и модернизаций систем оборотного водоснабжения привело, к тому, что в последнее время на электростанциях РФ участились случаи снижения охлаждающей способности БИГ различной площадью орошения, проектируемых на перепад температур 10 °С. При этом снижение охлаждающей способности БИГ составляет величину до 6 °С.

В то же время температура охлажденной воды, подаваемой в конденсаторы паровых турбин, влияет на выработку электроэнергии через взаимосвязь с давлением в паровом пространстве. Так, снижение давления пара в конденсаторе энергоблока Т-100 на 1 кПа приводит к повышению мощности паровой турбины на 0,725 МВт при том же расходе топлива.

Стоит отметить, что на эффективность работы оборотных систем существенное влияние оказывает состояние циркуляционных насосов, которые, как правило, имеют рабочую точку, отличающуюся от заводской.

Суммарный эффект от повышения эффективности работы градирен и циркуляционных насосов может достигать величины до 1,0 МВт, т.е. 1% от ном-

инальной мощности энергоблока Т-100. Вследствие чего можно констатировать, что повышение эффективности работы оборудования оборотных систем охлаждения играет важную роль в повышении экономичности ТЭС.

### 2. ПСО С БИГ

Для ТЭС важно, чтобы система охлаждения обеспечивала требуемый перепад температур для поддержания в паровом пространстве конденсатора необходимый уровень давления.

В ПСО ТЭС в качестве применяемого охладителя наибольшее распространение получили башенные испарительные градирни (БИГ). Широкое применение БИГ в энергетике обусловлено высокой эффективностью процессов теплообмена, протекающих при непосредственном контакте охлаждаемой оборотной воды и атмосферного воздуха, а также возможностью использования одного и того же объема воды многократно с учетом подпитки на восполнение потерь, сопутствующих охлаждающим устройствам.

Требуемое для охлаждения воды количество воздуха обеспечивается естественной тягой, создаваемой за счет высоты вытяжной башни и разности плотностей воздуха, находящегося внутри и снаружи башни градирни. Она называется также градирней с естественной тягой.

Благодаря своей эффективности, экономичности, простоте обслуживания башенные градирни используются на большинстве крупных промышленных предприятий, где требуется охлаждение больших объемов воды в оборотных системах.

Для охлаждения воды, поступающей из конденсаторов турбинных установок и вспомогательного оборудования энергоблоков, используется как тепло-, так и массообмен. Горячая вода разбрызгивается над оросителем, благодаря которому увеличивается площадь поверхности теплообмена, и, стекая по нему, отдает теплоту потоку воздуха. При этом имеет место испарение воды, и относительная влажность воздуха на выходе из градирни приближается к 100 %. Теплота, как скрытая, так и явная, изымается из потока воды, приводя к снижению ее температуры (испарение 1 % воды снижает ее температуру на 6 °С).

### 3. АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Ороситель — важнейший технологический элемент охлаждающего устройства градирни, увеличивающий площадь поверхности контакта для теплообмена между водой и воздухом, что повышает эффективность теплообмена.

На рынке представлены оросители различных конструкций, изготавливаемых из различных материалов (ПВХ, ПЭ, ПП, асбестоцемент и др.), имеющие различные массогабаритные размеры и, главное, различные коэффициенты аэродинамического сопротивления и тепловой эффективности, которые определяются экспериментальным путем для каждого вида оросителя. Исторически в России такие испытания проводились двумя организациями — ФГУП НИИ «ВОДГЕО» и ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (в настоящее время только ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»).

Стоит отметить, что в [1] представлена методика расчета охлаждения воды в вентиляторных градирнях, в которых подача воздуха осуществляются вентиляторами. Однако методики расчета охлаждения воды в БИГ в [1] не представлено. В общем виде расчет представлен в [2].

В ОАО «ВТИ» уточнена методика расчета охлаждения воды в БИГ.

Известно, что охлаждающая способность градирни напрямую зависит от аэродинамического сопротивления (АС) градирни, которое может быть представлено как сумма сопротивлений ее отдельных элементов [3]:

$$Z' = (\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n) \cdot \frac{\gamma \cdot \omega^2}{2 \cdot g}, \quad (1)$$

где  $Z'$  — общее аэродинамическое сопротивление градирни, мм вод.ст (кг/м<sup>2</sup>);  $\zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n$  — коэффициенты сопротивлений элементов градирни по пути движения воздуха в ней;  $\omega$  — средняя скорость движения воздуха в свободном сечении оросителя, м/с;  $\gamma$  — плотность входящего в градирню воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Выражение, стоящее в скобках, представляет собой общий коэффициент сопротивления башенной градирни, то есть

$$\zeta_{\text{общ}} = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{ор}} \cdot h + \zeta_{\text{вр}} + \zeta_{\text{ву}} + \zeta_{\text{д}}, \quad (2)$$

где  $\zeta_{\text{вх}}$  — коэффициент сопротивления воздухоходных окон;  $\zeta_{\text{ор}}$  — коэффициент сопротивления оросителя;  $h$  — высота оросителя, м;  $\zeta_{\text{вр}}$  — коэффициент сопротивления водораспределительной системы;  $\zeta_{\text{ву}}$  — коэффициент сопротивления водоуловителя;  $\zeta_{\text{д}}$  — коэффициент сопротивления дождя.

Коэффициенты АС:

- сухого оросителя:

$$\zeta_{\text{ор}} = \zeta_{\text{со}} + K_{\text{ор}} \cdot q_{\text{ж}}, \quad (3)$$

где  $\zeta_{\text{со}}$  — коэффициент сопротивления сухого оросителя (из вспомогательных данных);  $K_{\text{ор}}$  — коэффициент сопротивления дождя оросителя, принима-

емый в соответствии с данными, приведенными в [1];  $q_{\text{ж}}$  — плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч);

- воздухоходных окон:

$$\zeta_{\text{вх}} = 6784 \cdot e^{-21,7 \cdot \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{ор}}}}, \quad (4)$$

где  $F_{\text{вх}}$  — площадь воздухоходных окон, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{ор}}$  — площадь орошения, м<sup>2</sup>.

- водораспределителя:

$$\zeta_{\text{вр}} = 0,4; \quad (5)$$

- водоуловителя:

$$\zeta_{\text{ву}} = \frac{\Delta P \cdot 2 \cdot g}{\gamma \cdot \omega^2}; \quad (6)$$

где  $\Delta P$  — разность давлений воздуха до и после водоуловителя, кгс/м<sup>2</sup>

- дождя под оросителем:

$$\zeta_{\text{д}} = q_{\text{ж}} \cdot (0,2 \cdot l + K_{\text{ор}} \cdot h_{\text{ор}}) \cdot \Pi, \quad (7)$$

где 0,2 — коэффициент сопротивления дождя под оросителем, отнесенный к скорости воздуха в свободном горизонтальном сечении градирни;  $l$  — половина длины воздухоуловителя;  $K_{\text{ор}}$  — коэффициент сопротивления дождя оросителя, принимаемый в соответствии с данными, приведенными в [1];  $h_{\text{ор}}$  — высота оросителя, м;  $\Pi$  — коэффициент размерности для перехода к безразмерному значению  $\zeta_{\text{д}}$ , при принятых в данном случае единицах измерения, равный 1 ч/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{ж}}$  — плотность орошения, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Плотность орошения, в свою очередь, рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{ж}}}{F_{\text{ор}}}, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}. \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса градирни:

$$Q = G_{\text{возд}} \cdot (h_2 - h_1) = \frac{G_{\text{ж}} \cdot C_{\text{ж}} \cdot (t_1 - t_2)}{K}, \quad (9)$$

где  $G_{\text{возд}}$  — расход воздуха, поступающий в градирню,  $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ ;  $h_1, h_2$  — энтальпия воздуха на входе в градирню и на выходе из неё,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ;  $G_{\text{ж}}$  — гидравлическая нагрузка градирни,  $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ ;  $t_1, t_2$  — температура нагретой и охлажденной воды соответственно, °С;  $K$  — переводной коэффициент, который является функцией от температуры воды на выходе из градирни  $t_2$ .

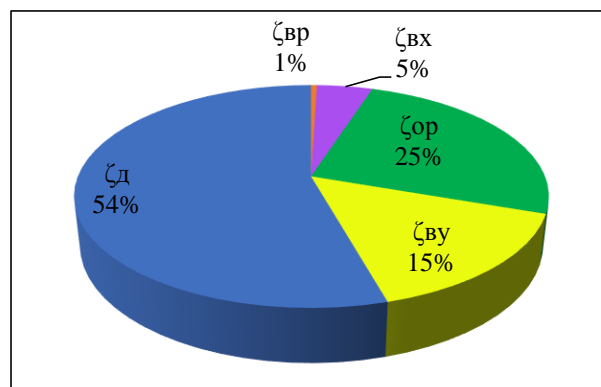


Рис. 1. Распределение коэффициентов АС отдельных элементов градирни в процентах:  $\zeta_{вр}$  – коэффициент сопротивления водораспределителя;  $\zeta_{вх}$  – коэффициент сопротивления воздухоходных окон;  $\zeta_{ор}$  – коэффициент сопротивления оросителя;  $\zeta_{ву}$  – коэффициент сопротивления водоуловителя;  $\zeta_{д}$  – коэффициент сопротивления дождя под оросителем.

Сопротивление оросителя и дождя под ним, в свою очередь, составляют около 70 % общего АС башенных испарительных градирен.

Кроме того, именно в объеме оросителя происходит наибольший контакт между водой и воздухом, и, соответственно, максимальный теплосъем.

Исходя из формул 1-9, взятых из методики расчета градирни, разработанной в ВТИ, можно сделать вывод, что, чем выше АС оросителя, тем меньший расход воздуха проходит через градирню при прочих равных условиях. Однако, чем выше коэффициент АС оросителя, тем выше эффективность теплообмена (рисунок 2). Таким образом, существует оптимальное значение коэффициента АС градирни. Следовательно, эффективность охлаждения напрямую зависит от исправности состояния оросителя.

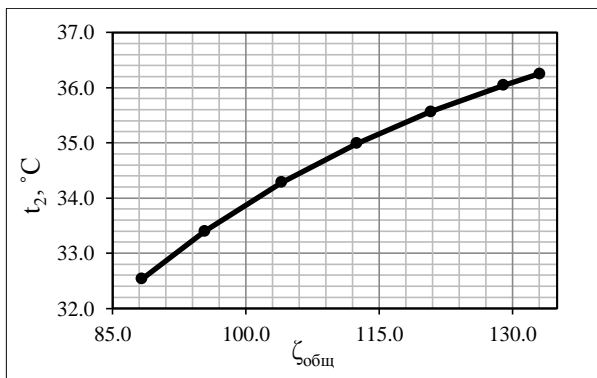


Рис. 2. Зависимость температуры воды на выходе из градирни  $t_2$  от общего коэффициента аэродинамического сопротивления  $\zeta_{общ}$ .

В процессе эксплуатации градирни ороситель должен содержаться в исправном состоянии, так как

является главным конструктивным элементом аппарата. Тепло и массообменные свойства оросителя, наряду с аэродинамическими определяют, в основном, эффективность градирни, т.е. влияют на выбор необходимого размера новой градирни или оценку возможностей теплосъема существующей градирни. При наличии в охлажденной воде примесей, на оросителе могут образовываться отложения при упаривании воды. Результатом становится уменьшение полезной площади орошения охлаждаемой воды башенной градирни вплоть до 30 %. Кроме того, оросительные устройства из полиэтилена низкого давления (плотности) разрушаются под действием ультрафиолета и низких температур. Всё это приводит к увеличению его коэффициента аэродинамического сопротивления, а, следовательно, к увеличению АС всей градирни, что приводит к снижению расхода поступающего воздуха, а в следствие, и к ухудшению охлаждающей способности БИГ.

Как было сказано выше, существует оптимальное значение коэффициента АС градирни, при котором теплообмен будет наиболее эффективен. А значит и существует оптимальная высота оросителя. Для определения этих значений необходимо произвести тепловой и аэродинамический расчеты градирни. Графическая зависимость, построенная на основании полученных значений для разных гидравлических нагрузок  $G_ж$  для градирни БГ-10000, оборудованном чистым оросителем БЭВ-200, представлена на рисунке 3.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Из графика видно, что существует такое оптимальное значение высоты оросителя, а, следовательно, и общего коэффициента АС градирни, при котором глубина охлаждения будет максимальной.

На рисунке 3 результаты расчета охлаждающей способности БИГ марки БГ-10 000 при различных гидравлических нагрузках с плотностью орошения от  $6,84 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  до  $11,88 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Видно, что с повышением гидравлической нагрузки охлаждающая

Таблица 1. Исходные данные для проведения тепло расчета градирни БГ-10000

Исходные данные	
Расход воды $G_ж, 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$	72; 80; 90; 100; 110; 120; 125
Температура воды на входе в градирню $t_1, ^\circ\text{C}$	40
Глубина охлаждения $\Delta t, ^\circ\text{C}$	14,2
Температура воды на выходе из градирни $t_2, ^\circ\text{C}$	25,8
Относительная влажность на входе в градирню $\varphi_1, \%$	43
Относительная влажность на выходе из градирни $\varphi_2, \%$	100
Температура воздуха на входе в градирню $\theta_1, ^\circ\text{C}$	25,1
Барометрическое давление $P_б, \text{Па}$	101325
<i>Параметры оросителя</i>	



Продолжение таблицы 1

Тип оросителя - ороситель БЭВ-200 (капельно-пленочный)	
Высота оросителя $h_{ор}$ , м	1
Коэффициент сопротивления сухого оросителя $\zeta_{с.о}$	15,6
Коэффициент $K_{ор}$	0,792
A	1,254
m	0,39

способность БИГ падает в связи с увеличением АС дождя, создаваемого оросителем. Плотность орошения в эксплуатационных условиях обычно находится в интервале  $7,0 - 8,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , в данном случае рас-

четы при расходах воды выше  $90\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$  проведены для иллюстрации изменения охлаждающей способности в зависимости от гидравлической нагрузки БИГ.

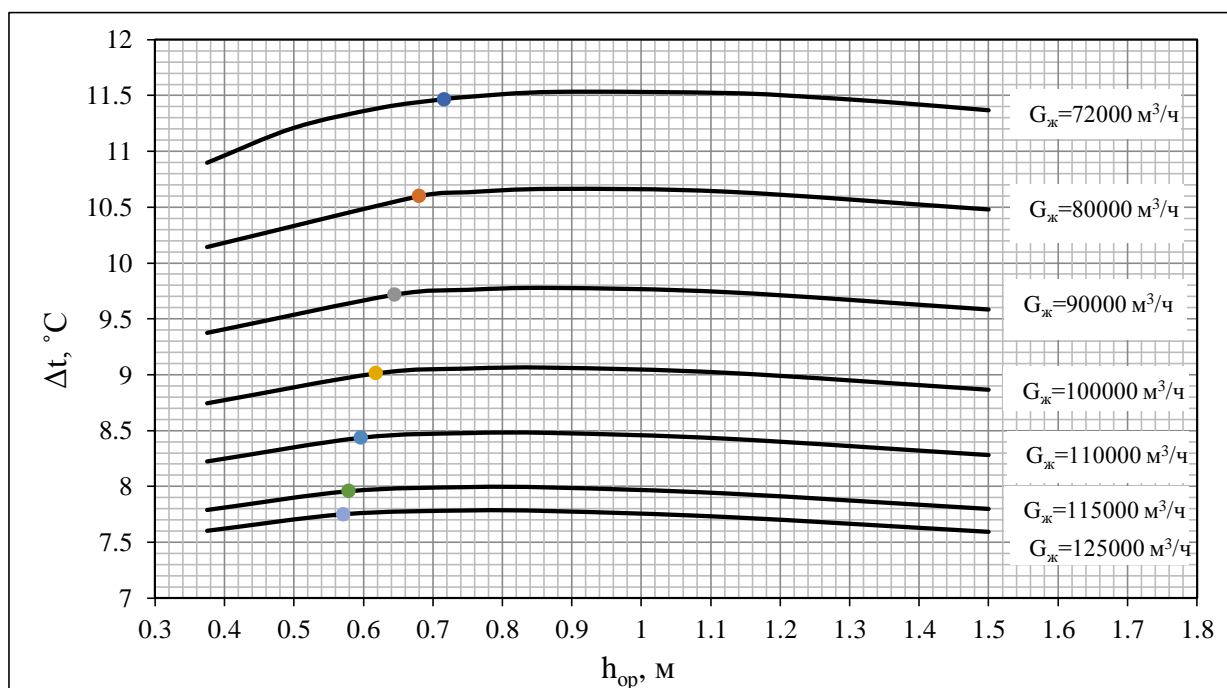


Рис. 3. Зависимость глубины охлаждения  $\Delta t$  от высоты оросителя  $h_{ор}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении работы:

- разработана методика расчета охлаждающей способности БИГ при различных метеорологических факторах;
- в соответствии с разработанной методикой проведены расчеты температуры охлажденной воды;
- определена доля оросителя марки БЭВ-200 в общем АС БИГ БГ-10000;
- определена необходимость подбора оросителя с учетом увеличения АС БИГ из-за наличия эксплуатационных отложений.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭС — тепловая электростанция;  
 БИГ — башенная испарительная градирня;  
 ПСО — производственная система охлаждения;  
 ПВХ — поливинилхлорид;  
 ПЭ — полиэтилен;

ПП — полипропилен;  
 ФГУП НИИ «ВОДГЕО» — сокращенное наименование научно-исследовательского института водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инженерной гидрологии;  
 ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» — Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е.Веденеева.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пособие** по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84 „Водоснабжение. Наружные сети и сооружения”)/ВНИИ ВОДГЕО Госстроя СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989 — 190 с.
2. **Пономаренко В.С., Арфьев Ю.И.** Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справочное пособие/ Под общ. Ред. В. С. Пономаренко. — М.: Энергоатомиздат. 1998. — 376 с.
3. **Арфьев Ю.И., Пономаренко В.С.** Аэродинамический расчет башенных градирен при реконструкции. — Москва: ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО, 2000. — 7 с.





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

**ТРУДЫ**  
*одиннадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 2

*Энергосбережение  
при транспортировке энергии*

*А.С. Демиденко<sup>1</sup>, Г.В. Шведов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ЗИМНИЕ И ЛЕТНИЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ РАБОЧИХ И ВЫХОДНЫХ ДНЕЙ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье обобщены типовые суточные графики на вводе многоквартирных жилых домов с электроплитами из различных литературных источников. По результатам измерений получены современные графики нагрузки на вводе в дома для различных дней недели зимы и лета. Выполнено сопоставление актуализированных графиков нагрузки как между собой, так и с графиками из научно-технической литературы. Получено, что конфигурация современных графиков нагрузки жилых зданий значительно отличается от приведенных в литературных источниках.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Вопросы исследования и расчёта электрических нагрузок зданий в условиях глобализации приобретают особую значимость в связи с тем, что наблюдается урбанизация, которая приводит к принципиальным изменениям в структуре занятости и образе жизни людей, изменяющим график электропотребления.

С одной стороны, масштабы использования электроэнергии в секторе домохозяйств возрастают из-за увеличения численности населения, роста доходов жителей и требований к комфорту. С другой – энергосбережение, принимаемые меры к повышению качества новых жилых объектов строительства, а также рост жизненного уровня населения, так как у людей появляется возможность покупать новые, более энергоэффективные приборы и проводить больше времени вне дома, что ведёт к уменьшению энергопотребления одним домохозяйством [1].

В современных условиях, когда разница между фактическими и расчетными значениями электрической нагрузки увеличивается ввиду того, что нормативные значения [2,3] устарели, используемые электроприборы становятся более эффективными, актуальной задачей является корректировка нормативных документов с пересмотром с периодичностью не более 10 лет для своевременного снижения затрат при строительстве и эксплуатации электрических сетей [4].

Недавние измерения графиков нагрузки в жилых помещениях с использованием интеллектуальных счетчиков показали, что конфигурацию нагрузки в жилых помещениях нелегко предсказать и смоделировать, поскольку люди используют устройства с

электропитанием в разное время в зависимости от своего индивидуального графика и образа жизни [5]. Будущие модели графиков нагрузки на жилые дома можно использовать для исследования и облегчения эксплуатации «умных домов» с нейтральным энергопотреблением или для снижения их потребления электроэнергии и/или счетов за электроэнергию за счет управления спросом и переключения нагрузки.

Так для решения задач прикладного характера, например, технико-экономического обоснования выбора электрооборудования, определяющие показатели нормируются и могут задаваться в виде типовых графиков [6]. Конфигурация суточного графика нагрузки изменяется от воздействия определенных факторов.

### **2. ТИПОВЫЕ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗОК**

#### **2.1. Факторы, влияющие на электропотребление**

Выделяют две основные группы факторов, влияющих на электропотребление: базовые и случайные. Базовыми факторами называются те, которые в какой-то мере поддаются прогнозированию на перспективу, а случайными – те, которые не поддаются прогнозированию на перспективу. К базовым факторам относят структуру нагрузки, время года, географическую широту местности, день недели. В данной работе будет проанализировано влияние на режимы электропотребления таких базовых факторов, как время года и день недели. Рассматриваемая структура нагрузки – бытовой сектор.

Суточным графиком электрической нагрузки отражается процесс изменения электрической нагрузки во времени. График нагрузки представляет собой плавную кривую или ломаную линию, построенную в прямоугольных осях координат: по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат – ток или мощность: активную, реактивную или полную.

Отмечают, что вечерний максимум зимнего суточного графика нагрузки значительно более утреннего при обладании в системе бытовой нагрузки.

## 2.2. Типовой график с получасовым осреднением

В справочнике [7] приведен суточный график нагрузки жилого дома с электроплитами (рис.1), на котором уже разделены рабочий и выходной дни.

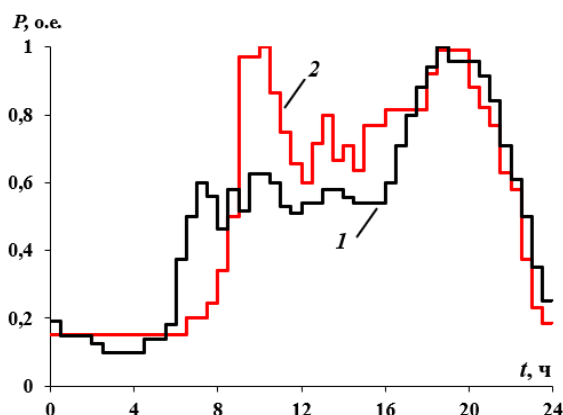


Рис. 1. Суточный график нагрузки жилого здания с электроплитами из [7] (1 – график рабочего дня; 2 – график выходного дня).

На рисунке 2 приведен график из [8], где уже для выходных дней построены отдельно графики субботы и воскресенья.

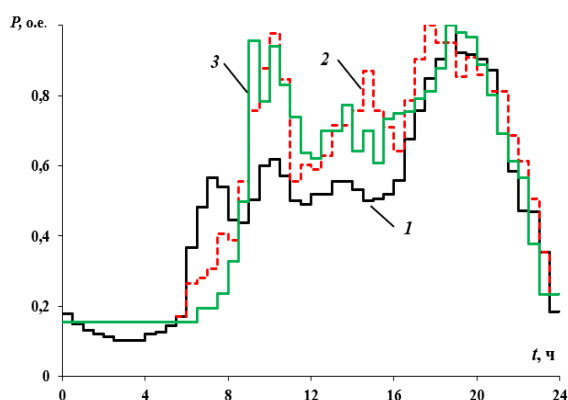


Рис. 2. Усредненные суточные графики нагрузки на вводе в 108-квартирный дом с электрическими плитами, [8] (1 – график рабочего дня; 2 – график субботы; 3 – график воскресенья).

Осреднение графиков, представленных на рисунках 1 и 2, составляет 30 минут.

## 2.3. Типовой график с часовым осреднением

В научно-технической литературе, например [6], приведены типовые графики и их основные показатели для групп потребителей городских электрических сетей, таких как многоквартирные жилые дома с газовыми и электрическими плитами, столовые, универмаги, полученные в 70–80-е годы.

В [6] отмечается, для квартир с электроплитами (рис. 3) характер нагрузки несколько отличается для рабочего и воскресного дня. Утренний максимум нагрузки в рабочий день составляет 60–65% вечернего максимума. В выходной день отмечается дневной и вечерний максимум нагрузки. Летний график нагрузки не приведен в рассматриваемом литературном источнике, однако отмечено, что коэффициент заполнения зимнего графика составляет 0,55, а летнего – 0,45 для домов с электрическими плитами [6].

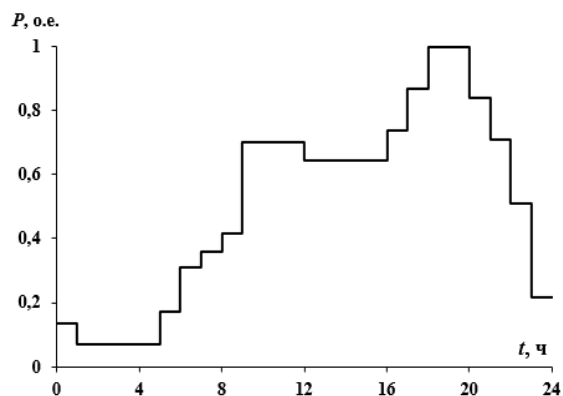


Рис. 3. Типовой суточный зимний график нагрузки жилого здания с электроплитами с осреднением из [6].

## 2.4. Типовой график с двухчасовым осреднением

На рисунке 4 приведен типовой график нагрузки, характерный для потребителя селитебной территории города [9]. Этот график был взят из [10], который был издан в 2002 г.

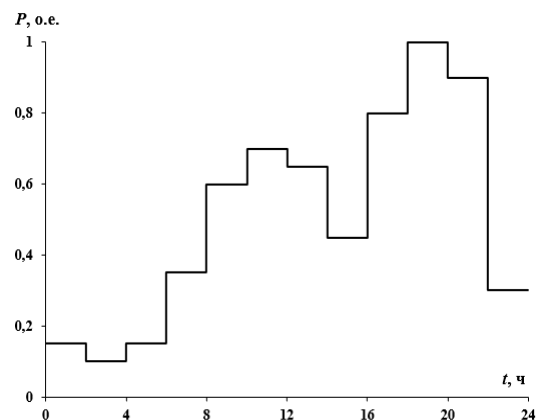


Рис. 4. Типовой суточный график нагрузки рабочего дня жилого здания с электроплитами из [9].

## 3. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ

### 3.1. Исходные данные

Измерения проведены в северо-восточной части Московской области, г. Красногорске. Объектами исследования являются 7 типовых жилых зданий, в квартирах которых установлены электрические плиты. Показания счетчиков снимались каждые 30 минут в период с 01.01.2017 по 31.12.2019 гг. для домов №№4-7, для домов №№1-3 в период с 11.11.2017 по 31.12.2019 гг. В таблице 1 приведены исходные данные по зданиям.

### 3.2. Обработка исходных данных

Для построения актуализированных графиков нагрузки исследовались зимние и летние рабочие и выходные дни. Рассматривались только показания за декабрь-январь и июнь-июль, так как в эти месяцы для зимы и лета наблюдается максимум нагрузки и продолжительность светового дня этих зимних и летних месяцев примерно одинаковая.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием MS Excel. Каждый дом рассматривался по отдельности. Допускалось, что в каждом месяце исключались графики, которые пло-

хо ложились на остальные. В основном это были дни, приходящиеся на новогодние праздники.

Были построены суточные графики зимних и летних дней отдельно для рабочих дней, субботы и воскресенья для каждого здания. Результаты зимних дней представлены на рисунках 5-7.

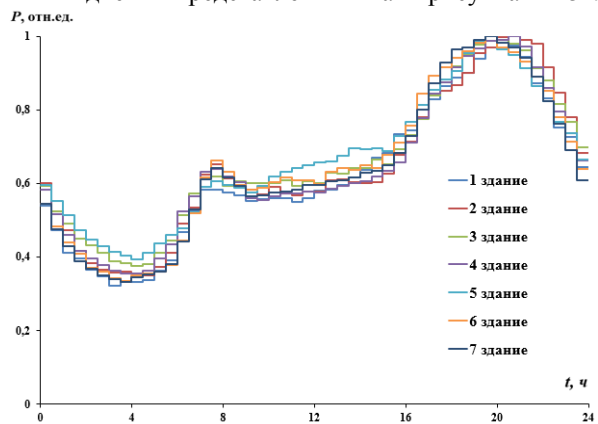


Рис. 5. Суточные графики нагрузки зимних рабочих дней для семи зданий.

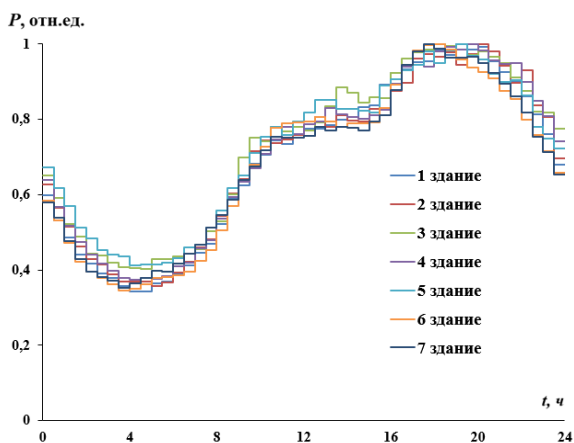


Рис. 6. Суточные графики нагрузки зимних субботних дней для семи зданий

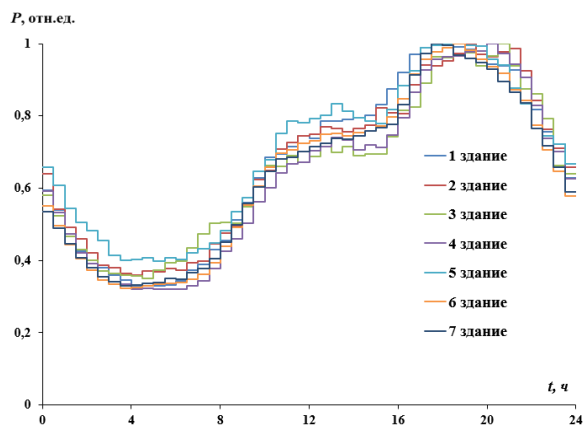


Рис. 7. Суточные графики нагрузки зимних воскресных дней для семи зданий.

Таким образом, для каждого рассматриваемого здания летних и зимних рабочих дней, субботы и воскресенья был получен типовой график нагрузки. А затем вычислено среднее арифметическое значе-

ние мощностей семи зданий рассматриваемых графиков соответственно каждого из сорока восьми интервалов. Значения переведены в относительные.

## 4. СРАВНЕНИЕ АКТУАЛИЗИРОВАННЫХ И ТИПОВЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ

### 4.1. Показатели актуализированных графиков нагрузки

В таблице 2 сведены показатели суточных зимних и летних графиков нагрузки рабочих дней, субботы, воскресенья жилых зданий с электроплитами.

Сравнивая графики нагрузки с получасовым осреднением по вторичным показателям, видно, что графики летних дней более равномерные и заполненные, так как коэффициент формы для них меньше, чем для зимних дней.

Так как в учебных пособиях и справочных материалах приведены графики с осреднениями за 1 и 2 часа, то необходимо привести полученный график к таким осреднениям. Берем значения мощностей за 00:30 и за 1:00, находим их среднеарифметическое. То есть усредняем значения 1-го и 2-го интервалов, 3-го и 4-го интервалов и так далее. Получаем двадцать четыре интервала, находим максимальное значение и переводим мощности в относительные единицы. Осредненное значение за 00:30 и за 1:00 откладываем ступенькой за интервал за с 0 до 1 и далее наносим остальные двадцать три осредненных интервала. На рисунке 6 приведен график с осреднением за 1 час. Аналогично осреднили значения мощностей первого и второго интервалов графика с осреднением за час.

### 4.2. Графики с получасовым осреднением

Сравним построенные графики на рисунках 8, 9 (линии 1) с графиками, из [7], [8]. При сравнении графиков для наглядности сравниваемые графики построены на одних осях на рисунке 13.

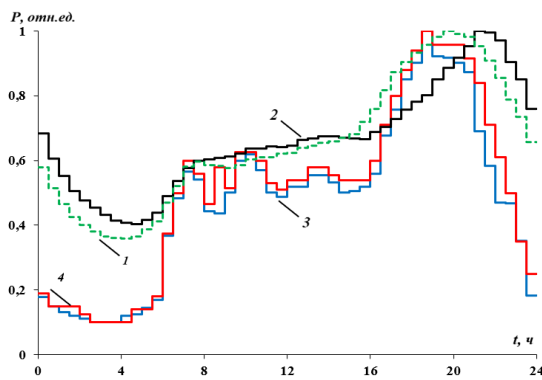


Рис. 13. Суточные графики нагрузки рабочих дней жилого здания (1 – построенный график зимних дней; 2 – построенный график летних рабочих дней; 3 – график из [8]; 4 – график из [7]).

Таблица 1. Исходные данные по зданиям

№ здания	Количество вводов	Количество этажей	Количество квартир
1 здание	4	12	383
2 здание	2	12	191
3 здание	2	12	124
4 здание	4	12	263
5 здание	4	7	127
6 здание	6	25	497
7 здание	6	17	471

Таблица 2. Показатели суточных зимних и летних графиков нагрузки рабочих дней, субботы, воскресенья жилых зданий с электроплитами

Суточный график нагрузки		Показатель					
		$P_{нб}$ , о.е.	$P_{нм}$ , о.е.	$P_{ср}$ , о.е.	$\alpha$	$\beta$	$k_{\phi}$
Зимние дни	Рабочий день	1	0,359	0,653	0,359	0,653	1,043
	Суббота	1	0,382	0,714	0,382	0,714	1,044
	Воскресенье	1	0,352	0,669	0,352	0,669	1,053
Летние дни	Рабочий день	1	0,403	0,664	0,403	0,664	1,030
	Суббота	1	0,472	0,756	0,472	0,756	1,022
	Воскресенье	1	0,407	0,696	0,407	0,696	1,033

Видно, что актуализированные графики в начале, около полночи, имеют нагрузку, превышающую относительно графиков из [8] и [7] почти в 3 раза. Ночной минимум наблюдается на всех рассматриваемых графиках нагрузки, но длительность провалов на построенных графиках заметно короче, чем на графиках, взятых из справочной литературы. Также стоит отметить, что наименьшая нагрузка на построенном графике превышает нагрузку на сравниваемых графиках минимум в 3,6 раза.

Далее сравним графики выходных дней с получасовым осреднением с типовыми.

Сравниваются графики с получасовым осреднением: графики субботы летних и зимних дней, построенные в данной работе, график субботнего дня, взятый из [8], рисунок 2, а также график выходного дня из [7], рисунок 1. Для наглядности эти графики нарисованы на одних осях, представлены на рисунке 14.

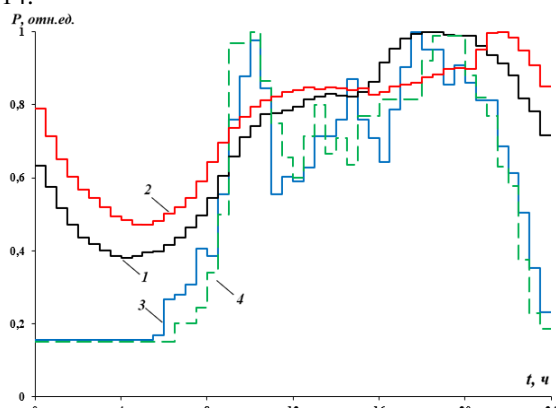


Рис. 14. Суточные графики нагрузки жилого здания (1 – построенный график зимних дней субботы; 2 – по-

строенный график летних дней субботы; 3 – график субботы из [8]; 4 – график выходных дней из [7]).

Сравним графики воскресного дня. Сравниваются графики с получасовым осреднением на рисунке 15: построенные графики воскресенья зимы и лета, график воскресного дня, взятый из [8], а также график выходного дня из [7].

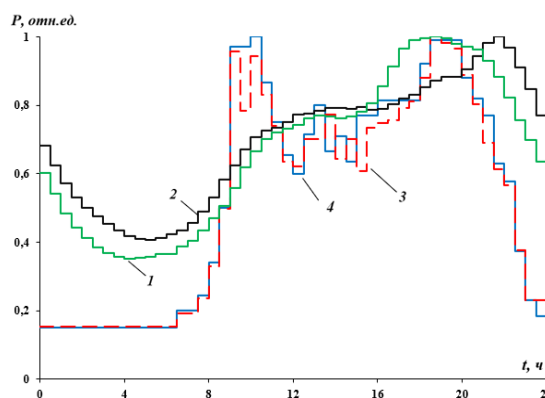


Рис. 15. Суточные графики нагрузки жилого здания (1 – построенный график зимних дней воскресенья; 2 – построенный график летних дней воскресенья; 3 – график воскресенья из [8]; 4 – график выходных дней из [7]).

### 4.3. Графики с часовым осреднением

В [6] приведен суточный зимний график уже с часовым осреднением, поэтому перестроим актуализированный график с получасовым осреднением, изображенный на рисунке 8 (линия 1) с часовым осреднением. На рисунке 16 приведен график зимних рабочих дней с осреднением за 1 час и наложен график из рисунка 3.

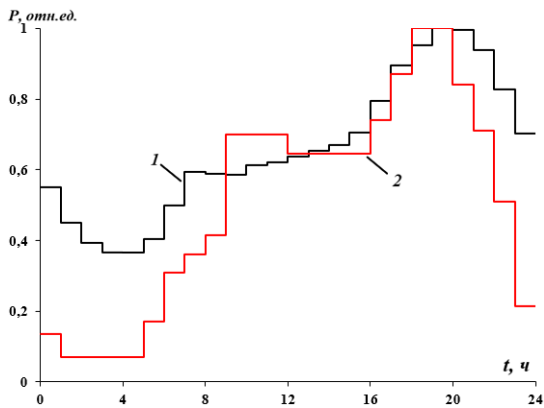


Рис. 16. Суточные графики нагрузки жилого здания с часовым осреднением (1 – построенный график зимних рабочих дней; 2 – график из [6]).

#### 4.4. Графики с двухчасовым осреднением

На рисунке 17 построены актуализированные графики зимних и летних рабочих дней и типовой график из [9].

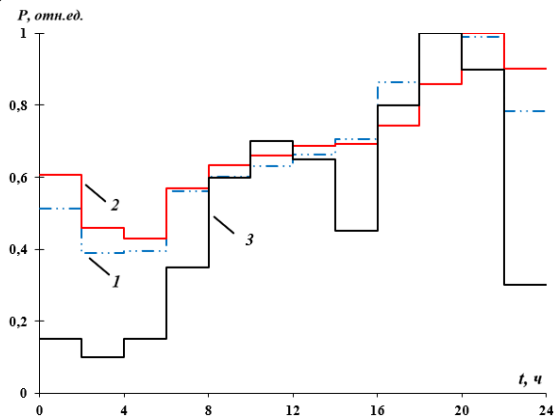


Рис. 17. Суточные графики нагрузки жилого здания с двухчасовым осреднением (1 – построенный график зимних рабочих дней, 2 – построенный график летних рабочих дней, 3 – график из [9]).

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования получены следующие основные результаты и выводы.

Выявлено, что суточные графики нагрузки многоквартирного жилого здания с электроплитами за период с 2017 по 2019 года существенно отличаются от типовых из [6, 7, 8, 9] как по наличию и значению характерных минимумов и максимумов, так и по продолжительности характерных периодов для суточного графика нагрузки.

Наименьшая мощность актуализированных графиков зимних и летних рабочих дней, субботы и воскресенья находится в диапазоне от 0,35 до 0,47 о.е, средняя мощность – от 0,65 до 0,76 о.е, коэффициент формы – от 1,02 до 1,05. Приведенные в работе данные характерны для крупных городов.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что актуализированные графики заметно отличаются от типовых графиков и их показателей, полученных в 70-90-е годы. В этом случае использование типовых графиков нагрузки, которые устарели, приводит в дальнейшем к ошибочным решениям при построении интеллектуальных систем накопления энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперова, Е. В. Анализ долгосрочных тенденций потребления энергоресурсов домохозяйствами / Е. В. Гальперова // Проблемы прогнозирования. – 2019. – № 2(173). – С. 51-62.
2. СП 256.1325800.2016. Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа.
3. Инструкция по проектированию городских электрических сетей. РД 34.20.185—94 (с изменениями и дополнениями от 29 июня 1999 г.).
4. Солюянов, Ю. И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания / Ю. И. Солюянов, А. Р. Ахметшин, В. И. Солюянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 3. – С. 47-57.
5. E. Proedrou, "A Comprehensive Review of Residential Electricity Load Profile Models," in IEEE Access, vol. 9, pp. 12114-12133, 2021
6. Козлов В.А. Городские распределительные электрические сети / В.А. Козлов. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. – 224 с.
7. Справочник по проектированию электроснабжения городов / В.А. Козлов, Н.И. Билик, Д.Л. Файбисович. Л., 1986.
8. Тульчин, И.К. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И.К. Тульчин, Г.И. Нудлер.-М.: Энергоатомиздат, 1990. - 480 с.
9. Шведов Г.В., Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети: учебное пособие / Г.В. Шведов- М.: Издательский дом МЭИ, 2012. - 268 с.
10. Электротехнический справочник: в 4-х т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др.-М.: Изд-во МЭИ, 2002.



## ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА РАЗЛИЧНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ СОЮЗ МЬЯНМЫ

### АННОТАЦИЯ

На основе обработки результатов измерений электрических нагрузок за несколько лет разработаны математические модели электропотребления элементов распределительных электрических сетей напряжением 33 и 11 кВ питающих преимущественно домохозяйства: получены суточные, недельные и годовые графики нагрузки. Выявлено, что абсолютный годовой максимум нагрузки домохозяйств приходится на вечерние часы мая месяца.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Республика Союз Мьянма — одна из бурно развивающихся стран, где отмечается ежегодный рост уровня электрификации населения. Если в 2015 году в стране только 30% домохозяйств были электрифицированы, то к 2022 году уровень электрификации повысился до 60 %, а к 2030 году планируется достичь 100% (рис. 1) [1, 2]. Соответственно за последние 5 лет электрическая нагрузка практически увеличилась в полтора раза, и к 2030 году рост прогнозируется примерно в 3 раза (рис. 2) [2, 3].

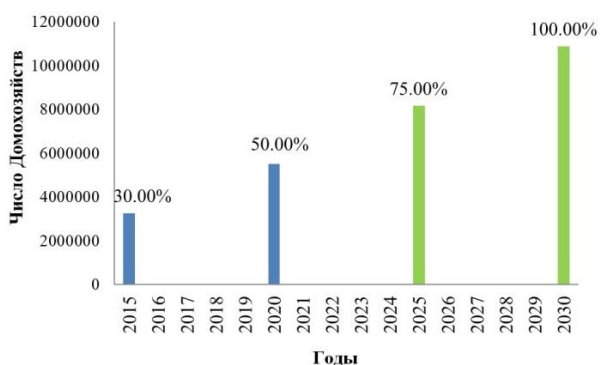


Рис. 1. Уровень электрификации до 2030 г.

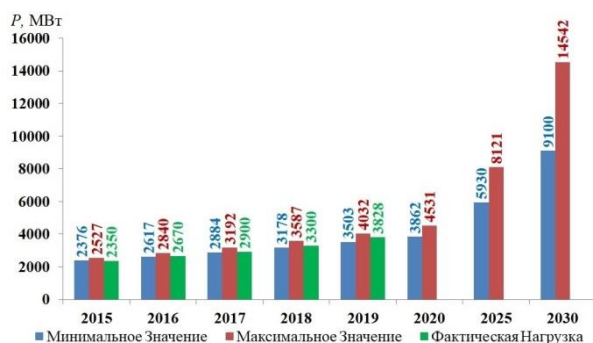


Рис. 2. Прогноз спроса электропотребления в 2015 — 2030 гг.

Повышение уровня электрификации населения и рост электропотребления сопровождается строительством новых электрических станций и системобразующих электрических сетей. Для подключе-

ния новых домохозяйств активно расширяются сети низкого напряжения 380 В. Но для обеспечения передачи возрастающей мощности по распределительным электрическим сетям напряжением 33 и 11 кВ необходимо оценить существующей резерв в их пропускной способности. Для достижения данной цели необходимо в первую очередь разработать математические модели электрических нагрузок электропотребления элементов распределительных электрических сетей – годовые, недельные и суточные графики электрических нагрузок. Типовые графики нагрузки в Мьянме есть только на уровне электроэнергетической системы, для распределительных сетей их нет.

Для решения поставленной задачи были обработаны результаты измерений электрических нагрузок в Мандалайском регионе страны.

Мандалайский Регион находится в центре страны, в его состав входит 7 районов, 30 городов, 28 посёлков. Население Мандалайского Региона составляет 6,165,723 человек, плотность населения - 200 чел./км<sup>2</sup> [4, 5].

По состоянию на 2020 год электропотребление на душу населения в регионе составляет 425 кВт·ч в год [1]. Основными потребителями электрической энергии являются: население (49,18%), промышленные предприятия и сельское хозяйство (орошение) (42,8%) и сфера услуг (7,52%) [1].

Среди основных промышленных предприятий можно выделить: добыча полезных ископаемых, пищевая промышленность, текстильные фабрики, цементные заводы, предприятия по изготовлению сельскохозяйственной техники и т.д.

### 2. ГОДОВЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ

На рис. 3-5 приведены усредненные за несколько лет годовые графики электрической нагрузки Мандалайского района в целом, и отдельно промышленности и сельского хозяйства.

В стране выделяют три сезона: прохладная зима с ноября по февраль, жаркое лето с марта по середину июня и сезон дождей с конца июня по октябрь. Максимальная температура воздуха обычно достигает +35...+43 °С в летний период, +20...+35 °С — в дождливый период и +0...+10 °С — в зимний период [7].

Во время жаркого сезона население длительное время использует устройства для хранения продуктов, хозяйственные и санитарно-гигиенические приборы.

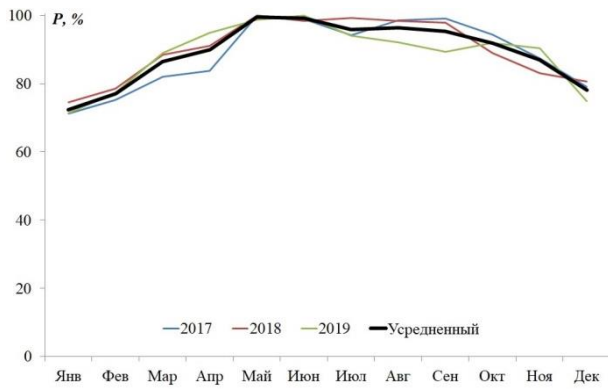


Рис. 3. Годовой график нагрузки Мандалайского района

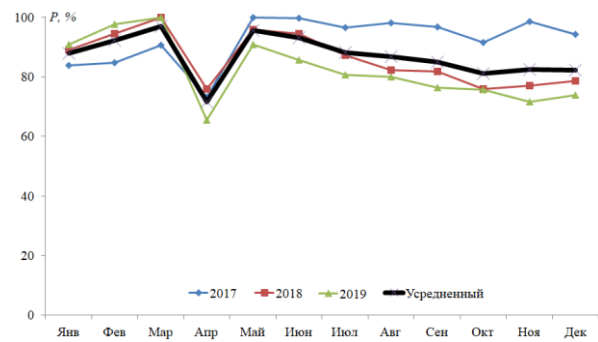


Рис. 4. Годовой график нагрузки промышленных потребителей

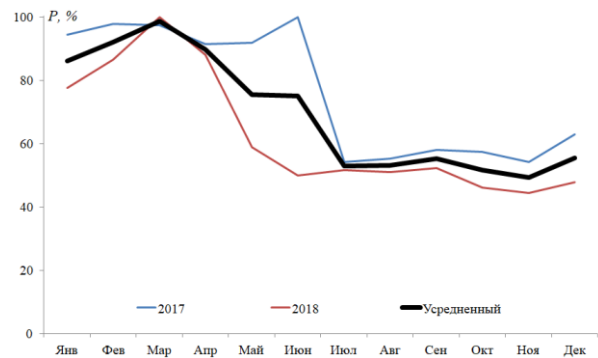


Рис. 5. Годовой график нагрузки орошения

В сельском хозяйстве в этот сезон электроэнергия расходуется на орошение и водоснабжение сельских населенных пунктов. В сезон дождей температура воздуха понижается, что, соответственно, ведет к снижению потребления электроэнергии. Зимой в стране температура воздуха значительно падает, и уменьшается использование бытовых электроприборов, и, как следствие, электропотребление достигает годового минимума.

Существенное уменьшение нагрузки промышленных предприятий в апреле (рис. 6) связано с празднованием традиционного праздника Тинджан (водяной фестиваль), фактически являющимся новым годом, который в соответствии с бирманским лунно-солнечным календарем приходится на период с 12 по 17 апреля. В стране объявляются новогодние каникулы на 10 дней с 11 апреля, в течение которых практически все промышленные предприятия останавливаются [8].

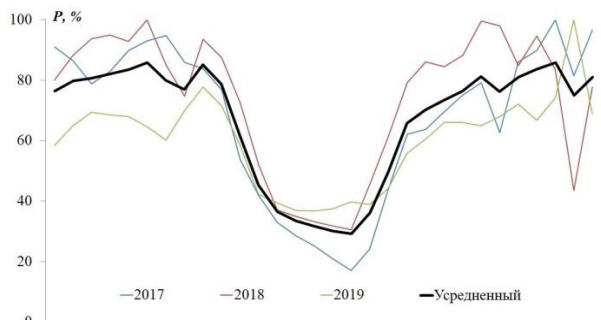


Рис. 6. График нагрузки промышленных потребителей за апрель

Приведенные годовые графики нагрузки известны только на уровне отдельных регионов или всей энергосистемы Мьянмы в целом. Для оценки состояния распределительных электрических сетей были отобраны 4 питающие подстанции 33/11 кВ и 7 фидеров 11 кВ, от которых получают электроснабжение преимущественно домохозяйства (население для бытовых нужд). Результаты измерений для этих объектов за три календарных года приведены на рис. 7 и 8.

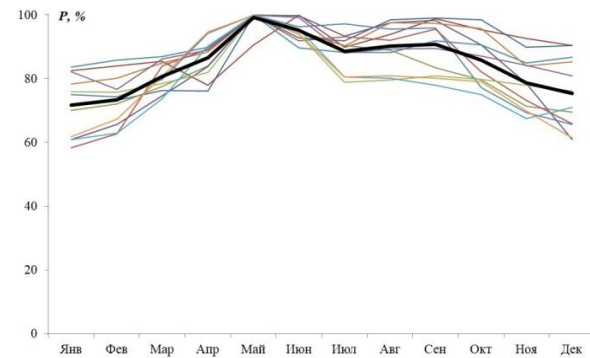


Рис. 7. Усреднённый годовой график нагрузки 4 питающих подстанций 33/11 кВ Мандалайского района

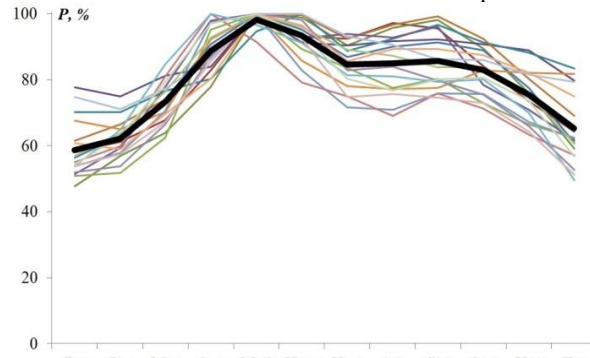


Рис. 8. Усредненный годовой график нагрузки 7 питающих фидеров 11 кВ Мандалайского района

Получаем, что для населения абсолютный годовой максимум ярко выражен и приходится на май – самый жаркий месяц в году, что связано с максимальным использованием в домохозяйствах электроприборов для хранения продуктов и санитарно-гигиенических электроприборов.

### 3. НЕДЕЛЬНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ

На рис. 9-14 приведены усредненные за несколько лет недельные графики электрической нагрузки Мандалайского региона в целом и исследуемых 4 подстанций 33/11 кВ и 7 фидеров 11 кВ для двух разных сезонов – зима (декабрь-январь) и лето (апрель-июнь).

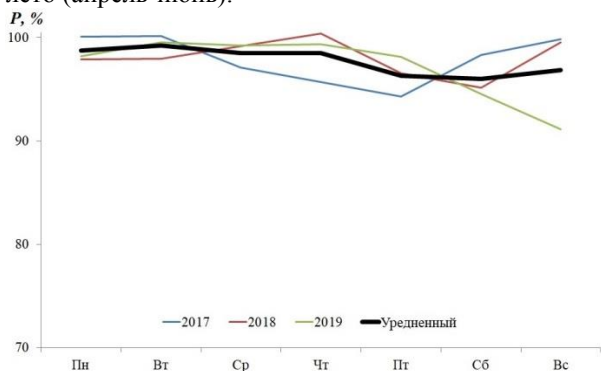


Рис. 9. Усредненный недельный график нагрузки Мандалайского региона в зимний период

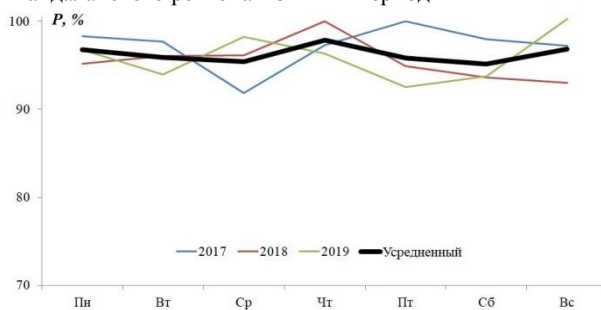


Рис. 10. Усредненный недельный график нагрузки Мандалайского региона в летний период

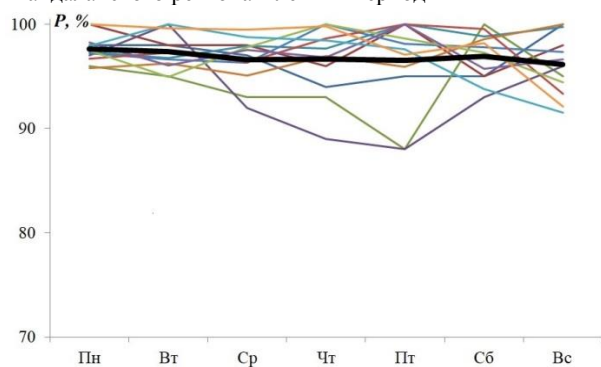


Рис. 11. Усредненные недельные графики нагрузки питающих ПС 33/11 кВ в зимний период

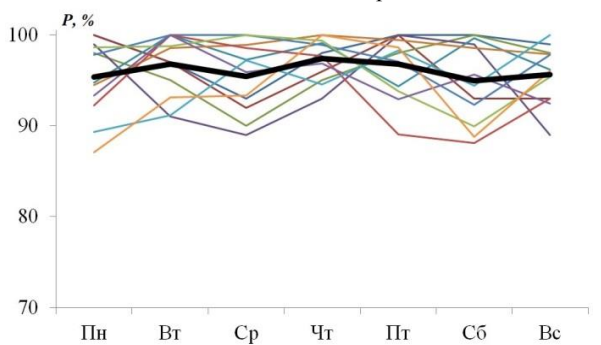


Рис. 12. Усредненные недельные графики нагрузки питающих ПС 33/11 кВ в летний период

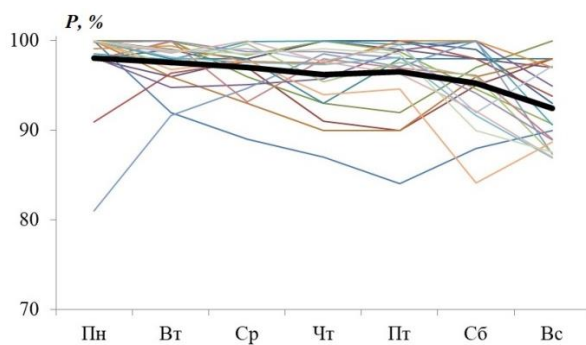


Рис. 13. Усредненные недельные графики нагрузки питающих фидеров 11 кВ в зимний период

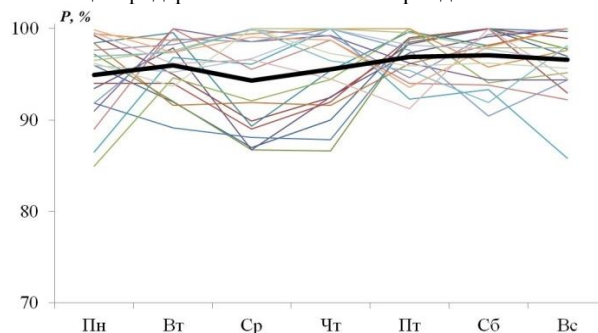


Рис. 14. Усредненные недельные графики нагрузки фидеров 11 кВ в летний период

Полученные недельные графики нагрузки практически равномерные и одинаковы, что для летнего, что для зимнего сезонов. Но при этих можно отметить существенные колебания электропотребления отдельных фидеров и подстанций, питающих преимущественно непромышленную нагрузку (рис. 11-14). В стране действует два календаря – светский григорианский, согласно которому в неделе 7 дней и выходные – суббота и воскресенье, и бирманский лунно-солнечный, который не совпадает с григорианским. Продолжительность недель бирманского календаря не одинакова: например, первая неделя длится 7 дней, а последующие 5 или 6 дней. Основная масса населения и частные предприятия (такие как текстильные фабрики, рисоочистительные заводы, заводы по производству растительного масла и т. п.) живут и работают по бирманскому календарю. В то же время государственные предприятия и учреждения, учреждения образования и т. п. работают по григорианскому календарю. Этим и объясняются колебания электропотребления по дням недели по фидерам и подстанциям распределительной сети. На уровне региона эти колебания накладываются друг на друга и практически сглаживаются, в результате электропотребление в течение недели практически становится равномерным.

#### 4. СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ

На рис. 15 и 16 представлены усредненные суточные графики рабочих дней Мандалайского региона в целом. Зимой наблюдаются два примерно одинаковых максимума нагрузки (утром и вечером). Летом график нагрузки более равномерный. Абсолютный суточный максимум наблюдается вечером, а время максимума в сравнении с зимним периодом смещается на более позднее время.



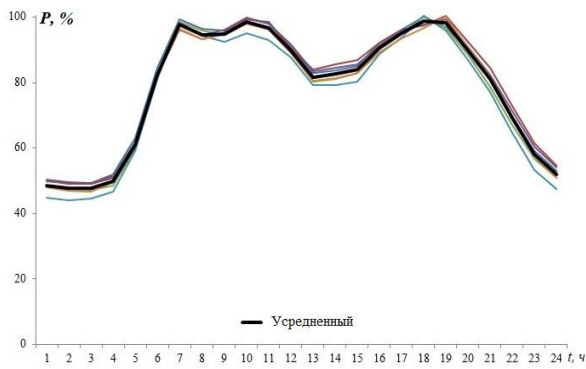


Рис. 15. Суточный график нагрузки Мандалайского региона в зимний период

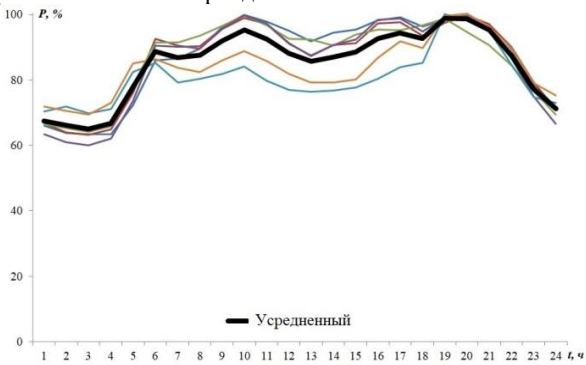


Рис. 16. Суточный график нагрузки Мандалайского региона в летний период

На рис. 17-20 представлены усредненные суточные графики питающих ПС 33/11 кВ и фидеров 11 кВ. В целом суточные графики на различных иерархических уровнях энергосистемы сопоставимы с друг другом (рис. 15-20). В зимний период у графиков нагрузки элементов распределительных сетей с преобладанием нагрузки населения, отмечается ярко выраженный дневной провал.

В летний период за счет более активного использования в домохозяйствах электроприборов для хранения пищи и санитарно-гигиенических электроприборов в сравнении с зимним периодом суточный график нагрузки сглаживается, ночной провал нагрузки практически уменьшается, а дневной провал нагрузки практически исчезает. Вечерний максимум смещается на более позднее время, что связано с большей продолжительностью светового дня и смещением времени включения освещения в домохозяйствах.

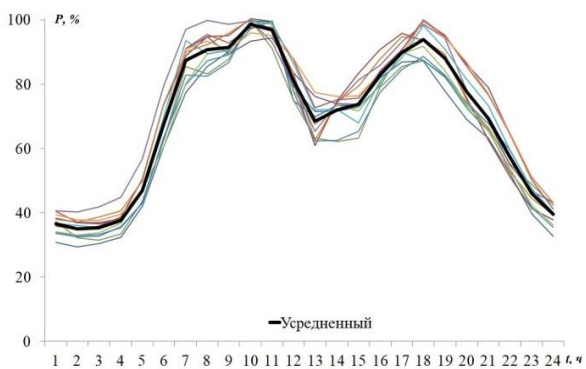


Рис. 17. Усредненные суточные графики нагрузки питающих ПС 33/11 кВ зимний период

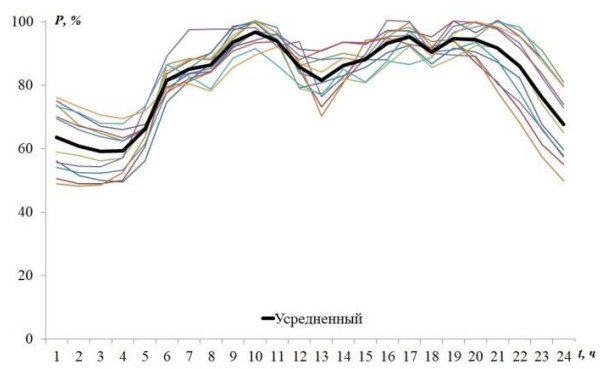


Рис. 18. Усредненные суточные графики нагрузки питающих ПС 33/11 кВ в летний период

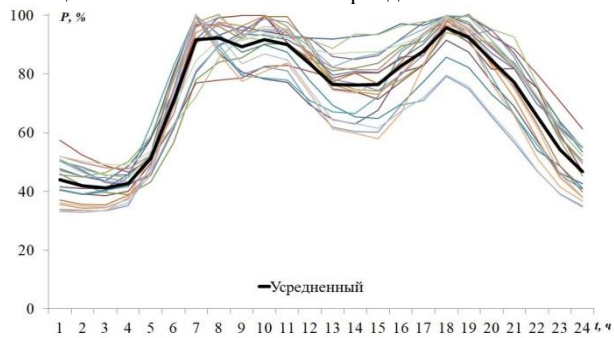


Рис. 19. Усредненные суточные графики питающих фидеров 11 кВ в зимний период

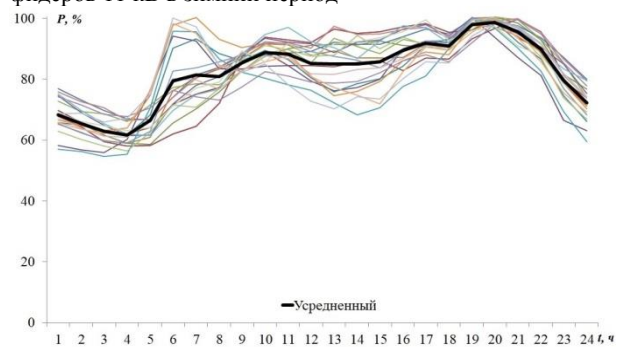


Рис. 20. Усредненные суточные графики питающих фидеров 11 кВ в летний период

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализировано электропотребление Мандалайского региона Республики Союз Мьянмы на всех уровнях – от энергосистемы региона до отдельных фидеров распределительных электрических сетей 11 кВ. Сформированы годовые, недельные, суточные графики электрических нагрузок элементов распределительных электрических сетей, проанализировав которые можно сделать следующие выводы:

- Абсолютный годовой максимум нагрузки региона в целом приходится на период май – начало июня; для населения годовой максимум нагрузки более ярко выражен и наблюдается в мае.
- Недельное электропотребление, что летний, что в зимний период практически равномерное.
- В зимний период в разрезе суток наблюдаются два примерно одинаковых максимума – утренний и вечерний и заметный дневной

провал. В летний период суточный график становится более равномерным, вечерний максимум преобладает над утренним и смещаются на более позднее время в сравнении с зимним периодом; дневной провал отсутствует.

- Максимальная загрузка распределительных электрических сетей и соответственно максимум электропотребления населения наблюдается в мае и в районе 19 часов.

В дальнейшем на основе полученных графиков будет проведен анализ режимов работы распределительных сетей страны и оценена их предельная загрузка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Министерство** электричества и энергетики [Официальный сайт]. <https://www.moee.gov.mm/en/ignite/index>.
2. **Zaw Naing Thein, Henry** “Current status and opportunity in electric power sector”, Korea-Myanmar Investment and Business Environment Seminar, The Republic of the Union of Myanmar. Источник: <http://afeo.org/wp-content/uploads/2019/03/MES-Current-Status-and-Opportunity-in-Electric-Power-Sector-Myanmar.pdf>
3. **Khin Thi Aye**. The Role of hydropower in Myanmar / Ministry of electricity and energy / Planning and Static Branch / Minister’s Office [Электронный ресурс] <https://www.moee.gov.mm/mm/ignite/page/84/446>
4. **The** 2014 Myanmar Population and Housing Census. Источник: [https://myanmar.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/MyanmarCensusAtlas\\_lowres.pdf](https://myanmar.unfpa.org/sites/default/files/pub-pdf/MyanmarCensusAtlas_lowres.pdf)
5. **Japan** International Cooperation Agency (JICA). Final Report of Data Collection Survey on Urban Area Distribution Network Development [Электронный ресурс] <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12331666.pdf>
6. **Министерство** сельского хозяйства, животноводства и ирригации [Официальный сайт] <https://www.moali.gov.mm/en>
7. **Департамент** метеорологии и гидрологии (Мьянма) [Официальный сайт] <https://www.moezala.gov.mm/current-weather-condition-city16202>.
8. **Министерство** промышленности [Официальный сайт] [https://industry.gov.mm/information/work\\_program](https://industry.gov.mm/information/work_program)
9. **Черников В.А., Прибылова Н.В., Микляев А.Е., Чурсина М.В., Черникова В.В.** Анализ графиков нагрузки потребителей в электрических сетях сельскохозяйственного и промышленного назначения // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. аграрного университета им. Императора Петра I, 2018. С. 175—182.
10. **Йе Хтут Мьят, Шведов Г.В.**, Развитие распределительных электрических сетей напряжением 11 и 33 кВ Республики Союз Мьянма // Вестник МЭИ. № 1. 2022.
11. **Шведов Г.В.** Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети. М: Издат. дом МЭИ, 2012.

## СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТДЕЛЬНОЙ КВАРТИРЫ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена анализу суточных графиков электрической нагрузки отдельной квартиры многоквартирного дома с электроплитой по дням недели в зимний сезон.

В первом и втором разделах представлены результаты построения и предварительного анализа суточных графиков нагрузки на вводе рассматриваемой квартиры с целью определения наличия или отсутствия зависимостей в электропотреблении.

В третьем разделе представлены результаты анализа суточных графиков нагрузки на вводе рассматриваемой квартиры с различными интервалами осреднения.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение – это реализация правовых, организационных, научных, производственных, технических и экономических мер, направленных на эффективное (рациональное) использование (и экономное расходование) топливно-энергетических ресурсов и на вовлечение в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии [1].

Если рассмотреть это понятие с точки зрения электропотребления, то его можно переформулировать и уточнить: энергосбережение – это максимальное снижение потерь энергии как при доставке энергии конечному потребителю, так и при использовании энергоресурсов. Сейчас одним из главных направлений энергосбережения в системах электроснабжения является использование энергосберегающих технологий и энергосберегающего электрооборудования [2]. По экспертным оценкам, ввиду наличия значительного объема устаревшего энерготехнологического оборудования суммарный потенциал энергосбережения в стране оценивается величиной в 30-45% от современного уровня энергопотребления [3]. Однако замена устаревшего оборудования и применение новых технологий направлены на модернизацию элементов систем электроснабжения, отвечающих за передачу и распределение электроэнергии, в то время как малое внимание уделяется главному элементу любой системы электроснабжения – потребителю электрической энергии.

Основным потребителем в системах электроснабжения мегаполисов являются многоквартирные дома, а в самих домах – квартиры. Состав электроприёмников квартир значительно изменился за последние 20-30 лет: лампы накаливания уступили место светодиодным, появились СВЧ-печи и круглосуточно работающие wi-fi роутеры - с одной стороны, применяются новые бытовые приборы, а с другой стороны, у некоторых из них уменьшается

энергоёмкость. Электроприборы, все в большей степени используемые в квартирах, направлены на энергосбережение, сокращение трудозатрат на ведение домашнего хозяйства и повышение комфорта современного жилья. Это приводит к изменению электропотребления, так как оно зависит от соотношения темпа роста электроэнергии, повышения уровня насыщения электротехникой домашних хозяйств, уровня их информатизации и т.п. Также следует отметить, что с ростом количества используемых населением электробытовых приборов изменяется и их установленная мощность.

На стадии проектирования невозможно достоверно определить, какую нагрузку в конкретный момент времени будут потреблять электроприёмники отдельной квартиры. Для расчетов используются справочники и научно-техническая литература [4-5], в которых приведены показатели, полученные на основании длительных наблюдений за потребителями в 70-90-е годы, когда бытовых приборов было значительно меньше, а уровни информатизации домашних хозяйств были гораздо ниже.

Перечисленные факторы привели к тому, что в настоящее время участились случаи, когда нагрузка, рассчитанная по нормативным документам, значительно отличается от фактической [6-7]. Это в свою очередь приводит к неэффективному выбору оборудования, например, силовых трансформаторов, которые недогружены в нормальном режиме работы, что приводит к увеличению потерь энергии как в самих трансформаторах, так и во всей системе электроснабжения.

Таким образом, уточнение характера электропотребления конечного потребителя (квартиры), может значительно уменьшить потери электроэнергии во всей сети, что положительно скажется на энергосбережении при транспортировке этой электроэнергии.

### 1. ПОСТРОЕНИЕ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ КВАРТИРЫ

Объектом исследования является трехкомнатная квартира с электроплитой. Измерения проводились в г. Москва с декабря 2020 года по март 2022 года.

В качестве исходных данных используются результаты фактических измерений на вводе в квартиру измерителя показателей качества электрической энергии «Ресурс-UF2М». Вся необходимая информация записывается в файле специального формата на USB-флеш-накопитель и в дальнейшем

преобразовывается на персональном компьютере в табличный вид.

Активная мощность фиксировалась непрерывно каждую минуту.

В работе исследовались рабочие и выходные дни в период с 15 ноября 2021 года по 28 февраля 2022 года. Статистическая обработка результатов выполнена с использованием MS Excel. За рассматриваемый период были построены суточные графики минутных значений электрических нагрузок для каждого дня недели. Пример данного графика для понедельников представлен на рисунке 1. Допускалось, что для каждого дня недели исключались графики, которые кардинально отличались от остальных. В основном это были дни, приходящиеся на праздники.

## 2. АНАЛИЗ СУТОЧНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Проанализируем полученные суточные графики нагрузки. Для всего рассматриваемого периода характерно постоянное потребление активной мощности на уровне 20 - 30 Вт в период с 00:00 до 08:00 в будние дни и с 00:00 до 09:00 в выходные дни. Также для всех дней характерно потребление 2-2.5 кВт активной мощности в период с 00:00 до 02:30 в течение кратковременных интервалов времени, как правило, в течение 10 минут. В будние дни наблю-

дается кратковременный утренний максимум приблизительно в 7:30 утра (данный максимум может наступать либо на 10 минут раньше, либо на 10 минут позже в зависимости от дня недели) мощностью 2-2.2 кВт и длительностью от 3 до 5 минут. В выходные дни данный максимум смещается на 09:00 утра. Для всех дней недели также характерен мгновенный максимум потребляемой активной мощности длительностью 1-2 минуты мощностью 3.9-4.5 кВт в период с 23:30 до 01:30. Данный максимум не имеет точного времени, но в большинстве случаев наблюдается в указанный временной период.

Выделим характерные особенности каждого дня недели.

**Понедельник.** Дневной максимум наблюдается в период с 13:00 до 14:00 длительностью 3-5 минут и мощностью 2-2.5 кВт. В вечерние часы максимум наблюдается в период с 19:30 до 20:05, значения мощности от 1.5 до 2.5 кВт. Потребляемая мощность в период с 08:00 до 18:00 составляет от 30 до 350 Вт. Значения активной мощности в период с 18:00 до 22:00 находятся в интервале от 200 до 400 Вт, в период с 22:00 до 00:00 – от 140 Вт до 300 Вт. При этом с 18:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные (от 2 до 10 минут) пики мощностью 2-2.5 кВт.

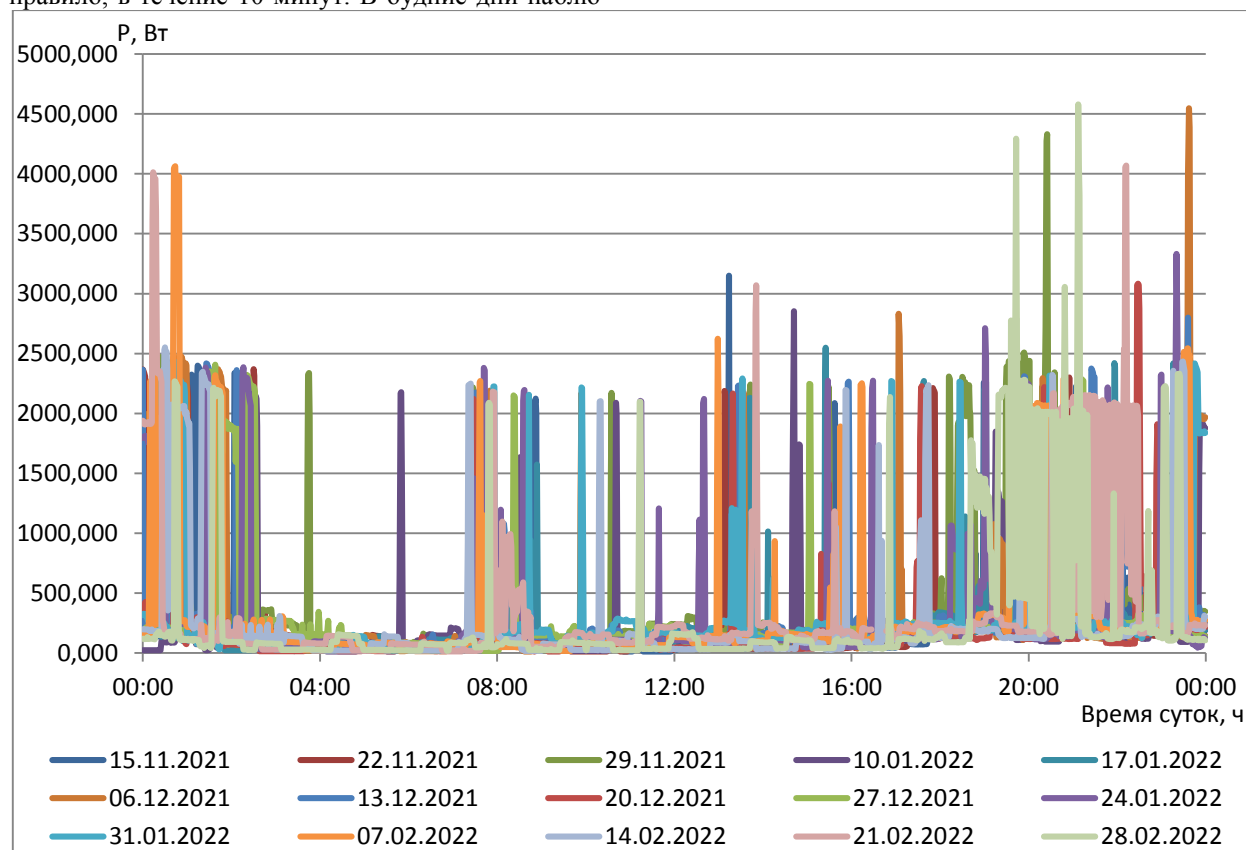


Рисунок 1 - Суточные графики нагрузки понедельников в период с 15.11.2021 по 28.02.2022

**Вторник.** Потребляемая мощность в период с 08:00 до 18:00 составляет от 13 до 300 Вт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. Значения активной мощности в период с 18:00 до 22:00 находятся в интервале от 150 до 350

Вт, с 22:00 до 00:00 – от 150 Вт до 300 Вт. В период с 19:00 до 20:00 имеют место кратковременные (2-3 минуты) пики мощностью от 2.5 до 3.75 кВт, а с 21:00 до 00:00 – мощностью 2.3 кВт.

Среда. Потребляемая мощность в период с 08:00 до 18:00 составляет от 20 до 600 Вт с периодическими кратковременными (2-3 минуты) пиками мощностью 2.1-2.2 кВт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. Значения активной мощности в период с 18:00 до 22:00 находятся в интервале от 150 до 1600 Вт, с 22:00 до 00:00 – от 180 Вт до 400 Вт. При этом с 18:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные (от 2 до 10 минут) пики мощностью 2.3-2.8 кВт.

Четверг. Потребляемая мощность в период с 08:00 до 18:00 составляет от 20 до 250 Вт с периодическими кратковременными (2-3 минуты) пиками мощностью 2.1-2.2 кВт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. Значения активной мощности в период с 18:00 до 22:00 находятся в интервале от 140 до 400 Вт, с 22:00 до 00:00 – от 140 Вт до 300 Вт. При этом с 18:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные (от 2 до 10 минут) пики мощностью 2.1-2.8 кВт.

Пятница. Потребляемая мощность в период с 08:00 до 18:00 составляет от 40 до 300 Вт с периодическими кратковременными (2-3 минуты) пиками мощностью 2.1-2.2 кВт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. Значения активной мощности в период с 18:00 до 22:00 находятся в интервале от 250 до 800 Вт, с 22:00 до 00:00 – от 150 Вт до 300 Вт. При этом с 18:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные (от 2 до 10 минут) пики мощностью 2-2.5 кВт.

Суббота. Потребляемая мощность в период с 09:00 до 22:00 составляет от 150 до 400 Вт с периодическими кратковременными (2-3 минуты) пиками мощностью около 2.2 кВт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. В период с 23:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные (от 2 до 5 минут) максимумы мощностью от 2 до 4 кВт, при этом с 22:00 до 00:00 значения мощности находятся в интервале от 150 до 350 Вт.

Воскресенье. Потребляемая мощность в период с 09:00 до 22:00 составляет от 200 до 500 Вт с периодическими кратковременными (от 2 до 10 минут) пиками мощностью около 2 кВт. В вечерние часы нет ярко выраженного продолжительного максимума. В период с 23:00 до 00:00 наблюдаются кратковременные максимумы мощностью от 2 до 4 кВт, при этом с 22:00 до 00:00 значения мощности находятся в интервале от 150 до 400 Вт.

Таким образом, для каждого дня можно выделить характерные временные интервалы, в которых наблюдаются зависимости в электропотреблении. Однако на данном этапе слишком велико влияние случайности данных процессов, так как рассматриваются мгновенные значения мощности каждую минуту.

### 3. ОСРЕДНЕННЫЕ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ

Для уменьшения влияния фактора случайности перейдем к графикам нагрузки, построенным по средним значениям мощности за различные интервалы времени. Это позволит учитывать как кратко-

временные пики активной мощности, которые наблюдаются в течение пары минут, так и постоянное потребление активной мощности в течение оставшегося промежутка времени.

Средняя нагрузка за интервал времени  $P_{cp}$  рассчитывается по выражению:

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt,$$

где  $T$  – интервал времени, за который рассчитывается нагрузка;  $P$  – значения мощности в этот интервал времени.

Также для каждого интервала осреднения были вычислены средние арифметические значения мощностей на каждом временном промежутке, на основе которых был построен график средних значений. Первоначальный интервал осреднения был принят равным 10 минутам, так как это значение равно постоянной времени нагрева элементов электрических сетей до 1000 В при расчете расчетных нагрузок. Первый интервал фиксируется с 00:00 до 00:10, второй – с 00:10 по 00:20 и далее аналогично. Таким образом, каждые сутки разбиты на 144 интервала по 10 минут. Пример данного графика для понедельников представлен на рисунке 2.

При данном интервале осреднения можно выделить следующие характерные зоны графиков нагрузки для будних дней:

- ночной максимум в период с 00:00 до 02:30 и значениями активной мощности от 300 до 1340 Вт;
- ночной минимум в период с 02:30 до 07:00;
- утренний максимум в период с 07:00 до 09:00 и значениями активной мощности от 50 до 450 Вт;
- дневной провал в период с 09:00 до 17:30;
- вечерний максимум в период с 17:30 до 23:00 и значениями активной мощности от 250 до 910 Вт.

Для выходных дней данная тенденция сохраняется почти полностью, за исключением дневного провала, в это время в выходные дни не наблюдается спад потребляемой активной мощности. Значения активной мощности для максимумов в выходные дни равны от 350 до 1050 Вт, от 100 до 400 Вт и от 250 до 1000 Вт соответственно.

Полученные графики среднего арифметического значения для каждого дня недели хорошо отражают тенденцию энергопотребления в период утреннего минимума (период с 02:30 до 07:00). В остальные же часы потребление активной мощности в некоторые из представленных дней может значительно отличаться как в большую, так и в меньшую сторону. Это связано с маленьким интервалом осреднения и слишком большим влиянием случайности процессов во времени.

При этом все же можно утверждать о некоторой зависимости в электропотреблении, так как значительные отличия реальных значений средней мощности от полученного среднего графика нагрузки наблюдаются в среднем у 2-4 дней из 13-15 изучаемых.

Для уменьшения влияния фактора случайности увеличим время осреднения. В качестве следующе-



го интервала было принято значение, равное 30 минутам, так как это значение равно постоянной времени нагрева кабелей номинальным напряжением 6-20 кВ при расчете расчетных нагрузок. Пример данного графика для сред представлен на рисунке 3.

При данном интервале осреднения суточные графики средней нагрузки стали лучше «ложиться» на средний график нагрузки в часы дневного провала, однако в часы вечернего и утреннего максимумов все еще наблюдаются дни, которые значительно отличаются от среднего (опять же в среднем из 2-4 дня из 13-15 рассматриваемых).

Для графиков с данным интервалом осреднения в будние дни наблюдаются три максимума:

- ночной максимум в период с 00:00 до 01:30 и значениями активной мощности от 300 до 950 Вт;
- утренний максимум в период с 07:30 до 08:00 и значениями активной мощности от 250 до 350 Вт;
- вечерний максимум в период с 19:00 до 20:00 и значениями активной мощности от 410 до 930 Вт.

В выходные дни ночной и вечерний максимумы наблюдаются в то же самое время, при этом утренний максимум отсутствует. Значения активной мощности для этих максимумов равны от 470 до 980 Вт и от 620 до 720 Вт соответственно. Данные

максимумы попадают во временные интервалы, определенные на предыдущем этапе, но при этом и уточняют их, что позволяет точнее определить время максимума нагрузки.

На практике для определения расчетных нагрузок используется интервал времени, равный трем постоянным времени нагрева. Тогда в качестве следующего интервала осреднения было принято значение, равное 1,5 часам, так как это значение равно трем постоянным времени нагрева кабелей номинальным напряжением 6-20 кВ. При данном интервале осреднения суточные графики средней нагрузки хорошо «ложатся» на средний график нагрузки в течение суток. Однако для большинства дней недели, за исключением понедельника, в часы вечернего максимума (в период с 18:00 до 21:00) наблюдаются приблизительно одинаковые значения средней нагрузки. В качестве примера на рисунке 4 приведен суточный график нагрузки для вторника.

Следовательно, следует изменить точку отсчета интервалов осреднений, так как в противном случае есть риск занижения средней мощности из-за того, что пик реального значения попал в точку между интервалами.

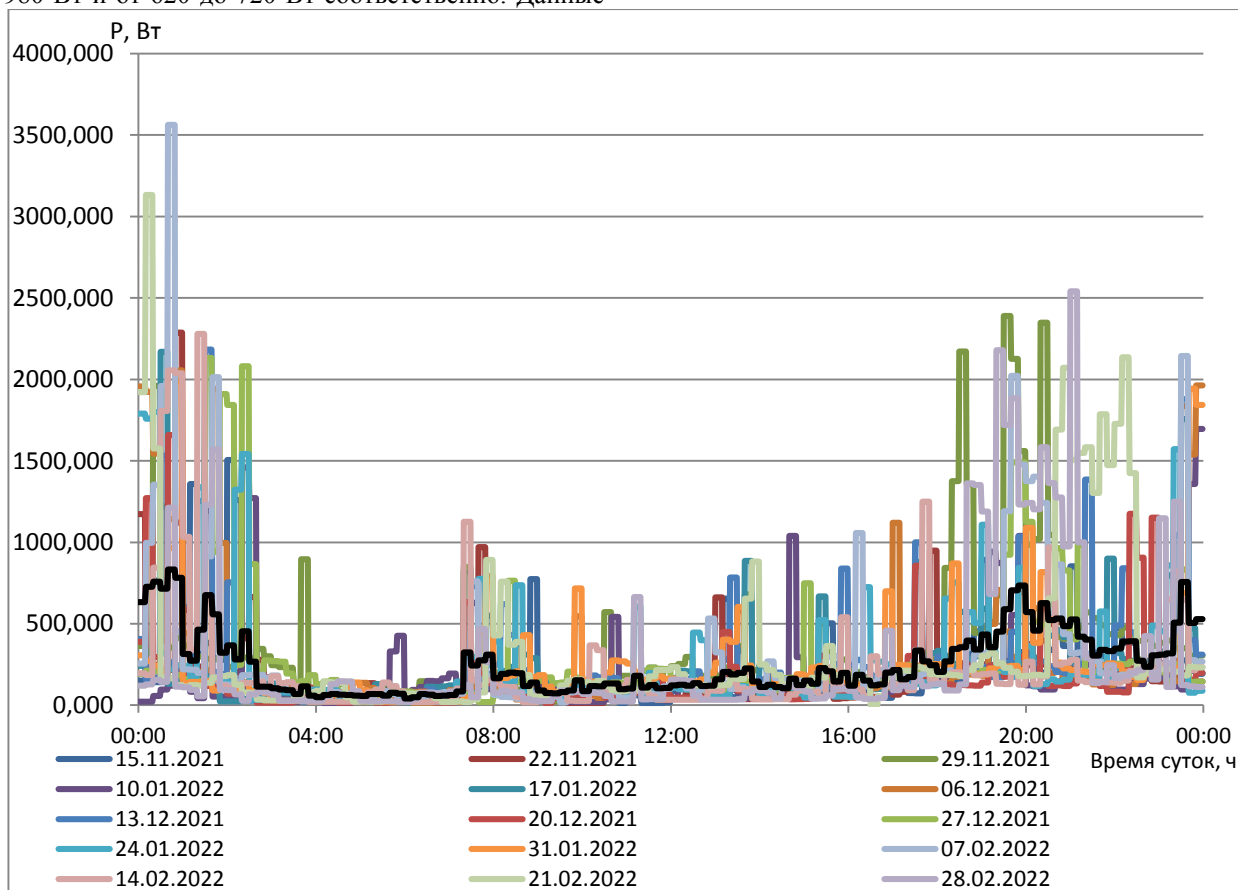


Рисунок 2 - Суточные графики нагрузки понедельников в период с 15.11.2021 по 28.02.2022 с осреднением за 10 минут

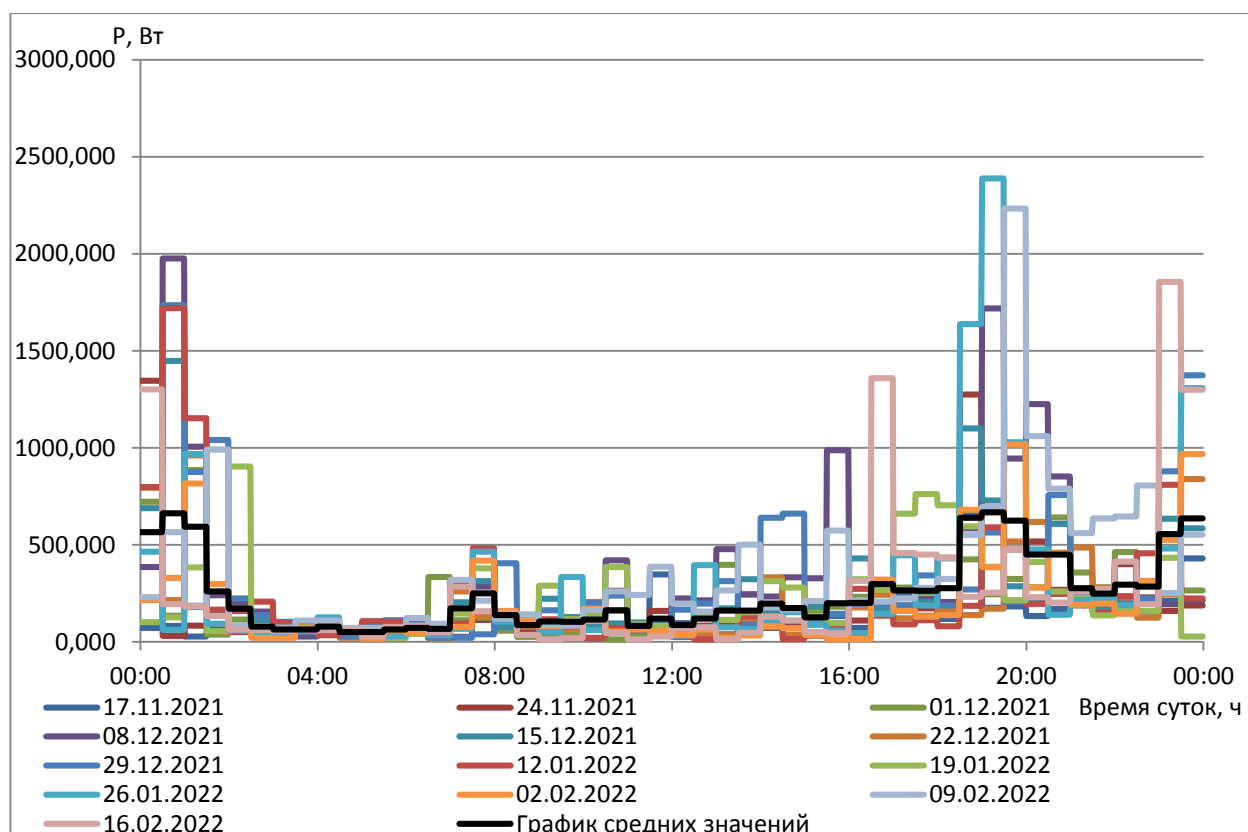


Рисунок 3 - Суточные графики нагрузки сред в период с 15.11.2021 по 28.02.2022 с осреднением за 30 минут

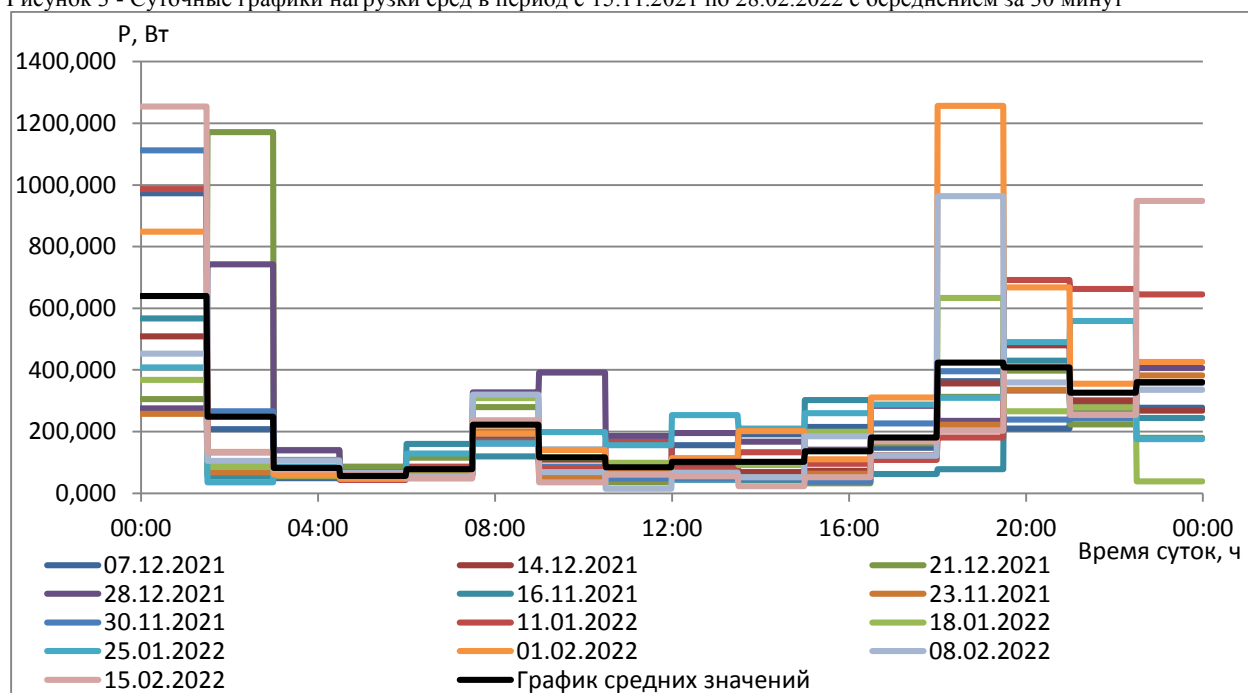


Рисунок 4 - Суточные графики нагрузки вторников в период с 15.11.2021 по 28.02.2022 с осреднением за 1,5 часа при занижении средней мощности

Исходя из точки вечернего максимума, новой точкой отсчета станет 01:00 (час ночи). В таком случае вечерние интервалы осреднения будут приходиться на период времени с 17:30 до 19:00 и с 19:00 до 20:30. Новая точка отсчета позволила уточнить значения средней мощности в вечерние часы, однако есть риск занижения абсолютного максимального значения средней мощности для рассматриваемого дня. Данная неточность наблюдается для четверга. Для пятницы различия малы –

778 Вт при точке отсчета в 00:00 и 787 Вт при точке отсчета в 01:00, поэтому отличиями можно пренебречь. Для остальных дней новая точка отсчета показала увеличение максимального значения средней мощности для рассматриваемых дней, поэтому в дальнейшем будем рассматривать графики с данной системой отсчета. Пример графика, построенного для интервала осреднения, равного 1,5 часам, с новой точкой отсчета для вторников представлен на рисунке 5.

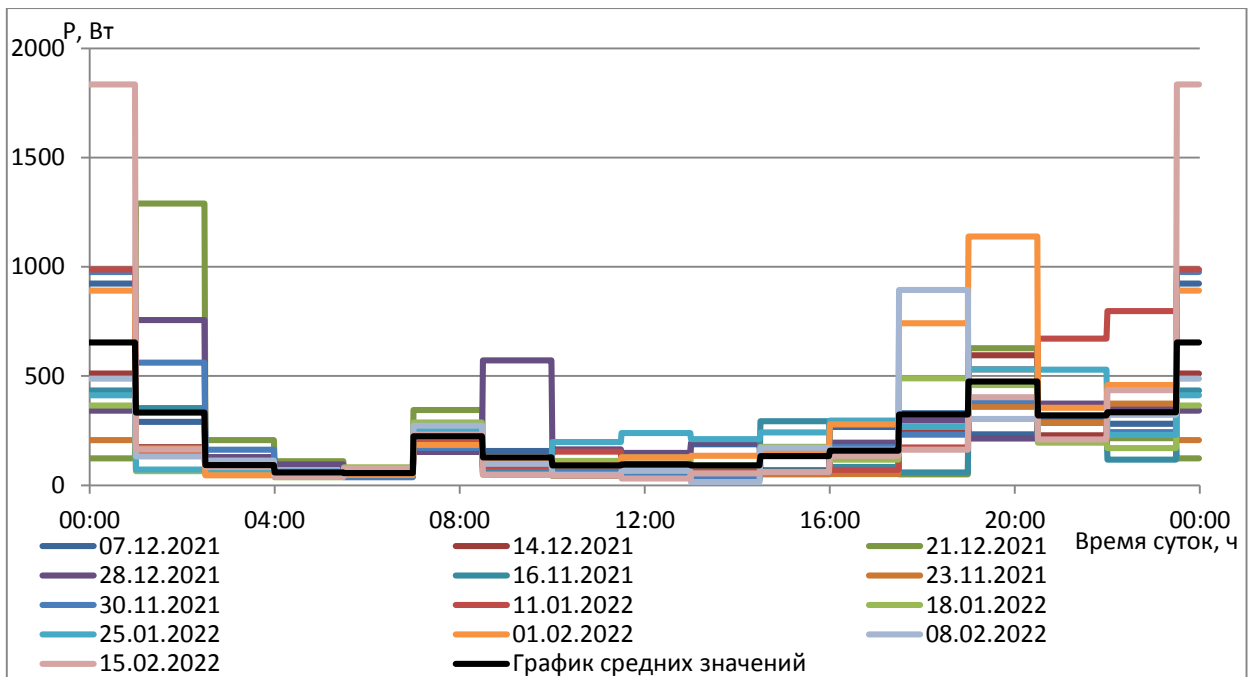


Рисунок 5 - Суточные графики нагрузки вторников в период с 15.11.2021 по 28.02.2022 с осреднением за 1,5 часа

Данные графики позволили окончательно определить значения и временные рамки максимумов, наблюдаемых в течение суток:

- значение ночного максимума приходится на интервал времени с 23:30 до 01:00 и составляет от 450 до 700 Вт для будних дней и от 800 до 900 Вт для выходных дней;

- значение утреннего максимума приходится на период времени с 07:00 до 08:30 и составляет от 180 до 230 Вт для будних дней, в выходные дни данный максимум не наблюдается;

- значение вечернего максимума приходится на период времени с 19:00 до 20:30 и составляет от 470 до 790 Вт для будних дней и от 600 до 700 Вт для выходных дней.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлены закономерности в электропотреблении.

Для графиков нагрузки, построенным по минутным значениям активной мощности, в будние дни наблюдаются три максимума:

- ночной в период с 23:30 до 02:30 в течение кратковременных интервалов времени длительностью от 2 до 10 минут и значениями активной мощности от 2 до 2,5 кВт;

- утренний в период с 7:20 до 7:40 длительностью от 3 до 5 минут и значениями активной мощности от 2 до 2,2 кВт;

- вечерний в период с 18:00 до 20:00 в течение кратковременных интервалов времени длительностью от 2 до 10 минут и значениями активной мощности от 2 до 3 кВт.

В выходные дни в течение суток наблюдаются два максимума:

- ночной в период с 23:00 до 02:30 в течение кратковременных интервалов времени длительностью от 2 до 10 минут и значениями активной мощности от 2 до 4 кВт;

- утренний в период с 8:50 до 9:10 длительностью от 3 до 5 минут и значениями активной мощности от 2 до 2,2 кВт.

Для графиков нагрузки с интервалом осреднения, равным 10 минутам, в выходные дни наблюдаются три максимума:

- ночной в период с 00:00 до 02:30 и значениями активной мощности от 300 до 1340 Вт;

- утренний в период с 7:00 до 9:00 и значениями активной мощности от 50 до 450 Вт;

- вечерний в период с 17:30 до 23:00 и значениями активной мощности от 250 до 910 Вт.

В будние дни для данного интервала в течение суток наблюдаются три максимума:

- ночной в период с 00:00 до 02:30 и значениями активной мощности от 350 до 1050 Вт;

- утренний в период с 7:00 до 9:00 и значениями активной мощности от 100 до 400 Вт;

- вечерний в период с 17:30 до 23:00 и значениями активной мощности от 250 до 1000 Вт.

Для графиков нагрузки с интервалом осреднения, равным 30 минутам, в выходные дни наблюдаются два максимума: ночной в период с 00:00 до 01:30 и значениями активной мощности от 470 до 980 Вт и вечерний в период с 19:00 до 20:00 и значениями активной мощности от 620 до 720 Вт.

В будние дни для данного интервала в течение суток наблюдаются три максимума:

- ночной в период с 00:00 до 01:30 и значениями активной мощности от 300 до 950 Вт;

- утренний в период с 7:30 до 8:00 и значениями активной мощности от 250 до 350 Вт;

- вечерний в период с 19:00 до 20:00 и значениями активной мощности от 410 до 930 Вт.

Для графиков нагрузки с интервалом осреднения, равным 1,5 часам, в выходные дни наблюдаются два максимума: ночной в период с 23:30 до 01:00 и значениями активной мощности от 800 до 900 Вт

и вечерний в период с 19:00 до 20:30 и значениями активной мощности от 600 до 700 Вт.

В будние дни для данного интервала в течение суток наблюдаются три максимума:

- ночной в период с 23:30 до 01:00 и значениями активной мощности от 450 до 700 Вт;

- утренний в период с 7:00 до 8:30 и значениями активной мощности от 180 до 230 Вт;

- вечерний в период с 19:00 до 20:30 и значениями активной мощности от 470 до 790 Вт.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Энергосбережение.** Энергетическая эффективность. Состав и классификация показателей. Основные положения. ГОСТ 31532-2012. – «ВНИИНМАШ», 2012. – 12 с.

2. **Редькин А. В.** Энергосбережение в системах электропитания муниципальных объектов и популяризация энергосбережения / Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово: Кузбас-

ский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2020. – С. 248-1-248-4.

3. **Шведов Г.В.** Системы электроснабжения: учебник / Г.В. Шведов, Т.А. Шестопалова. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 312 с.

4. **Инструкция** по проектированию городских электрических сетей. РД 34.20.185-94 (с изменениями и дополнениями от 29 июня 1999 г.).

5. СП 256.1325800.2016 Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа. – 2017 г.

6. **Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Солуянов Д.Ю., Ахметшин А.Р.** Актуализация электрических нагрузок многоквартирных жилых домов // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 1. – С. 180–189.

7. **Надтока И.И., Павлов А.В., Новиков С.И.** Проблемы расчёта электрических нагрузок коммунально-бытовых потребителей микрорайонов мегаполисов / Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 136-138.

О.А. Чехранова<sup>1</sup>, Е.Г. Гаши<sup>1</sup>, В. Иванко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

### АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается подход совершенствования энергетического комплекса страны и повышения экологической безопасности предприятий. Данная работа объединяет в себе анализы энергетического баланса страны, структуры потребления топливно-энергетических ресурсов по категориям и выделяет наиболее энергоемкие отрасли. В статье также выявлены резервы промышленной отрасли и разделены на категории. В работе авторами был рассмотрен пример модернизации энергетического комплекса города с учетом его особенностями. Например, при реализации термодинамических резервов -применения ВЭР на алюминиевом заводе можно достичь сокращения выбросов на 15% и обеспечить город энергией порядка 3 Гкал.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для полноценного развития страны необходимо развивать урбанизацию городов, которая характеризуется расширением и улучшением социальной сферы, строительных, наукоемких и промышленных отраслей. Не менее стратегически важным является развитие энергетических систем как регионов, так страны в целом.

В энергетической стратегии России до 2035 года указано, что приоритеты государственной энергетической политики - это развитие энергетического сектора, оно будет обеспечиваться с учетом следующих приоритетов государственной энергетической политики: гарантированное обеспечение энергетической безопасности страны и ее регионов, включая недопущение в любых условиях дефицита топливно-энергетических ресурсов, создание стратегических запасов топлива, необходимых резервных мощностей и комплектующего оборудования, обеспечение стабильности функционирования систем электроэнергетического и теплоснабжения [6]. В связи с этим к модернизации и усовершенствованию энергопромышленного комплекса необходимо подходить комплексно, анализировать тенденции развития как всего топливно-энергетического комплекса страны, так и в рамках отраслей и регионов. Поэтому в данной статье рассмотрена динамика энергопотребления первичного топлива в России, основные резервы и предполагаемые решения.

### 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И РЕЗЕРВЫ

#### 2.1. Топливо-энергетический баланс России

Как упоминалось выше, для определения потенциала развития необходимо иметь полную картину потребления и выработки ресурсов. Под этим углом рассмотрим сводный топливно-энергетический баланс России. При составлении сводных балансов топлива объемы различных топлив измеряются в тоннах условного топлива (т у. т.), теплотворная способность которого принята в размере 7000 ккал/кг. Это позволяет суммировать объемы топлив (а также электрической и тепловой энергии) с различной теплотворной способностью. Энергетический баланс состоит из 4 блоков: из баланса поступления и расхода природного топлива, баланса производства и расхода продуктов переработки топлива, баланса производства и потребления электрической и тепловой энергии, баланса поступления и расхода энергии в сфере потребления.

Так, по данным Международного энергетического агентства [7] общая добыча всех природных ресурсов составляет 1967 нефтяного эквивалента или 2127 млн т у. т. При этом наибольшую долю по потреблению первичного топлива занимает население рис.1. По данным Росстата [5], объем потребления энергоресурсов населением за период 2012–2021 увеличился примерно на 55%. Промышленность показала рост на 15%. Если более детально рассматривать структуру потребления ТЭР, то наибольшее потребление первичных ресурсов приходится на сферу электроэнергетики и теплоэнергетики, обрабатывающую промышленность и добывающую промышленность [4]. Обрабатывающая промышленность состоит из металлургической отрасли (черная и цветная), машиностроения, переработки нефти, пищевой промышленности, бумажной, легкой и текстильной промышленности. Все эти составляющие являются наиболее энергоемкими отраслями.

Также отмечается в анализе энергопотребления по регионам страны, что регионы, где присутствует большой кластер промышленности, занимают лидирующие позиции по потреблению первичных энергоносителей [4].

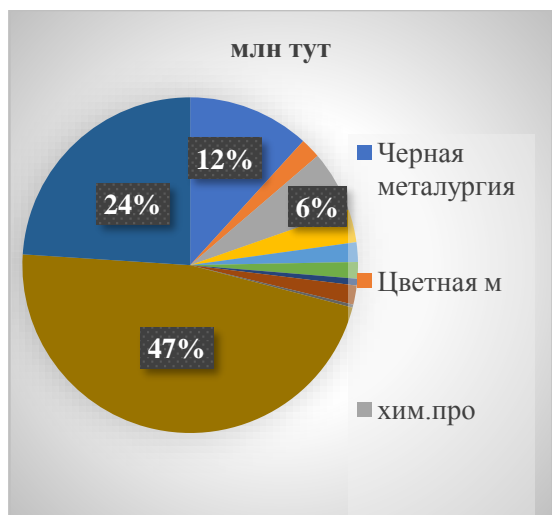


Рис. 1. Топливо-энергетический баланс России 2019 год).

## 2.2 Резервы повышения энергоэффективности

Рассмотрим реализации повышение энергоэффективности и повышение экологической безопасности на промышленных предприятиях. Для успешной реализации резервов энергоэффективности необходимо определить - какие группы резервы есть и как их реализовать на практике.

Основные резервы повышения эффективности в промышленном комплексе РФ можно условно разделить на несколько основных типов [2]: управленческий, резервы масштаба и топологии, новые технологии ресурсоиспользования, термодинамические резервы, электротехнические/электротермические резервы, использование возобновляемых источников энергии, использования вторичных энергоресурсов, новые источники энергии. (табл 1).

Таблица 1. Типы резервов

Резервы	Составляющие
Управленческий	соблюдение режимных карт; внедрение систем мониторинга и АСКУЭ; внедрение системы энергоменеджмента;
Резервы масштаба и топологии	увеличение масштаба с одновременным повышением эффективности технологии; учет коэффициента формы топочных камер; совершенствование топологии систем;
Новые технологии ресурсоиспользования	использования вторичных ресурсов как сырья (стеклобой, металлолом, клинкерная пыль); замещение технологии «закачки в пласт» при нефтедобыче – резерв технологий нефтеизвлечения; использование попутного газа и газоконденсата – резерв газоперабатывающих технологий;

Термодинамические	снижение потерь конвекцией/излучением; применение промышленных тепловых насосов; повышение эффективности ТЭС – теплофикационные резервы;
Электротехнические/электротермические резервы	частотное регулирование электроприводов насосов; повышение эффективности электротермических установок; нормализация показателей качества электрической энергии; компенсация реактивной мощности предприятий и систем;
Использование возобновляемых источников энергии	получение тепловой энергии от НВИЭ; получение электрической энергии от НВИЭ; использование гибридных систем с НВИЭ;
Использования вторичных энергоресурсов	использование тепловых ВЭР; использование химических ВЭР; использование ВЭР избыточного давления; использование скрытой теплоты (внутренней энергии);
Новые источники энергии	использование водорода (синтез-газа) как топлива; использование топливных элементов; использование ядерно-термических источников энергии.

При оценке резервов энергосбережения для промышленных комплексов, можно выделить группу термодинамических резервов, или использование ВЭР. Кроме того, их применение также снижает вредное воздействия на окружающую среду, повышает и ресурсную эффективность производства.

## 3. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗЕРВОВ В Г.КРАСНОЯРСК.

### 3.1. Общая ситуация Красноярск

Рассмотрим пример возможной реализации использования подобных резервов, представленных в работе [1]. Красноярск – большой промышленный город и состояние атмосферного воздуха является серьезным экологическим вызовом для города. Город входит в топ самых грязных городов страны.[3]. Внутри города расположен Алюминиевый завод (КрАз), который производит почти треть всей продукции в России. Выбросы от завода, от котельных и ТЭЦ являются основной причиной режима «черного неба» в городе [8].

Однако, в соответствии с Федеральным проектом «Чистый воздух» с 2018 по 2024 год, уровень валовых выбросов загрязняющих веществ в наиболее грязных городах должен быть сокращен на 20%. [9].

### 3.2. Пути решения

Авторами были рассмотрены три варианта решения вопросы повышения энергетической эффективности города. Первый вариант подразумевает

замену угольных котельных путем модернизации ТЭЦ. Модернизация предполагает установку теплового насоса. В качестве низкопотенциального источника была выбрана охлаждающая вода технического водоснабжения. Выбор такого источника низкопотенциального тепла даст следующие преимущества: сокращение сбросного тепла, снижение температуры воды на входе в паровую турбину (ТП), повышение экологической эффективности.

Второй вариант состоит из модернизации производственных процессов и техническое переоснащение на КраЗ, что потребует значительных не только финансовых, но и временных затрат.[10, 11].

Для достижения нужного уровня выбросов загрязняющих веществ и снижение их воздействия необходимо осуществлять передачу сбросного тепла от завода в систему централизованного теплоснабжения. [11]. Для реализации передачи сбросного тепла важно эффективно использовать вторичные энергоресурсы на заводе. Наибольшие потери и, следовательно, потенциал использования энергии приходится на процесс электролиза и на систему оборотного водоснабжения. Предполагается в процессе электролиза установить воздушные теплообменные аппараты, а в системе оборотного водоснабжения установить ТНУ. Энергетический эффект от воздушных теплообменников составляет 2,4 млн Гкал, а от ТНУ 6 млн Гкал. После модернизации процессов, выбросы сократятся более чем в 1,5 раза. Завод может отдавать городу около 3 млн Гкал, в результате город может ликвидировать неэффективные и экологически опасные угольные котельные. Такая замена приведет к сокращению вредных выбросов на 15%. Но это будет возможно только при соблюдении технического регламента (параметры отпускаемого теплоносителя, температурный график, сменность и сезонность работы и т.д.). Экономическая эффективность зависит от многих параметров, в том числе и от технической возможности.

Третий вариант повышение энергетической эффективности города предполагает использования низкопотенциального тепла от реки Енисей. Енисей является самым мощным источником низкопотенциальной энергии, теоретическая мощности реки составляет 150-200 млн Гкал. В условиях города наиболее эффективным источником могут стать теплонаносные установки, использующие тепло речной воды. Благодаря этому варианту также можно отказаться от части угольных котельных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, чтобы развивать энергоэффективность страны нужны комплексные подходы. Необходимо рассматривать как каждую отрасль отдельно, так и в совокупности. Необходимо реализовать резервы, не только внутри предприятия, но и рассматривать как симбиоз с регионом

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гашо Е.Г** Мартынов А.В., Кутько Н.В., Чехранова О.А., Рудомазин В.В Ключевые приоритеты улучшения экологической ситуации мегаполиса с использова-

нием вторичных энергоресурсов // Надежность и безопасность энергетики. 2020.-Т13-№4.-с.273-281

2. **Сазанов Б. В.** Промышленные теплоэнергетические установки и системы : учеб. пособие для вузов / . - Москва : Издательский дом МЭИ, 2019. - ISBN 978-5-383-01246-8.
3. **Национальный** проект «Экология». Программа «Чистая страна». План сокращения выбросов в атмосферу в г.Красноярске. [электронный ресурс] режим доступа <https://strategy24.ru/rf/ecology/projects/natsionalnyy-proyekt-ekologiya> (Дата обращения 1.03.2022).
4. **Государственный** доклад о состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской . [электронный ресурс] режим доступа <https://www.economy.gov.ru/material/file/d81b29821e3d3f5a8929c84d808de81d/energyefficiency2019.pdf> (Дата обращения 22.02.2022)
5. **Баланс** энергоресурсов [электронный ресурс] режим доступа [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/2EuHouQF/en\\_balans2019.htm](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/2EuHouQF/en_balans2019.htm) (Дата обращения 22.02.2022)
6. **Энергетическая** стратегия России на период 2035 [Электронный ресурс].- Режим доступа [http://www.bigpowernews.ru/photos/0/0\\_Dyed1PNxWK4jYgNJ7rfdXtgpk2vEt4r.pdf](http://www.bigpowernews.ru/photos/0/0_Dyed1PNxWK4jYgNJ7rfdXtgpk2vEt4r.pdf) -(Дата обращения: 25.02.2022)
7. **Энергетический** баланс Российской Федерации [электронный ресурс] <https://www.iea.org/sankey/#?c=Russian%20Federation&s=Конечное%20потребление> (Дата обращения 20.02.2022)
8. **Государственный** доклад « о состоянии и об охране окружающей среды в Красноярском крае за 2017 год. Официальный портал [электронный ресурс] <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849/0/id/32983> (Дата обращения 01.03.2021)
9. **Федеральный** проект "Чистый воздух" (паспорт национального проекта "Экология", утвержденного президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16).Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. [электронный ресурс] <http://www.mnr.gov.ru> (Дата обращения 01.03.2021)
10. **Михалев И. О., Исламов С. Р.** Энерготехнологическое производство на основе частичной газификации углей низкой степени метаморфизма, ООО «Сибтермо», 2012 г., 5 с. . [электронный ресурс] <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/66Mikhailov.pdf> (Дата обращения 01.03.2021)
11. **Яковлева Е. Ю.** Возможность утилизации сбросного тепла при производстве алюминия / Е. Ю. Яковлева, О. А. Чехранова, В. В. Рудомазин // Зеленые кейсы. – Москва : Федеральное государственное автономное учреждение "Научно-исследовательский институт "Центр экологической промышленной политики" , 2020. – С. 64-69.

*В.Ю Чайкин<sup>1</sup>, А.Р. Шайхеева<sup>1</sup>, И.А. Султангузин<sup>1</sup>, Ю.В. Яворовский<sup>1</sup>,  
А.В. Скоробатюк<sup>2</sup>, А.Н. Нечаев<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет

«МЭИ», Россия

<sup>2</sup>ООО «Новый полюс»

<sup>3</sup>ООО «ТНС»

## ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ КОММУНИКАЦИЙ ПОДЗЕМНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ

### АННОТАЦИЯ

Основная цель работы – экспериментальное определение тепловых потерь в коммуникациях подземного теплоаккумулятора на основании данных, измеренных системой мониторинга, а также сравнение их с расчетными. Проведен расчет тепловых потерь в тепловой изоляции подземных и наземных коммуникаций.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире распространяется практика строительства зданий с использованием энергоэффективных технологий. Растет популярность концепции строительства пассивных домов, основные критерии которых: удельный расход тепловой энергии на отопление  $\leq 15$  кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год), общий расход первичной энергии  $\leq 120$  кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) [1,2]. Для климатических условий средней полосы России, не говоря уже о более северных районах нашей страны, такие стандарты труднодостижимы [3]. Однако развитие идеи строительства зданий с максимальным использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) прекрасно сочетается с требованием повышения энергоэффективности различных объектов, установленных законодательством. Для максимально эффективного использования солнечной энергии необходимо её сезонное аккумулирование. Одним из таких способов является использование подземного теплового аккумулятора. Данная статья посвящена различным методам расчёта тепловой изоляции для подобного типа аккумуляторов, расположенных в грунте.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе проведено экспериментальное определение тепловых потерь в коммуникациях подземного теплоаккумулятора на основании данных, полученных системой мониторинга, а также сравнение их с величинами тепловых потерь, полученными расчетным методом. Проведен расчет тепловых потерь в тепловой изоляции подземных и наземных коммуникаций. Исследование работы тепловой изоляции подземного теплоаккумулятора проводилось на базе экспериментального энергоэффективного дома-лаборатории расположенно в Пушкинском районе Подмосковья [4, 5].

Двухэтажное здание имеет общую площадь 200 м<sup>2</sup>. В здании осуществляется непрерывный мониторинг нескольких сотен различных параметров в течение длительного периода времени с последующим их анализом с целью исследования работы различного оборудования и определения его эффективности. В здании требуется иметь большое количество датчиков измерения температуры и влажности воздуха. Важной задачей является не только обработка полученных данных, но и выявление ошибок, возникающих из-за неправильной установки датчиков, которые приводят к некорректному сбору данных.

В исследуемом энергоэффективном здании в солнечные дни солнечные коллекторы в течение суток вырабатывают энергии в несколько раз больше, чем необходимо самому зданию на нужды отопления, горячего водоснабжения и вентиляции в этот период времени. Поэтому имеется возможность запастись «излишки» тепловой энергии, которые могут сохраняться в сезонном теплоаккумуляторе в течение длительных периодов времени. Теплоаккумулятор может использоваться как источник теплоснабжения в отопительный период.

С целью повышения энергетической эффективности системы теплоснабжения здания, использующего тепловой аккумулятор и солнечные коллекторы, необходимо провести обследование тепловой изоляции, определить и, если возможно, уменьшить существующие тепловые потери. Для этого требуется использовать методы обнаружения тепловых потерь в тепловой изоляции подземных и наземных коммуникаций, а также провести их расчет.

### 3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТРУБОПРОВОДАХ

Одним из способов уменьшения энергопотребления здания является использование ВИЭ для производства электрической и тепловой энергии [6]. При этом энергобаланс здания может стать энергоизбыточным, а здание перейдет в так называемую категорию «активного» здания, что в состоянии свести потребление энергии извне до уровня, близкого к нулевому. Существует множество различных исследований, в которых описан



выбор компонентов комбинированных солнечных систем, предполагающих длительное сохранение тепловой энергии [7- 11].

Вода в баке теплового аккумулятора таких систем, нагреваемая от солнечных коллекторов, достигает температуры в 80°C, а сам аккумулятор нуждается в повышенной теплоизоляции (с применением теплоизоляционных материалов толщиной до 500-600 мм [8]). До окончания ноября тепловой аккумулятор даёт возможность забирать тепловую энергию непосредственно из бака на нужды отопления. А затем, в течение продолжающегося ото-

пительного периода, использовать тепловой насос, используя воду в тепловом аккумуляторе как низкопотенциальный источник теплоты.

Примером сезонного аккумулятора тепловой энергии может служить емкость подземного межсезонного накопителя, расположенная в доме, построенном по стандартам Passivhaus и расположенном в Голуэе, Ирландия.

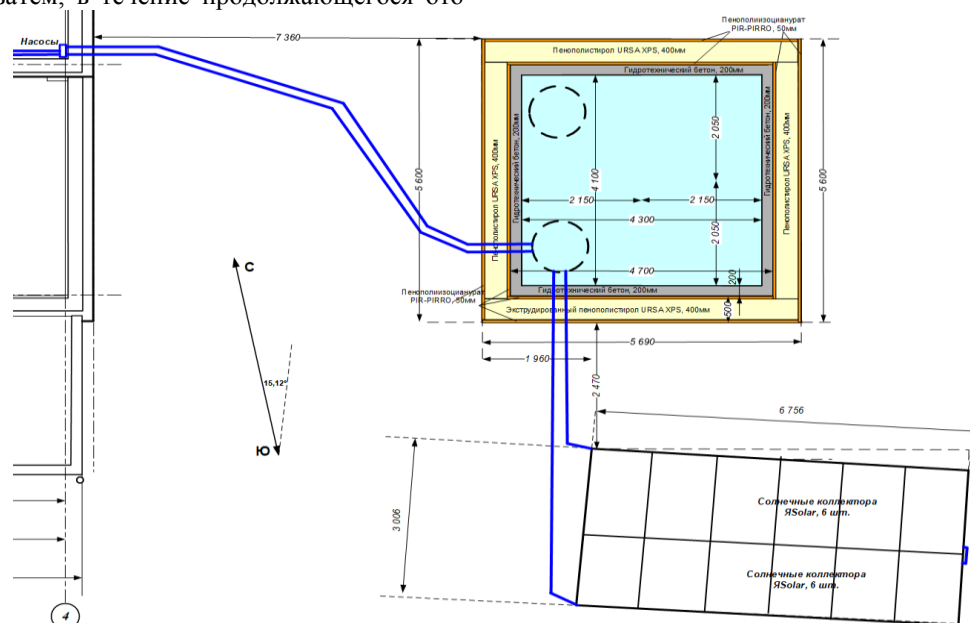


Рис.2. Чертеж схемы прокладки коммуникаций

Эксперимент, проведенный на протяжении года, продемонстрировал, что средняя температура в подземном сезонном теплоаккумуляторе изменилась с 65 °С в августе до 20 °С в январе [8]. Таким образом, дом отапливался преимущественно за счёт теплоаккумулятора без теплового насоса. При уменьшении температуры воздуха в комнате ниже 19,5 °С включался электродогрев мощностью 1,4 кВт. Кроме этого, использовался дополнительный электрический подогрев водяного тёплого пола мощностью 0,81 кВт в те моменты, когда существовала нехватка тепловой энергии, поступающей от солнечных панелей или из теплоаккумулятора, для удовлетворения потребности в отоплении помещения.

Аккумуляция тепловой энергии - крайне важный и актуальный вопрос. Подземное сезонное хранение тепловой энергии может стать жизнеспособным решением с возможностью широкого применения в будущем. Системы, сочетающие сезонное накопление тепловой энергии с тепловым насосом, работающим от солнечной энергии, изучались во многих работах.

Для определения различных параметров в теплоаккумуляторе, солнечных коллекторах и других элементах таких систем применяются разнообразные современные системы мониторинга.

### 3.1 Подземный аккумулятор

Для изучаемого экспериментального энергоэффективного дома-лаборатории было принято решение использовать подземный аккумулятор тепловой энергии, прототипом которого стал сезонный аккумулятор, рассмотренный в работе [8]. В мае 2021 года было начато строительство теплового аккумулятора. По состоянию на май 2022 года, теплоаккумулятор введен в эксплуатацию, происходит накопление энергии от солнца за счет использования солнечных коллекторов. Бетонный аккумулятор располагается на расстоянии 5 метров от дома (рис. 2). Емкость представляет собой цилиндр с размерами 4,2 м x 4,2 м x 2,2 м. Толщина дна составляет 0,2 м, крышки – 0,15 м, стен – 0,2 м, высота столба воды – 2 м, воздушной подушки – 0,2 м (нужна для расширения воды во время перехода в твердую фазу).

Тепловая изоляция подземной части более подробно изучается в работе [13]. Используется два вида тепловой изоляции: фольгированный пенополиизоцианурат PIR-PIRRO и экструдированный пенополистирол URSA XPS. Общая толщина изоляции составляет от 500 до 600 мм.

Экструдированный пенополистирол поглощает основную часть тепла, а пенополиизоцианурат не-

обходим для устранения намокания пенополистирола от грунтовой влаги и дополнительного снижения тепловых потерь, также снижает нагрев среднего слоя до температуры, гарантирующей отсутствие выделения токсичного газа [12].

### 3.2 Приборы учета

Важной частью исследования работы сезонного аккумулятора является организация сбора и хранения данных, а также их обработка. Необходимо учитывать, какие приборы установлены в здании и каким образом осуществляется сбор данных.

Для контроля работы аккумулятора используются следующие измерительные приборы:

- термометры сопротивления Pt-1000 (4 шт.);
- термометры сопротивления Pt-100 КТС-Б (8 шт.);
- тепловычислитель КАПАТ-307;
- расходомеры ZENNER-20 (4 шт.);
- датчики температур DS18B20 (68 шт.).

Датчик DS18B20 является прибором для измерения температур в грунте и теплоизоляции. С каждой из сторон теплоаккумулятора расположены от 13 до 21 датчиков. Они расположены во всех слоях теплоизоляции на расстоянии 1000 мм друг от друга, в грунте для измерения температур на удалении от бака-аккумулятора, а также под ним.

### 3.3 Расположение коммуникаций

Схема прокладки трубопроводов представлена на рис. 2. Трубы от коллекторов идут в технический колодец подземного аккумулятора, а далее вместе с трубопроводами от теплообменников идут в подвал дома. Для трубопроводов было принято использовать гофрированные трубы из нержавеющей стали с теплоизоляцией K-FLEX SOLAR HT. Этот материал был выбран благодаря его долговечности, и возможности его работы в агрессивных условиях. Дополнительно трубопроводы усилены пластиковой гофрированной трубой во избежание механических повреждений.

## 4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ТРУБОПРОВОДАХ

Для определения тепловых потерь через тепловою изоляцию были произведены расчеты. В качестве исходных данных были использованы измеренные температуры и расходы теплоносителя в системе, температура грунта и воздуха, конструктивные размеры труб и тепловой изоляции. В расчетах использована температура внутри трубопровода, равная 43 °С. Эта температура получена с использованием системы мониторинга «ПолиТЭР» [14,15]. Её значение поступает с термосопротивления Pt-1000, установленного на выходе из солнечного коллектора, и передается по трехпроводной схеме.

Для повышения точности расчетов было принято решение разделить трубопровод на два участка. Первый участок трубопровода имеет надземное

расположение и контактирует с наружным воздухом. В качестве температуры окружающего воздуха используется значение из системы архивирования погодных данных, равное 13 градусам. Длина этого участка составляет  $l_1=4$  метра.

Второй участок имеет подземное расположение, и имеет длину, равную  $l_2=18$  метрам. Это расстояние от опоры солнечных коллекторов, до непосредственного входа в дом, где располагается распределительная аппаратура. В этом же месте установлен тепловычислитель, который производит сбор остальных параметров. Температура окружающей среды на данном участке принята 5 градусов, как среднее значение температуры грунта за рассматриваемый временной период.

Остальные величины, используемые в расчете, имеют следующие значения:

- диаметр трубопровода  $d_1 = 0,025$  м;
- толщина стенки трубопровода  $\delta = 0,001$  м;
- материал трубопровода: нержавеющая сталь (коэффициент теплопроводности  $\lambda_{тр} = 18$  Вт/(м·°С));
- толщина теплоизоляции трубопровода  $\delta_{из} = 0,013$  м;
- внешний слой для механической защиты: гофрированные двуслойные ПНД трубы диаметрами 110 и 200 мм;

Материал теплоизоляции: K-FLEX SOLAR HT (коэффициент теплопроводности  $\lambda_{из} = 0,039$  Вт/(м·°С)).

### 4.1. Расчет теплового потока и температуры.

Оценка тепловых потерь производилась по формулам для аналитического расчета. Был рассчитан тепловой поток по формуле:

$$q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_{w1} - t_{w3})}{\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{из}} \ln\left(\frac{d_3}{d_2}\right)}; \quad (1)$$

где  $t_{w1}$ —температура теплоносителя, в данном случае, водный раствор пропиленгликоля,  $t_{w2}$ —температура окружающего воздуха. Остальные данные приняты по условиям, описанным выше.

В итоге расчета были получены значения тепловых потерь в рассмотренных условиях для двух участков трубопровода. Надземный участок имеет тепловые потери 13,6 Вт/м, подземный участок 21,1 Вт/м. Тепловые потери рассчитывались по формуле:

$$Q = q \cdot l \quad (2)$$

Эти значения равны 0,054 кВт и 0,42 кВт, соответственно, что в сумме составляет 0,474 кВт. Также в данных условиях была рассчитана температура на границе трубопровода и воздуха, с помощью программы K-FLE, получено значение, равное 14,8 градусам.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В КОМУНИКАЦИЯХ

### 5.1. Сбор данных через систему мониторинга

Для определения тепловых потерь были выгружены и обработаны данные из системы «ПолиТЭР». Параметры получены от термосопротивления Pt-1000 и от тепловычислителя КАРАТ-307. В связи с особенностями расположения тепловычислителя, имеется возможность измерить падение

температуры по ходу движения теплоносителя от солнечного коллектора до здания. Эта информация позволяет определить тепловые потери.

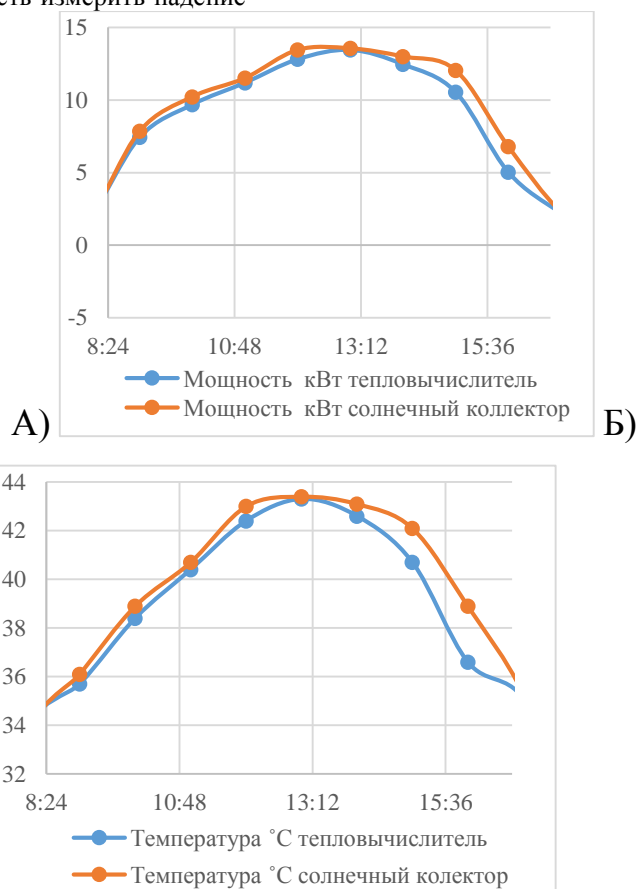


Рис. 3. Графики тепловой мощности (А) и температуры (Б) 23 мая 2022 г.

По этим экспериментальным данным построены зависимости, представленные на рис. 3. На них изображены изменение тепловой мощности и изменение температур солнечного коллектора во времени. Средняя тепловая мощность, зарегистрированная тепловычислителем в доме, равна 8,66 кВт, а средняя тепловая мощность, полученная коллектором от солнца, составила 9,24 кВт. Тепловые потери определялись по температурам и тепловым мощностям между точками на выходе из коллектора и на входе в дом. Потери составили в течение дня в среднем 0,49 кВт, что составляет  $0,49/8,66=5,7\%$  от получаемой тепловой мощности от солнца.

Эти значения соизмеримы с результатами проведенных расчетов. Относительная разность между ними составила  $(0,49-0,474)/0,49=3\%$ .

## 5.2. Тепловизионное обследование изоляции

Изучение распределения температуры на поверхности теплоаккумулятора проводилось с помощью двух тепловизоров: Seek Thermal Reveal PRO и Testo 882.

Для определения тепловых потерь через теплоизоляцию были проведены тепловизионные измерения на поверхности тепловой изоляции теплоаккумулятора и трубопроводов.

На рис. 4 представлены термографические снимки выхода трубопровода из солнечного коллектора. На них отмечена температура до (рис. 4А) и после (рис. 4 Б) установки теплоизоляции. Благодаря проделанной работе удалось локально понизить температуру поверхности с 45,8 °С до 16,0°С. Это значение соответствует расчетам, проведенным в программе K-FLEX, с погрешностью 7%, и хорошо сочетается с расчетами теплового потока и температуры.

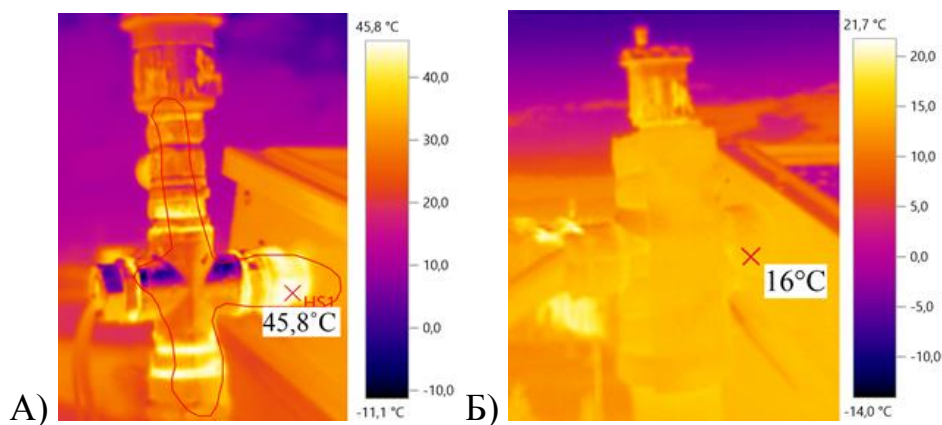


Рис. 4. Термографическая съемка поведения эксперимента до(А) и после(Б)

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенного эксперимента были подтверждены результаты теплового расчета. Была определена тепловая мощность, вырабатываемая на солнечных коллекторах, равная 8,5 кВт. Потери в трубопроводе составили 0,49 кВт, что составляет 5,7% от выработки тепловой энергии.

После установки тепловой изоляции на исследуемом участке трубопровода температура понизилась с 45,8 °С до 16,0 °С. Наибольшее расхождение между результатами расчета и эксперимента для температур при термографической съемке составило 7%, а для теплового потока 3%.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были представлены результаты экспериментального и расчетного определения тепловых потерь в тепловой изоляции подземных и надземных коммуникаций теплоаккумулятора, описаны методы, с помощью которых получены эти результаты.

В результате эксперимента монтаж дополнительной теплоизоляции позволил снизить тепловые потери, а также приблизиться к теоретически полученным значениям тепловых потерь. Проведённые расчеты подтверждены данными, полученными из систем мониторинга и результатами тепловизионной съемки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Файст В.** Основные положения по проектированию пассивных домов. М.: ООО «KONTIPRINT», 2015. 144 с.
2. **Развитие** теоретических и практических основ концепции пассивного дома, А.О. Пилипенко, журнал «Архитектура и строительство» 1/2014 с.
3. **Hill V.** Passive house development in Russia // III World Summit SmartEnergy Russia. 26-27 March 2019, Moscow. 95 p.
4. **Разработка** и исследование сезонного аккумулятора теплоты и холода для системы энергоснабжения здания / И. А. Султангузин, Б. А. Христенко, В. Ю. Чайкин [и др.] // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. — 2021. — № 3(231). — С. 39-44.
5. **Сравнение** результатов энергетического моделирования жилого дома с помощью разных программных средств Ю.В. Яворовский, И.А. Султангузин, Д.А. Кругликов, И.Д. Калякин, Т.В. Яцок

6. **Бутузов А.В.** Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии [Текст] / Бутузов А.В., Бутузов В.В. — М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015. — 304 с.
7. **Султангузин И.А.** Сезонный аккумулятор теплоты и холода для системы энергоснабжения здания [Текст] / Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю. [и др.] — // Сантехника, Отопление, Кондиционирование, 2021. — №3 — С. 39 – 44.
8. **Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey J.T.Jr.** A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modeling // Inter-national Journal of Ambient Energy, 2014. № 35. P. 37–50.
9. **Sultanguzin I.** Research and Development of Seasonal Heat and Ice Storage for Energy Supply System of Building [Текст] / I. A. Sultanguzin, A. Sh. Alimgazin, V. Yu. Chaikin [и др]. — 2021.
10. **Yumrutas R.** Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system with a heat pump and an underground energy storage tank [Электронный ресурс]. / R. Yumrutas, M. Unsal — // Solar Energy, 2012. — Vol. 86 — С. 983 – 993.
11. **Христенко Б.А.** Проектирование льдоаккумулятора и внедрение технологии в систему теплоснабжения здания [Текст] / Христенко Б.А., Кругликов Д.А., Чайкин В.Ю. [и др] — // Энергосбережение — теория и практика: Труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. — М: НИУ «МЭИ», 2020. — С. 36 – 42.
12. **Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J.** A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. № 109. P. 71–84.
13. **А.Р. Шайхеева, В.Ю. Чайкин, И.А. Султангузин,** Исследование режимов работы сезонного аккумулятора тепловой энергии энергоэффективного дома // В данном сборнике.
14. **Абдуллин В.В., Шнайдер Д.А., Курзанов С.Ю., Яворовский Ю.В.** Использование технологии "интернета вещей" в отоплении зданий: упреждающее управление, распределённый мониторинг, интеллектуальная балансировка // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. — 2018. — № 8(200). — С. 54-58.,
15. **Чайкин, В.Ю.** Развитие системы мониторинга энергоэффективного пассивного дома / В. Ю. Чайкин, В. А. Петров // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : Тезисы докладов, Москва, 12–13 марта 2020 года. — Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2020. — С. 685.
16. **Басалаев А.А.** Распределенное управление теплоснабжением зданий на основе сенсорных сетей: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / А. А. Басалаев ; Юж.-Урал. гос. ун-т.- Челябинск, 2018.- 22 с.

*А.Р. Шайхеева<sup>1</sup>, В.Ю. Чайкин<sup>1</sup>, И.А. Султангузин<sup>1</sup>, Ю.В. Яворовский<sup>1</sup>,*

*А.Н. Нечаев<sup>2</sup>, А.В. Скоробатюк<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

<sup>2</sup>ООО «ТНС», Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «Новый полос», Москва, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА**

### **АННОТАЦИЯ**

Существует сезонное несоответствие между доступностью солнечной энергии летом и потребностью в отоплении помещений зимой, и сезонное накопление солнечной энергии является способом компенсировать это несоответствие. Сезонный аккумулятор тепловой энергии представляет собой средство, благодаря которому можно хранить и использовать тепловую энергию в течение нескольких месяцев.

В данной статье приводится описание систем мониторинга «ПолиТЭР» и управления «ТеплоМонитор». Был произведен анализ экспериментальных данных о совместных режимах работы подземного теплового аккумулятора с солнечными коллекторами во время весеннего периода, а также при переходе на летний период с использованием систем мониторинга и управления. Важной частью исследования являлось сравнение с результатами расчетов в программе TRNSYS. Основной целью была оценка эффективности системы сезонного аккумулирования тепловой энергии.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Аккумуляция тепловой энергии крайне важный вопрос, который остается актуальным и по сей день. В давние времена люди использовали как тепловые аккумуляторы золу от костра, горячие камни, позже камины и печи. В наши дни технологии продвинулись дальше, и теперь существуют их различные типы: с жидким, твердотельным или паровым теплоносителем, устройства, использующие отбор теплоты фазового перехода, солнечные бассейны.

Солнечное излучение — неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии, но оно крайне непостоянно и зависит от времени года, погодных условий или времени суток. Использование солнечной энергии для аккумуляции тепловой энергии в течение нескольких дней, недель и даже месяцев позволит не только решить важные экологические

проблемы, но и повысить эффективность использования энергии.

Подземное сезонное хранение солнечной энергии может стать хорошим решением с возможностью широкого применения в будущем. Преимуществами систем с тепловыми насосами и использованием энергии Солнца является то, что они признаны самыми чистыми и энергоэффективными системами для обогрева и охлаждения [1].

Существуют два варианта сезонного хранения теплоты и холода: в теплоаккумуляторе [2,3] и льдоаккумуляторе [4—6], которые расположены под землей и нагреваются солнечными коллекторами вместе с тепловым насосом. При выборе между ними было решено использовать первый вариант сезонного хранения теплоты и холода. Это объясняется тем, что использование льдоаккумулятора оказалось не выгодным в условиях России. Нет официальных данных о его применении в России в качестве низкопотенциального источника тепла для тепловых насосов типа «рассол — вода». Запасенная тепловая энергия и холод могут использоваться для отопления и кондиционирования здания.

Объектом исследования является сезонный аккумулятор в поселке Ашукино, в Пушкинском районе Московской области [3,5,6]. В энергоэффективном доме основным источником тепловой энергии в весеннее и летнее время служат солнечные коллекторы [7]. В течение суток они вырабатывают энергии в несколько раз больше, чем потребляет дом. Поэтому имеется возможность запастись «излишки» энергии, которые будут храниться в сезонном теплоаккумуляторе в течение длительного времени. А теплоаккумулятор может использоваться как основной источник тепловой энергии в отопительный период.

В сезонном аккумуляторе осуществляется постоянная регистрация различных параметров за длительный период времени с последующим их анализом. В дальнейшем все показания с приборов будут собираться, обрабатываться в специальных системах мониторинга.

## 2. ПОСТАВЛЕННЫЕ ЗАДАЧИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

- Анализ и описание процесса организации сбора данных с помощью производственно-технического комплекса «ПолиТЭР».
- Анализ и описание программного модуля управления системой энергоснабжения дома Тепло-Монитор.
- Обработка данных работы подземного теплового аккумулятора с солнечными коллекторами в весенний период для прямого отопления дома.
- Обработка данных работы подземного теплового аккумулятора с солнечными коллекторами при переходе на летний режим постепенного нагрева воды в аккумуляторе.
- Сравнение экспериментальных данных о режимах работы подземного теплоаккумулятора с результатами расчетов в программе TRNSYS.
- Оценка эффективности системы сезонного аккумулирования тепловой энергии.

## 3. ИССЛЕДОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА И СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

### 3.1. Сезонный аккумулятор тепловой энергии в Ашукино

Теплоаккумулятор располагается на расстоянии 5 метров от дома. Выполнен из гидротехнического бетона с толщиной теплоизоляции 50 см и 60 см. За

прототип тепловой схемы с теплоаккумулятором был взят «пассивный дом» в Ирландии.

Теплоизоляция сезонного аккумулятора была выбрана на основе работы [8], в частности, использование экструдированного пенополистирола и пенополиизоцианурата. Её можно разделить на 3 части по месту конструкции: крыша, стена, дно.

Крыша:

- 1 верхний слой – пенополиизоцианурат PIR-PIRRO плита толщиной 0,05 м.
- 2 слой – экструдированный пенополистирол URSA XPS N-III суммарной толщиной 0,5 м;
- 3 слой – пенополиизоцианурат PIR-PIRRO толщиной 0,05 м.

Стена:

- 1 слой – пенополиизоцианурат PIR-PIRRO толщиной 0,05 м;
- 2 слой – экструдированный пенополистирол URSA XPS N-III суммарной толщиной 0,4 м;
- 3 слой – пенополиизоцианурат PIR-PIRRO толщиной 0,05 м.

Дно:

- 1 слой – щебень пеностекла толщиной 0,2 м;
- 2 слой – экструдированный пенополистирол URSA XPS N-III суммарной толщиной 0,4 м;
- 3 слой – пенополиизоцианурат PIR-PIRRO толщиной 0,05 м.

На рис. 1 представлен эскиз и геометрические размеры модели сезонного теплоаккумулятора, работающего совместно с солнечными коллекторами.

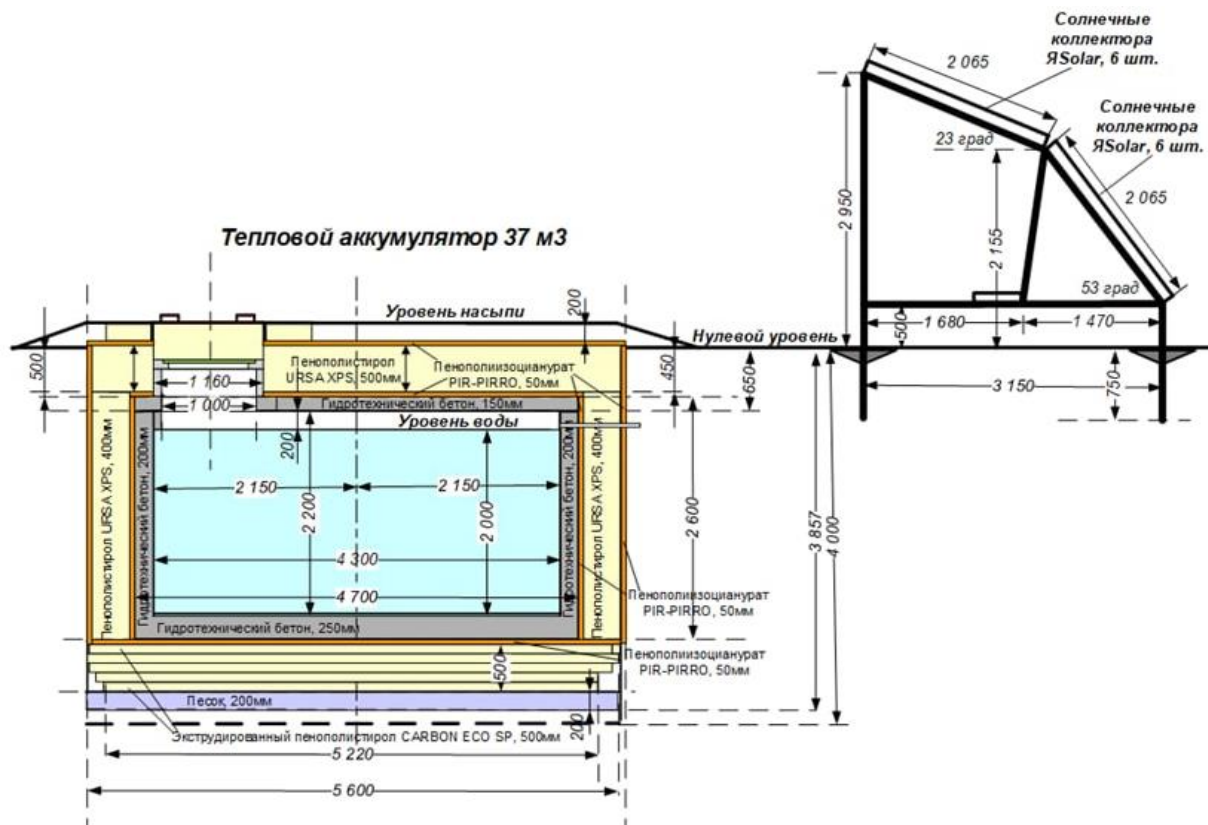


Рис. 1. Геометрия модели сезонного теплоаккумулятора с солнечными коллекторами



### 3.2. Использование систем мониторинга и управления

За период от начала работы систем мониторинга до настоящего времени было собрано и обработано значительное количество уникальных данных. Они представляют большую ценность, так как их можно получить, только проведя эксперимент на действующем реальном объекте (энергоэффективном доме). Данные, собранные системами мониторинга, показывают фактическую картину работы оборудования, и процессы, происходящие в режиме реального времени. Сложность их обработки состоит в том, что у каждой системы мониторинга существует свой формат представления данных, и для дальнейшей работы их необходимо привести к одному формату. Для этого была использована программа MS Excel.

Системой мониторинга являются программно-технические комплексы «ПолиТЭР» [9,10]. ПТК «ПолиТЭР» позволяет проводить сбор и мониторинг различных технологических параметров (температура, давление, расход, влажность и другие) из разных источников с временным интервалом в одну минуту. Используя данные, поступающие от теплосчётчиков, можно получить доступ к полной картине энергопотребления дома.

ПТК «ПолиТЭР» выполняет следующие функции: создание доступа через web-интерфейс с целью чтения данных, полученных от термодатчиков, теплосчётчиков, беспроводных датчиков температуры, расходомеров и электросчётчиков; возможность чтения из базы данных, отображения параметров в формате мнемосхем и вывода на печать сохранённых параметров с датчиков из архивов в виде таблиц, графиков и отчетов.

Программой для управления системами энергоэффективного дома является ТеплоМонитор. В нее включены web-сервисы сайта teplomonitor.ru и аппараты, напрямую контролирующую работу системы отопления.

Система управления «ТелоМонитор» включает в себя два контроллера SmartWeb X2 и SmartWeb K.

С помощью контроллера SmartWeb X2 в доме осуществляется:

- управление «тёплым полом» 1-го этажа;
- управление потолком 2-го этажа;
- управление температурой ГВС;
- управление тепловым насосом;
- управление солнечными коллекторами;
- управление нагревом в баке-аккумуляторе объемом 500 л;
- сбор информации о системе.

На сегодняшний день система обеспечивает поддержание необходимой температуры в контуре ГВС и комфортной комнатной температуры. Чтобы заданная температура, определяемая по показаниям датчиков температуры, поддерживалась, система устанавливает нужный режим работы клапанов и насосов.

SmartWeb X2 было недостаточно для управления всем энергоэффективным домом, поэтому был добавлен контроллер SmartWeb K.

На рис. 2 приведены температуры в различных элементах и схема управления SmartWeb K. Под Снеготайкой понимается сезонный аккумулятор тепловой энергии, Солнце-Б и Солнце-А – солнечные коллекторы.

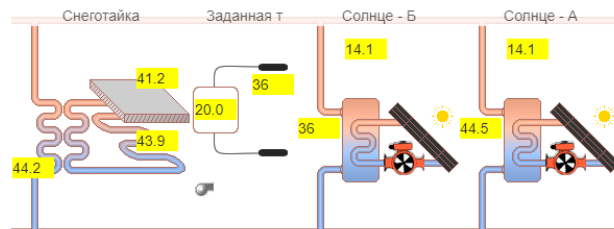


Рис. 2. Схема системы управления (SmartWeb K)

С помощью контроллера SmartWeb K осуществляется:

- управление солнечными коллекторами;
- управление нагревом в сезонном аккумуляторе.

## 4. ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ

### 4.1. Работа систем дома за отопительный период

Для изучения работы различных систем здания за отопительный период, производился сбор показаний с приборов учета и обработка данных из системы мониторинга.

На рис. 3 показано изменение внутренней температуры в доме за 5 сезонов (2017 – 2022 гг.) при отоплении тепловым насосом. С каждым годом температура в помещении становится более комфортной.

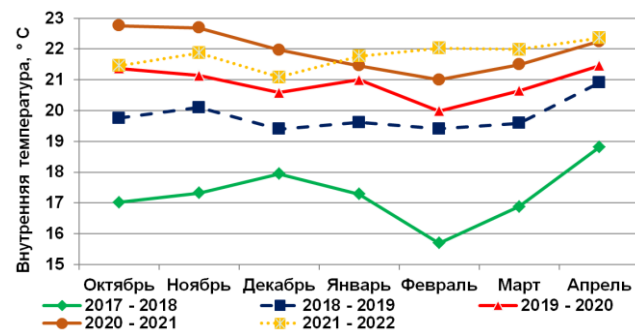


Рис. 3. График изменения внутренней температуры в доме

Оптимальной внутренней температурой в доме считается 22 °C с диапазоном изменения температур 21 – 23,5 °C во время отопительного периода. При изменении температуры наружного воздуха в 2021 – 2022 году, температура внутри здания поддерживалась на стабильном уровне. Средняя температура составляет примерно  $t_{\text{вн}}^{\text{ср}} = 21,7$  °C. При этом в 2019 – 2020 и 2020-2021 годах можно наблюдать такую же ситуацию, внутренняя температура лежит в допустимом диапазоне.

На рис. 4 показано изменение средней мощности теплового насоса, наружной температуры и внут-

ренной температуры за отопительный период в 2021 – 2022 гг.

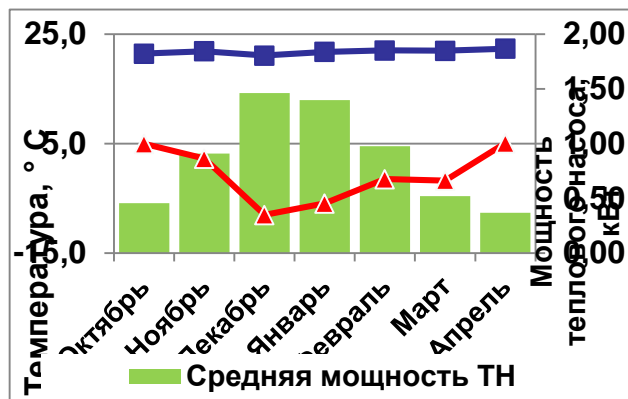


Рис. 4. График изменения средней мощности теплового насоса, наружной и внутренней температур

По графику потребления электроэнергии тепловым насосом в зависимости от месяца года (рис. 5) было определено, что произошло сокращение времени работы теплового насоса, и вместо него тепловую нагрузку покрывают солнечные коллекторы, введенные в эксплуатацию зимой 2022 года. Среднемесячное снижение потребления электроэнергии тепловым насосом в 2021 – 2022 г.г. по сравнению с 2018 – 2021 г.г. составило 146 кВт·ч или 37%.

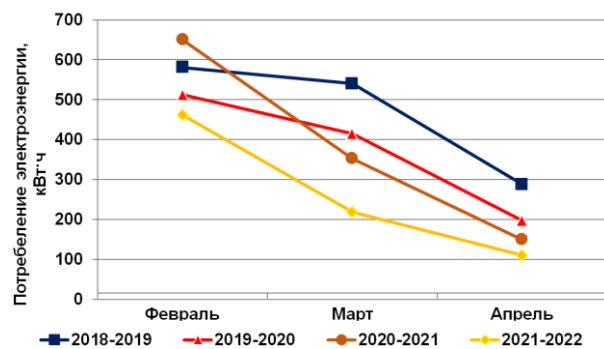


Рис. 5. График потребления электроэнергии тепловым насосом в зависимости от месяца года

#### 4.2. Работа подземного теплового аккумулятора с солнечными коллекторами

Весенний период в рассматриваемом энергоэффективном доме характеризуется тем, что прекращается работа теплового насоса, и тепловая энергия генерируется с помощью солнечных коллекторов. Проанализировав график тепловой мощности теплообменного аппарата сезонного аккумулятора и солнечных коллекторов (рис. 6), можно определить, что точкой перехода на летний режим является 8 мая 2022 года.

На летнем режиме работы вся тепловая энергия, полученная от солнечных коллекторов, направляется по трубопроводам в сезонный теплоаккумулятор. Определение величины теплотерь на трассе от солнечного коллектора до сезонного теплоаккумулятора уже рассмотрено в статье [11].

Увеличение температуры воды в сезонном аккумуляторе составило 48 °С (естественный прирост) (рис. 7).

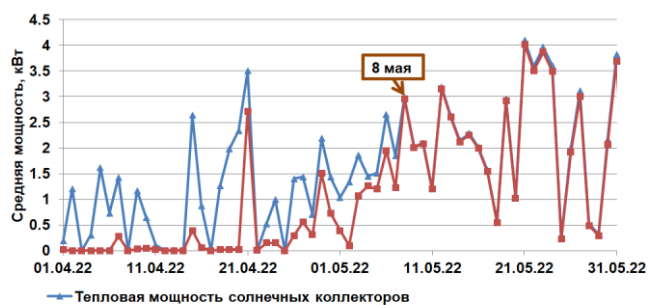


Рис. 6. График тепловой мощности с 1 апреля по 31 мая

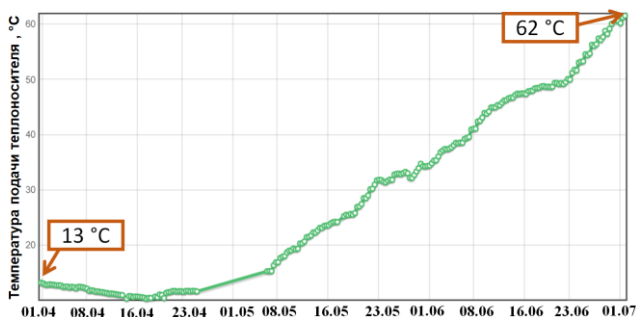


Рис. 7. График изменения температуры в сезонном аккумуляторе с 1 апреля по 1 июля

#### 4.3. Сравнение экспериментальных данных с полученными при моделировании сезонного аккумулятора

Для того чтобы приблизительно определить, какая температура будет в сезонном аккумуляторе во время отопительного сезона и на какой период времени хватит запасенной тепловой энергии, была использована программа TRNSYS [12]. В ней была разработана схема сезонного аккумулятора с солнечными коллекторами и тепловой нагрузкой, которая должна отображать реальное поведение системы [13].

Результаты после моделирования (рис. 8) охватывают период времени с 1 мая 2022 года по 1 января 2024 года. На данный момент можно судить о совпадении результатов только по 1 июля 2022 года. Сравнение данных из системы мониторинга «ПолиТЭР» и итоги моделирования отображены в табл. 1.

Таблица 1 – Сравнение результатов

Дата	Температура в подземном аккумуляторе, °С	
	TRNSYS	«ПолиТЭР»
1 мая	10	13
15 мая	29	19
1 июня	47	32
15 июня	54	44
1 июля	62	55

Погрешность температуры воды в сезонном аккумуляторе в программе TRNSYS по сравнению с экспериментальными данными 1 июля составляет  $1 - 55/62 = 11\%$ . Разница в температурах объясняется тем, что присутствует отличие в метеорологических



данных TRNSYS с теми, что были в действительности с 1 мая по 1 июля. В частности, в течение мая и в первой половине июня было немного безоблачных дней, но за последнюю неделю июня было солнеч-

но, что позволило приблизиться результатам моделирования к экспериментально полученным данным.



Рис.8. График температур в сезонном аккумуляторе

#### 4.4. Оценка эффективности системы сезонного аккумулирования тепловой энергии

Оценка эффективности системы сезонного аккумулирования тепловой энергии позволит узнать, насколько сократиться время работы теплового насоса. Для этого необходимо узнать, какое количество тепловой энергии поступает в дом. Оценку эффективности можно осуществить только примерными расчётами, так как на данный момент еще нет данных за октябрь и ноябрь 2022 года, поэтому для анализа работы систем в эти месяцы будут использоваться результаты моделирования в TRNSYS за 2022 год.

Фактическое потребление электроэнергии тепловым насосом было снижено на  $1260 - 871 = 389$  кВт·ч в феврале, марте и апреле 2022 г.

Тепловой насос по расчетам TRNSYS начнет работать 10 ноября, следовательно, октябрь и часть ноября здание будет отапливать только сезонный аккумулятор.

Суммарная экономия электрической энергии осенью должна составить приблизительно 560 кВт·ч за счет сезонного аккумулирования тепловой энергии.

Таким образом, можно сэкономить в зимне-весенний период 389 кВт·ч и в осенний период 560 кВт·ч, что в сумме дает 949 кВт·ч. Эксперимент осенью либо подтвердит эти данные, либо будет необходимо сделать коррекцию.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были проанализированы режимы работы сезонного аккумулятора и работа систем в отопительный период.

Анализ результатов мониторинга позволил обнаружить, что потребление электроэнергии тепловым насосом с февраля по март 2022 года упало на 37 % по сравнению с предыдущими отопительными сезонами благодаря работе солнечных коллекторов.

Естественный прирост температуры составил 48 °C за период с 1 апреля по 1 июля.

Тепловой насос по расчетам TRNSYS начнет работать 10 ноября.

Максимальное значение температуры воды в подземном аккумуляторе, полученное по расчетам в программе TRNSYS, 72 °C.

Несоответствие температуры воды в сезонном аккумуляторе результатам, полученным в программе TRNSYS, в сравнении с экспериментальными данными на 1 июля, равное 11 %, объясняется отличием в метеорологических данных.

Количественная оценка эффективности системы сезонного аккумулирования тепловой энергии позволила определить, что за отопительный период можно сэкономить 949 кВт·ч электрической энергии.

При дальнейшей эксплуатации и исследовании сезонного аккумулятора планируется собрать и обработать данные с приборов, произвести фактическую оценку эффективности сезонного аккумулирования тепловой энергии за отопительный период 2022-2023 год, подтвердить дату начала и окончания работы теплового насоса, определенную расчетным методом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Yumrutas R. and M. Unsal.** Energy analysis and modeling of a solar assisted house heating system

- with a heat pump and an underground energy storage tank // *Solar Energy*, 2012. № 86. P. 983 – 993.
2. **Clarke J., Colclough S., Griffiths P., McLeskey J.T.Jr.** A passive house with seasonal solar energy store: in situ data and numerical modeling // *International Journal of Ambient Energy*, 2014. № 35. P. 37 – 50.
  3. **Султангузин И.А., Христенко Б.А., Чайкин В.Ю., Яцюк Т.В.** Сезонный аккумулятор теплоты и холода для системы энергоснабжения здания // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*, 2021. №3, С. 39 – 44.
  4. **Carbonell D., Philipp D., Haller M.Y., Frank E.** Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced // *Solar World Congress 2013. The International Solar Energy Society (ISES). Cancún, Mexico*, 2013. P. 2342 – 2352.
  5. **Христенко Б.А., Кругликов Д.А., Чайкин В.Ю.** Проектирование льдоаккумулятора и внедрение технологии в систему теплоснабжения здания // *Энергосбережение — теория и практика: Труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, НИУ «МЭИ», 19 – 23.10.2020.* — Курск: Изд-во «Университетская книга», 2020. С. 36 – 42.
  6. **Маринина С.С., Яворовский Ю.В., Султангузин И.А.** Солнечное теплоснабжение индивидуального дома с использованием льдоаккумуляторной установки // *Энергосбережение — теория и практика: Труды X Межд. школы-семинара молодых учёных и специалистов. Москва, НИУ «МЭИ», 19 – 23.10.2020.* — Курск: Изд-во «Университетская книга», 2020. С. 146 — 150.
  7. **Бутузов А.В., Бутузов В.В.** Использование солнечной энергии для производства тепловой энергии // М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015. С. 304.
  8. **Villasmil W., Fischer L.J., Worlitschek J.** A review and evaluation of thermal insulation materials and methods for thermal energy storage systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. № 109. P. 71 – 84.
  9. **Абдуллин В.В., Шнайдер Д.А., Курзанов С.Ю., Яворовский Ю.В.** Использование технологии «интернета вещей» в отоплении зданий: упреждающее управление, распределённый мониторинг, интеллектуальная балансировка // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*, 2018. №8, С. 39 – 44.
  10. **Шнайдер Д.А., Абдуллин В.В., Басалаев А.А.** «Умные» технологии в действии: упреждающее управление отоплением здания с использованием ПТК «ПолиТЭР» // *Мат. XXXVI Межд. науч.-практ. конф. «Коммерческий учёт энергоносителей».* 29 апреля 2016. — СПб., 2016. С. 187 – 200.
  11. **Чайкин В.Ю., Шайхеева А.Р., Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Скоробатюк А.В., Нечаев А.Н.** Тепловая изоляция коммуникаций подземного аккумулятора теплоты // В данном сборнике.
  12. **Sweet M.L., McLeskey J.T. Jr.** Numerical simulation of underground seasonal solar thermal energy storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS / *Solar Energy*, 2012. № 86. P. 289 – 300.
  13. **Экспериментальное** исследование режимов работы сезонного аккумулятора тепловой энергии энергоэффективного дома / Шайхеева А.Р. // *Выпускная квалификационная работа* — М.: НИУ «МЭИ», 2022. 81 с.

*Н.А. Белехова<sup>1</sup>, И.А. Султангузин<sup>1</sup>, Ю.В. Яворовский<sup>1</sup>, Б. Бу Дакка<sup>1</sup>, А.И. Бартенев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, кафедра ПТС, ИЭВТ «НИУ «МЭИ»

## **СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВА, ХРАНЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ СЕЗОННОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ ДОМЕ**

### **АННОТАЦИЯ**

В современном мире все чаще поднимаются вопросы по построению домов из экологически чистых безопасных материалов с минимальным потреблением электроэнергии, получаемой от возобновляемых источников. В результате чего необходимо разрабатывать системы по производству, хранению и использованию водорода для сезонного аккумулирования. Водород выгодно аккумулировать, запасать в баках в летние месяцы, когда затраты электроэнергии на освещение, отопление и горячее водоснабжение минимальны, в несколько раз меньше вырабатываемой солнечными панелями энергии. Его можно долгое время хранить в баллонах и преобразовывать в электрическую энергию зимой, когда температуры становятся отрицательными, и солнечного излучения не достаточно для покрытия нагрузок здания.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время большое внимание уделяется созданию домов, которые будут иметь низкое энергопотребление за счет использования активных источников энергии (вовлечение возобновляемых источников энергии: ветряков и солнечных батарей, а также использование водородной энергетики). Под энергоэффективным домом понимают здание с пониженным потреблением энергии на отопление. Идеальным случаем, к которому нужно стремиться, является пассивный дом с удельным расходом тепловой энергии на отопление не больше 15 кВт·час/(м<sup>2</sup>·год) и с общим потреблением первичной энергии для всех бытовых нужд, включающих отопление, горячее водоснабжение (ГВС) и электроэнергию, не больше 120 кВт·час/(м<sup>2</sup>·год); при разности давлений 50 Па наружного и внутреннего воздуха кратность воздухообмена должна быть не более 0,6 1/ч; удельная отопительная нагрузка не более 10 Вт/м<sup>2</sup> [1, 2].

Если раньше в качестве энергоносителей для различных отраслей производства и жизнедеятельности людей использовались уголь, нефть и природный газ, которые характеризуются большими выбросами углекислого газа CO<sub>2</sub>, являющегося парниковым газом и приводящим к увеличению средней температуры окружающей среды за столетие на 0,3 – 1,7 °С, а также ядерное топливо и различные виды древесины, то сейчас многие европей-

ские страны в качестве энергоносителя начинают использовать водород. Получать водород можно самыми разными способами: путем газификации угля, электролиза воды, при помощи паровой конверсии метана CH<sub>4</sub> и природного газа, из биомассы термохимическим (нагрев без доступа кислорода) или биохимическим способом, пиролизом тяжелого сырья и анаэробным сбраживанием мусора, при химической реакции воды с разными металлами, а также из морской воды или канализационных стоков в процессе жизнедеятельности водорослей (например, группы зеленых водорослей *Chlamydomonas reinhardtii*) [3].

Использование водорода в качестве топлива вместо нефти, природного газа и угля обусловлено рядом причин [4]: высокая экологичность - побочным продуктом реакции является обычный водяной пар H<sub>2</sub>O, который является экологически чистым и безвредным; длительное хранение запасенной энергии (отсутствует зависимость энергетической емкости от температуры и не характерен саморазряд при хранении); использование «зеленого водорода» - возможность сохранения излишков электроэнергии, полученной в солнечные и ветреные дни солнечными панелями и ветроэнергетическими установками, в виде водорода с дальнейшим его сжиганием и получением электроэнергии, когда это необходимо; отсутствие выделения в окружающую среду парникового углекислого газа CO<sub>2</sub>; запасы водорода практически безграничны (доступность); высокая энергетическая ценность (теплота сгорания 120 МДж/кг).

Разумеется, есть и недостатки водородной энергетики. К ним относятся стоимость добычи чистого водорода из-за капитальных затрат электролизеров и стоимости возобновляемых источников энергии (ВИЭ); горючесть водорода в воздухе значительно выше, чем у бензина и пропана, что требует повышенного уровня безопасности; водород является самым легким химическим элементом, поэтому занимает в заданном объеме меньше веса по сравнению с другими топливами, из-за чего водород H<sub>2</sub> хранят в больших баллонах. Поэтому водородные дома должны быть оснащены системой безопасно-

сти – датчиками, которые автоматически отключают системы при наличии малейших утечек.

Наиболее передовыми странами по созданию домов, работающих на водороде, являются США, Германия, Швеция, Швейцария и Австралия. В России трудно применять возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и водородную энергетику в строительстве, что связано с суровыми климатическими условиями, большим количеством пасмурных безветренных дней в году в северной и центральной части территории страны, но, несмотря на это, уже есть несколько примеров жилых зданий, построенных в соответствии с идеологией и принципами создания пассивных домов, однако полностью стандарту пассивного дома они не удовлетворяют. Энергия солнечного излучения оказывается в большинстве случаев достаточна для поддержания теплового баланса пассивного дома даже в северных регионах с большим количеством пасмурных дней в году [2, 4].

Идеи создания таких домов являются актуальными, но затраты на строительство, установку оборудования и обслуживание водородных домов слишком велики, как и сроки окупаемости, которые в настоящее время достигают десятки лет.

## 2. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

### 2.1. Способы получения водорода

В настоящее время водород  $H_2$ , в основном, производится путем паровой конверсии метана из природного газа или после газификации угля. Этот процесс дешевый и не имеет конкурентов по себестоимости получаемого водорода (1-2 долл./кг в зависимости от цены газа и угля). Однако большим недостатком такого способа получения водорода является наличие углеродного следа, то есть паровая конверсия метана приводит к эмиссии (выбросу) углекислого газа – 10 кг  $CO_2$  / 1 кг  $H_2$ . Поэтому такой водород называют «серым», и данный способ получения водорода не может в перспективе использоваться в водородной энергетике из-за очень высокой эмиссии  $CO_2$  (этот показатель в 2,5 раза хуже, чем при сжигании природного газа или сопоставим). Альтернативой могло бы стать производство «серого» водорода только в комбинации с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа. Полученный таким образом водород называют «голубым» [4-6].

Полная конверсия протекает в 2 стадии: частичная конверсия – паровая конверсия гомологов метана преимущественно в метан на начальном участке реакционной зоны; конверсия метана с получением водорода и окислов углерода. Конверсия метана водяным паром описывается реакциями [7]:

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 - 206,4 \text{ кДж} \quad (1),$$
$$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2 + 41,0 \text{ кДж} \quad (2).$$

Хорошей альтернативой «серому» водороду является «зеленый» водород, получаемый путем электролиза при помощи энергии с минимальным углеродным следом, в основном, от ВИЭ. В соответствии с суммарным уравнением процесса разложения воды:



для получения 1 м<sup>3</sup> водорода (90 г) требуется 805 г воды и 2394 А·ч электричества.

Для получения водорода электролизом используются различные по конструкции и схеме включения электролизеры: с протонными мембранами, щелочные электролизеры, твердооксидные электролизеры. Пока что электролиз с использованием электроэнергии, полученной от ВИЭ, оказывается до 3 раз дороже паровой конверсии метана, поэтому важной национальной программой является нахождение способов удешевления этого метода производства водорода. Важными преимуществами электролиза являются практически нулевой углеродный след и отсутствие необходимости комбинировать электролиз с технологией улавливания и хранения  $CO_2$ .

Существуют методы получения водорода при газификации угля. Уголь или кокс реагирует с водяным паром при высокой температуре с образованием газа, в основном, содержащего  $H_2$ ,  $CO$  и  $CO_2$ . Затем газ смешивается с водяным паром после охлаждения, удаления пыли и сероочистки, и проводят реакцию сдвига. Газ сдвига очищается до газообразного водорода с чистотой 99,9% [7].

Данный способ получения водорода подходит для крупномасштабного производства водорода. Протекание эндотермической реакции:



Среди других способов можно выделить риформинг плазмы; риформинг на основе ионных мембран; конверсию метана с усилением сорбентом; микроканальные реакторы; разложение (пиролиз) метана с выделением углерода в твердом виде; высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы. Однако эти технологии пока находятся на еще более ранних стадиях коммерциализации.

### 2.2. Способы хранения водорода

Водородная энергетика с каждым годом становится все более популярной и перспективной. Прежде всего, это связано с истощением невозобновляемых природных ресурсов – угля, нефти, мазута и природного газа.

Одной из главных проблем в данной отрасли энергетики является проблема аккумулирования водорода. Существуют мелкомасштабные и крупномасштабные системы хранения, которые должны быть способны работать в неблагоприятных условиях, при этом обеспечивать безопасность и надежность работы, возможность проверки системы в течение всего срока службы оборудования [4, 5].

Самым простым и бюджетным способом аккумуляции водорода является хранение газообразного энергоносителя под давлением. Как правило,

используются цилиндрические баллоны большого объема, заполненные водородом с давлением до 40 МПа. Для стационарных условий используют контейнеры-трубы, которые объединяют от 3 до 18 штук, чтобы достичь емкости 700 кг водорода при 16,5 МПа. Количество водорода в трубе зависит от ее геометрических размеров (диаметра и длины), а также давления.

Вторым способом является хранение водорода на ветроэнергетических установках, которые нашли широкое применение в европейских странах. Водород, получаемый путем электролиза воды, рекомендуется запасать и использовать летом в период ветрового затишья. Современные ветряки представляют собой конические конструкции из стали, в которых расположен ротор. Поэтому все свободное место можно использовать для сезонного аккумулярования водорода в башне турбины.

Способ хранения жидкого водорода (температура около  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) хорош большими значениями емкости по весу и объему. Производство жидкого водорода растет с каждым годом примерно на 5%, при этом имеются жесткие требования к материалам сосудов по хладостойкости. Для сжижения водорода используют различные циклы: цикл Линде, цикл изотермического расширения Джоуля-Томпсона. Процесс ожижения довольно энергоемкий (расходуется порядка 25 – 45 % энергии сжиженного водорода). Такой способ нерационален для хранения небольшого количества водорода в герметичном сосуде, так как потери с утечкой энергоносителя велики, а стоимость оборудования слишком высока [4, 5].

Для хранения водорода в твердых носителях (гидридах металлов) характерны низкие энергозатраты, легкость транспортировки и повышение безопасности. Гидриды не требуют поддержания низкой температуры и обеспечивают довольно высокую объемную плотность до 150 г/л, а возможно, и массовую. Такой способ используют как для стационарных устройств, так и для переносных и транспортных систем.

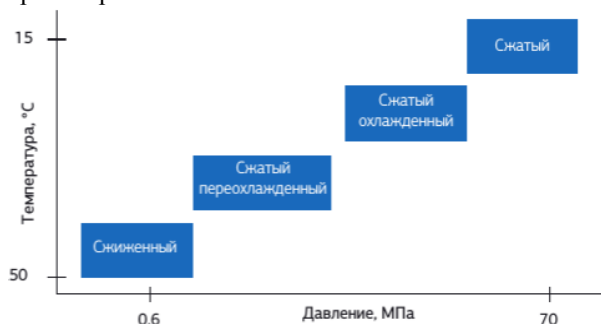


Рис. 1. Состояние водорода при его хранении.

В качестве гидридов металлов используют простые бинарные гидриды ( $\text{MgH}_2$ ), гидриды интерметаллических соединений ( $\text{LaNi}_5$ ,  $\text{ZrV}_2$ ,  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ ,  $\text{TiFe}$ ) и комплексные гидриды (алюмогидриды, борогидриды). На рис. 1 представлен график зависимости температуры от давления водорода в зависимости от его состояния при хранении.

### 2.3. Области применения водорода

Водород может найти применение в различных отраслях промышленности и областях деятельности людей. В энергетике Японии он используется в тех же целях, что и природный газ, – в качестве энергоносителя в котлах, газовых турбинах или топливных элементах. Мини-электростанции на топливных элементах принципиально отличаются от ТЭС тем, что в них реализуется процесс, обратный электролизу, то есть химическая энергия непосредственно преобразуется в электрическую. Таким образом, потребность в турбине отпадает, эффективность этого преобразования уже превышает 50-65%. Такие станции экологически чисты, в отличие от ТЭС не загрязняют окружающую среду оксидами азота  $\text{NO}_x$ , бесшумны и компактны, вырабатывают еще и тепловую энергию, в связи с чем могут массово применяться в домохозяйствах [8].

В транспортной индустрии применять водород можно также с использованием топливного элемента и турбины или совместно с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Правда, на сегодняшний день транспорт, работающий на водороде, стоит на порядок дороже автомобиля с двигателем внутреннего сгорания, но к 2030 году возможно снижение стоимости (на 80%) из-за серийного производства и разработки заправочных станций.

Заправочные станции – это базовая инфраструктура для водородного транспорта, без которой он не сможет развиваться. Ситуация аналогична с зарядными станциями для электромобилей, но последние проще размещать в общественных местах, а по времени зарядки они существенно уступают водородным заправочным станциям (уходит несколько часов на зарядку электромобиля и всего несколько минут на заправку автомобиля, работающего на водороде).

В промышленности водород является основой для получения синтетических газов, которые в дальнейшем могут использоваться для получения сырья в химической промышленности [4,5].

### 2.4. Способы транспортировки водорода

Наземный транспорт водорода в сжатом и сжиженном виде (автомобильный, железнодорожный и трубопроводный) – наиболее отработанная технология, которая является основной на сегодня и, вероятно, останется таковой в ближайшей перспективе [4, 5].

Трубопроводы подходят для транспорта крупных и постоянных объемов водорода, при этом требуют значительных инвестиций. Согласно данным на 2016 год, в мире насчитывалось более 4,5 тыс. км, преимущественно расположенных в США и странах Европы. Для водорода не обязательно создавать собственную трубопроводную систему, можно использовать уже имеющуюся, созданную для природного газа, подмешивая водород в газ до определенного предела. Содержание водорода в таком газе обычно составляло около 50%. Верхний предел определяется национальными технологически-



ми стандартами, связанными с безопасностью газопроводов и оборудования, сжигающего газ.

### 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА В РОССИИ

#### 3.1. Описание объекта исследования

Дом построен по технологиям энергоэффективного дома: теплая оболочка дома и современные инженерные системы. Сначала создавалось комфортное пространство – комфортные планировочно-пространственные решения, затем разрабатывалась конструкция и параллельно подбирались инженерные системы. Еще на этапе строительства жилого дома проводилось сравнение различных вариантов инженерных решений для того, чтобы выбрать наилучший из них по капитальным и эксплуатационным затратам за время жизненного цикла данного здания [9].



Рис. 2. Внешний вид энергоэффективного дома.

Энергоэффективный дом, представленный на рис. 2, является двухэтажным зданием с отапливаемым подвалом и неотапливаемым чердаком. На южном фасаде кровли расположены солнечные батареи Delta BST 360-24 М и солнечные коллекторы JSolar. В доме используются современные энергоэффективные технологии, такие как приточно-вытяжная установка с рекуперацией теплоты удаляемого воздуха ZENIT 550 HECO, эффективность которой равна 88,5 %, система отопления «теплый пол» и «теплый потолок» с функцией охлаждения летом, грунтовый тепловой насос BUDERUS Logatherm WPS 11, энергоэффективные окна со специальным покрытием и газом, а также высокотехнологичные теплоизоляционные материалы. Тепловые нагрузки, которые были получены в результате расчетов, соответствуют стандартам энергоэффективности зданий [10].

Россия – самая холодная страна мира, поэтому дома в нашей стране должны быть самыми энергоэффективными [10]. Коэффициент термического сопротивления жилого дома в Пушкино примерно

в 3 раза лучше, чем у стандартных домов в России. По дизайну окна являются относительно небольшими, но расположены так, что в помещении всегда светло. На 2016 год окна обладали самыми высокими показателями энергоэффективности среди моделей, представленных на тот момент на отечественном рынке, – двухкамерные, с самым утепленным профилем, двумя напылениями и с аргонном. Стены состоят из газобетонных блоков толщиной 300 мм и трех слоев теплоизоляции общей толщиной 250 мм.

В современном доме, построенном по энергоэффективным технологиям, крайне важное значение имеет правильно подобранная система вентиляции. Согласно принципам пассивного дома, он должен быть герметичным, а открывание окон – самый неудачный способ для поступления свежего воздуха внутрь здания. Альтернативой этому является приточно-вытяжная установка с рекуперацией тепла. Для рекуперации достаточно приблизительно половины объема (270 м<sup>3</sup>/час), установка позволяет подавать свежий воздух (показатели содержания углекислого газа составляют 365 ppm) и экономит тепловую энергию. Приточно-вытяжная установка включает в себя три последовательно установленных теплообменника, КПД – 75-80 % (то есть только 20 % тепла выбрасывается в окружающую среду, а остальные 80 % используется повторно, что значительно снижает нагрузку на тепловой насос и другие источники энергии). В летний период данная установка охлаждает приточный свежий воздух за счет канального водяного охладителя до комфортных температур в помещении [10,11].

В настоящее время дом потребляет меньше электрической энергии, чем производит. Поэтому в перспективе «лишнюю» энергию можно продавать обратно в сеть в соответствии с законом о микрогенерации РФ, а также аккумулировать в виде водорода для его использования в холодные пасмурные дни [12].

#### 3.2. Предлагаемая гибридная схема

Гибридная система, изображенная на рис. 3, состоит из фотоэлектрической системы, преобразователей тока, электролизера для производства водорода, водородных баков и топливного элемента, который работает, чтобы обеспечить здание как электрической, так и тепловой энергией. Фотоэлектрическая система включает в себя фотоэлектрические панели для выработки электроэнергии из солнечного излучения и инвертора для преобразования постоянного тока в переменный. Были выбраны солнечные панели Delta BST 320-60 М. Важной особенностью является угол наклона фотоэлектрических модулей (31,3°), так как от него зависит улавливание максимального солнечного излучения и последующее производство электроэнергии. Данный угол на 97,8% является оптимальным [13].

В установке используется погружной электрохимический модуль (ПЭМ электролизер), который обладает рядом преимуществ: большие сроки эксплуатации без замены основного блока (около 20

лет), небольшие габаритные размеры, низкий удельный расход электроэнергии. Спецификация

электролизера датской фирмы Green Hydrogen Systems (GHS) приведена в таблице 1.

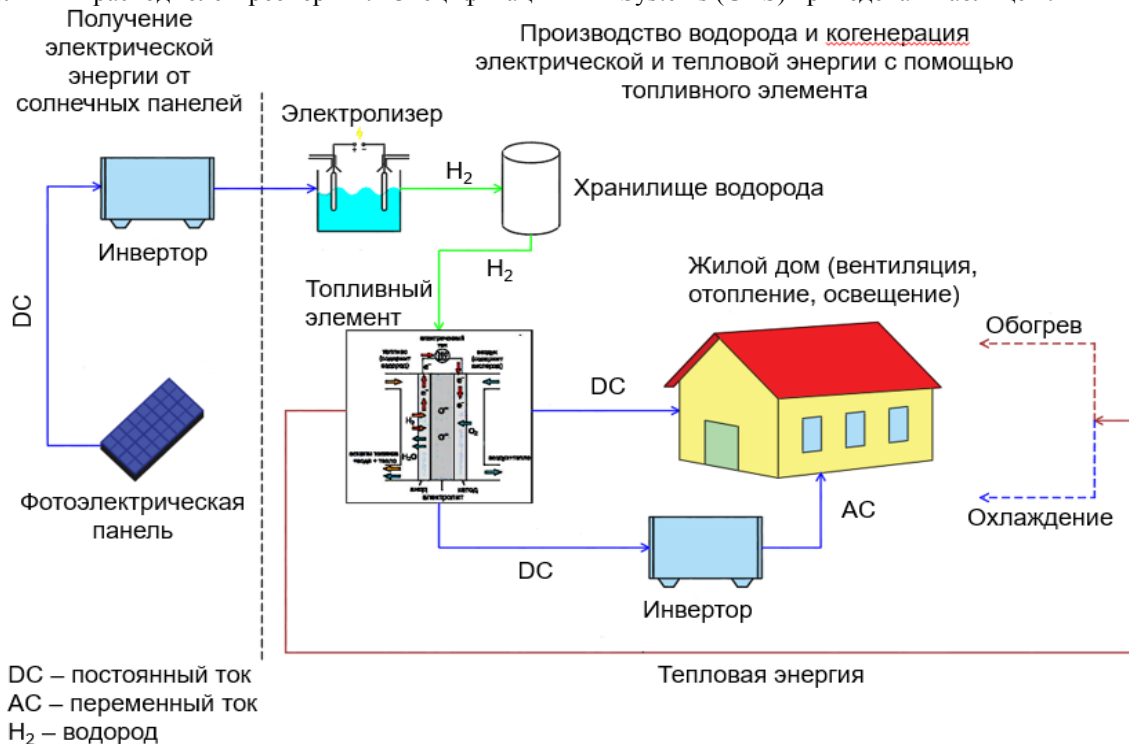


Рис. 3. Схема предлагаемой гибридной системы.

Таблица 1. Спецификация электролизера

Характеристика	Значение
Производительность, Нм <sup>3</sup> /ч	30/60/90
Давление, бар	до 35
Чистота водорода, %	99,999
Расход электроэнергии, кВт/Нм <sup>3</sup>	4,7
Диапазон регулирования, %	25 – 100
Передача данных	Ethernet/Can-bus
Контейнерное исполнение	да

Произведенный водород планируется хранить в резервуаре, чтобы его можно было использовать позже в топливном элементе для производства тепловой и электрической энергии в соответствии с потребностями здания. Топливный элемент с полимерно-электролитной мембраной (PEM) обеспечивает высокую удельную мощность, обладает малым весом и объемом по сравнению с другими топливными элементами. Работают такие топливные элементы на чистом водороде, поступающим из резервуаров, где он хранится [14].

Электролизер PEM наиболее часто используется, особенно в зданиях, из-за его различных преимуществ по сравнению с другими электролизерами, таких как компактная конструкция системы, быстрое реагирование системы, высокая динамичность работы, высокая эффективность и высокая чистота производимого водорода [15]. Электролизер состоит из катода, анода и твердой полимерной мембраны, называемой электролитом. Это электрохимическое устройство, которое используется для производства водорода и кислорода из деионизированной воды. Деионизированная вода вводится в анодный электрод, где она разделяется на водород

(H<sub>2</sub>), протон (H<sup>+</sup>) и кислород (O<sub>2</sub>). Затем протон водорода транспортируется к катодному электроду через электролит. В катоде, где применяется постоянный ток, протон водорода потребляет электроны для производства газообразного водорода (H<sub>2</sub>). Уравнения (5) и (6) представляют реакции, протекающие на электродах электролизера на аноде и катоде соответственно:



Произведенный водород необходимо хранить, а затем использовать, когда он нужен. Поскольку водород имеет небольшую плотность при нормальных условиях окружающей среды (1 кг водорода эквивалентен 11 м<sup>3</sup>), его эффективное хранение требует увеличения его плотности и, следовательно, уменьшения его объема. В данной работе было принято решение хранить водород в газообразном состоянии в резервуарах под давлением. Герметичные баки, используемые в этой работе, имеют рекомендуемое давление 30 бар, максимальную температуру хранения около 40 °С и емкость хранения 3785 л. Кроме того, поскольку электролизер работает с тем же давлением, что и в резервуарах с водородом (30 бар), нет необходимости в специальном компрессоре.

Топливный элемент состоит из катода, анода и твердой полимерной мембраны (электролита). Это электрохимическое устройство, которое вырабатывает электроэнергию, тепловую энергию и воду в результате экзотермической реакции между водородом и кислородом [16]. Фактически водород, который доставляется к аноду, разделяется на электроны (e<sup>-</sup>) и протоны водорода (H<sup>+</sup>). Последний

проходит через твердую полимерную мембрану, чтобы достичь катода. Отдельно подается кислород (окислитель), и, таким образом, он соединяется с протонами водорода, чтобы образовать воду (H<sub>2</sub>O). Реакции, происходящие на аноде и катоде, можно выразить уравнениями (7) и (8) соответственно:

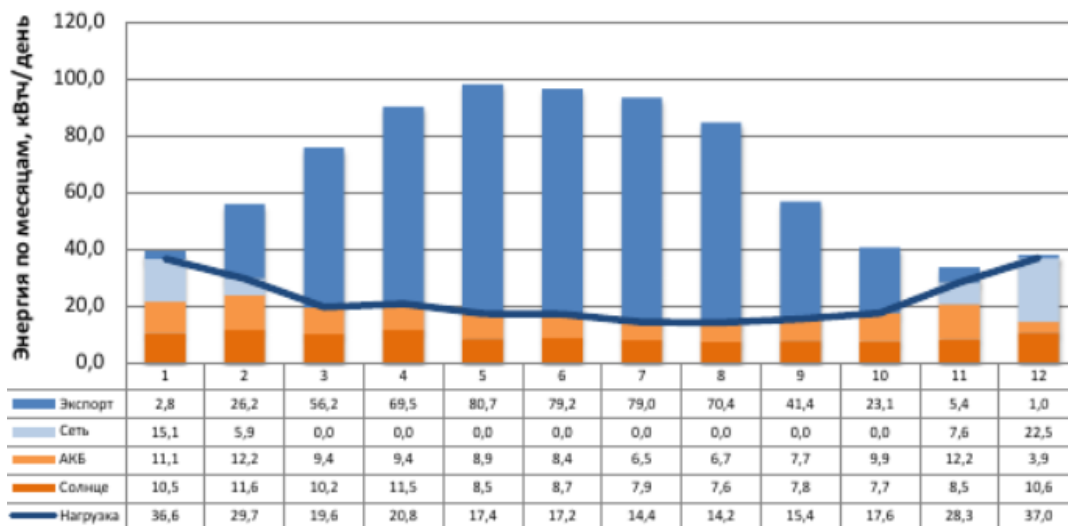
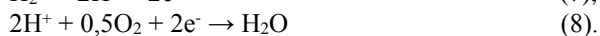
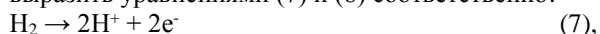


Рис. 4. Усредненное распределение источников питания.

Для расчета затрат электроэнергии примем время работы электролизера 1 сутки. Таким образом, затраты составляют:

$$W_{\text{электролизер}} = P_{\text{электролизер}} \cdot t = 2 \cdot 24 = 48 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

По энергетическим характеристикам отечественных (СССР) и зарубежных (ФРГ, Италия) электролизёров среднее значение расхода электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> водорода составляет 4,5 кВт·ч [17]. Таким образом, количество водорода, которое можно получить из электролиза за сутки, составляет:

$$V_{\text{H}_2} = \frac{48}{4,5} = 10,6 \text{ м}^3.$$

Значит за период с июня по август можно запастись:

$$V_{\text{H}_2} = 10,6 \cdot (30 + 31 + 31) = 975,2 \text{ м}^3, \text{ что под указанным давлением займет объем } 32,93 \text{ м}^3.$$

Согласно «нормам технологического проектирования производства водорода методом электролиза воды» НТП 24-94 для получения 1 м<sup>3</sup> водорода требуется 0,805 м<sup>3</sup> воды [17 - 20]. Следовательно, для 975,2 м<sup>3</sup> водорода необходимо 785,04 м<sup>3</sup> воды.

Современные электролизеры имеют КПД, равное 80%, КПД топливных элементов в среднем 60%, таким образом, КПД установки получается равным:  $\eta_{\text{установки}} = 0,8 \cdot 0,6 = 48 \%$

Затраты электроэнергии на электролизер за летние месяцы:

$$W_{\text{электролизер}} = 48 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot (30+31+31) = 4416 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

На рис. 4 представлен график распределения источников питания. Система генерирует 23826 кВт·ч в год. При этом потребление выработанной энергии составляет 6587 кВт·ч (28%). Оставшаяся величина - 72% энергии может быть использована на зарядку электромобиля или может быть использована на производство водорода в электролизере с последующим его сохранением в водородном резервуаре.

Количество электроэнергии, которое можно получить от топливного элемента:

$$W_{\text{ТЭ}} = W_{\text{электролизер}} \cdot \eta_{\text{установки}} = 4416 \cdot 0,48 = 2119,68 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Затраты электроэнергии на собственные нужды дома:

$$W_{\text{дом}} = (36,6 - 10,5) \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 31 + (29,7 - 11,6) \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 28 + (37,0 - 10,6) \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 31 = 2134,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Разница полученной и затраченной электроэнергии составляет:

$$\Delta W = W_{\text{дом}} - W_{\text{ТЭ}} = 2134,3 - 2119,68 = 14,62 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

На покрытие нагрузок не хватает 14,62 кВт·ч (0,685%).

### 3.3. Расчет микро-ТЭЦ с топливным элементом и тепловым насосом в программе EBSILON

Программа Ebsilon Professional позволяет моделировать различные энергетические системы, такие как котельные и солнечные модули, а также реальные схемы ТЭЦ [20].

На рис. 5 представлена схема микро-ТЭЦ с топливным элементом и тепловым насосом. К сожалению, в этой программе пока не предусмотрен элемент электролизер. Поскольку в схеме отсутствует электролизер, то параметры водорода на входе в топливный элемент были приняты равными тем параметрам, при которых будет храниться водород в резервуарах. В результате моделирования было получено, что мощность, которую будет затрачивать топливный элемент, составляет 4,190 кВт.



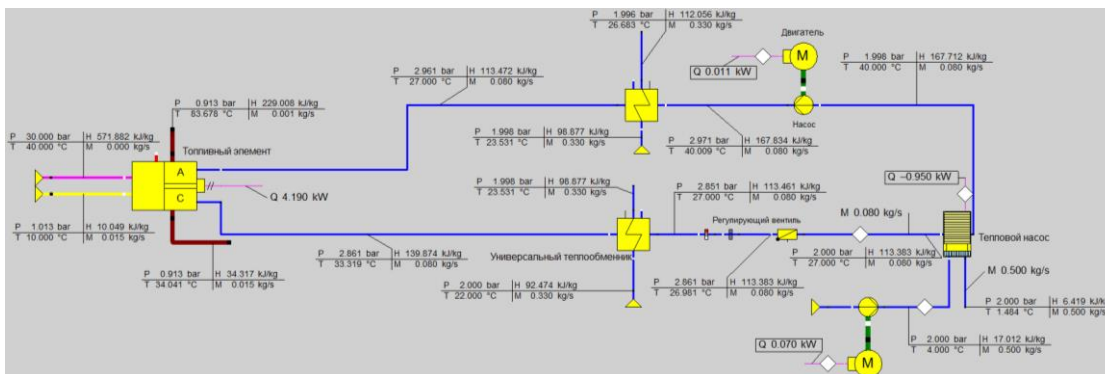


Рис. 5. Схема микро-ТЭЦ с топливным элементом и тепловым насосом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование водорода в качестве топлива и энергоносителя становится актуальным направлением в развитии энергетики России и мира, благодаря экологичности и доступности водорода. В работе были рассмотрены возможные способы хранения и транспортировки водорода, самые простые и доступные способы получения; проведен расчет микро-ТЭЦ, с помощью которого была определена необходимая мощность топливного элемента для преобразования энергии водорода, хранящегося в резервуаре, в электроэнергию для нужд дома.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Султангузин И. А., Кругликов Д.А., Яцук Т.В., Калыкин И.Д. Применение BIM-, VEM- и CFD- технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома. BIM-конференция. МЭИ, Москва, 2019, С. 36 – 42.
2. В. Файст. Основные положения по проектированию пассивных домов. М.:Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. 144 с.
3. Полякова Т.В. Состояние и перспективы водородной энергетики в России и мире. Центр глобальных проблем ИМИ, 37 с.
4. Митрова Т., Мельников Ю., Чугунов Д. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию. Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019, 63 с.
5. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В., Сергина Е.А., Фатеева Т.В., Григорьева А.С., Алиев А.Ш. Проблемы аккумулирования и хранения водорода. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», 2018. 32 с.
6. G. Wynn, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). Power-Industry Transition, Here and Now: Wind and Solar Won't Break the Grid: Nine Case Studies. USA, 2018.
7. Шпильрайн Э.Э., Малышко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику. / Под ред. Легасова В.А. М.: Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
8. Кулешов Н.В., Попов С.К., Захаров С.В. Водородная энергетика. М.: Издательство МЭИ, 2021. 548 с.
9. **Turkov Ural**. Технологии пассивного домостроения. Интернет источник. Дата публикации: 01.11.2021 г. Адрес сайта: <https://www.youtube.com/watch?v=PhrWYfADe3I&t=10s> Дата посещения: 24.05.2021 г.
10. **Чайкин В.Ю.** Разработка и эксплуатация систем мониторинга и управления дома с околонулевым энергопотреблением. Бакалаврская работа, МЭИ, 2020. 80 с.
11. **Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С.** Оптимальные уровни тепловой защиты жилых зданий для климатических условий России. Энергосбережение, новые и возобновляемые источники энергии. // Теплоэнергетика. 2013. № 1. С. 70 – 80.
12. **Федеральный закон** «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 № 35 ФЗ. 128 с.
13. **Компания «Энергон».** Фотоэлектрическая система. Гибридная электростанция. Предварительный расчет. Москва, 14.04.2022 г, 12 с.
14. **Sofia Boulmrharj, Mohammed Khaidar, Mohamed Bakhouya, Radouane Ouladsine, Mostapha Sinit, Khalid Zine-dine.** Performance Assessment of a Hybrid System with Hydrogen Storage and Fuel Cell for Cogeneration in Buildings. 2020. 21 с.
15. **Филиппов С.П.** Топливные элементы и водородная энергетика. // Энергетическая политика. 2020. № 11 (153). С. 28 – 39.
16. **Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С.** Эффективность использования тепловых насосов для теплоснабжения малоэтажной застройки // Теплоэнергетика. 2011. № 11. 8 с.
17. **Гамбург Д.Ю., Семенов В.П., Дубовкин Н.Ф., Смирнова Л.Н.** Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник. М.: Химия, 1989. 672 с.
18. **Нормы технологического проектирования производства водорода методом электролиза воды.** Комитет Российской Федерации по пищевой и перерабатывающей промышленности. Москва, 1994. 37 с.
19. **Краснораменский В.И.** Топливные элементы для повышения энергоэффективности ТЭС и НПЗ. // Энергосовет. 2013. № 5 (30) С. 43 – 47.
20. **Белехова Н.А.** Разработка системы производства, хранения и использования водорода для сезонного аккумулирования энергии в энергоэффективном доме. Бакалаврская работа, МЭИ, 2022. 98 с.

*В.А. Поженько<sup>1</sup>, И.Д. Калякин<sup>1</sup>, И.А. Султангузин<sup>1</sup>, Ю.В. Яворовский<sup>1</sup>,  
Х. Келлер<sup>2</sup>, Т.В. Яцюк<sup>3</sup>.*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

<sup>2</sup>VPC GmbH, Германия

<sup>3</sup>АПК «Содействие», Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОМА В ГЕРМАНИИ НА ОСНОВЕ BIM И BEM МОДЕЛИРОВАНИЯ

### АННОТАЦИЯ

В данной работе были определены нагрузки на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение дома в Германии. В работе реализован процесс комплексного проектирования энергоэффективного дома на основе BIM, BEM технологий. На основе BIM модели, выполненной в ArchiCAD, было осуществлено BIM моделирование в designPH с последующим уточнением модели в RHPP. На основе применения RHPP был оценен энергосберегающий эффект, получаемый в ходе внедрения нового оборудования, улучшения теплоизоляции здания, а также сравнен с энергопотреблением домом в России.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

С 2021 года в Европе активно развивается концепция «Трёх нулей» [1]. Существует данная идея с 2008 года. Сейчас она стала обязательной для всех строительных проектов. Эта концепция подразумевает, что дом должен иметь нулевое энергопотребление, нулевое количество вредных выбросов, нулевое количество отходов.

В Европе эти дома пока представлены как экспериментальные проекты, которые дороже обычного дома примерно на 25%. Это связано с тем, что реализовано не так много проектов, с ростом их числа будет появляться технологическая база и появится возможность перейти на массовое производство. Следовательно, приведет к удешевлению строительства, но на это нужны десятилетия [2-5].

Нулевое энергопотребление достигается путем использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ): энергии солнца, ветра, также использования биотоплива. Также можно использовать низкопотенциальную энергию окружающей среды. Для этого используется тепловой насос. Снизить энергопотребление помогает применение энергосберегающих технологий, таких как: утепление ограждающих конструкций, герметизация контура, система вентиляции с рекуперацией тепла, окна и двери с повышенными теплозащитными характеристиками, солнечные трубы, использование роллет.

В случае проблем с собственной выработкой энергии здание может использовать энергию из сети.

Нулевое количество вредных выбросов можно достичь путем перехода с привычных нам топлив (газ, уголь), на альтернативные источники энергии.

После того как здание отслужит свой срок, оно должно легко демонтироваться, а экологичные материалы, из которых оно было построено, должны уйти на переработку. Так получается нулевое количество отходов.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 2.1. Постановка задачи

В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

1. Провести BIM, BEM-моделирование дома в Германии.
2. Предложить варианты улучшения энергоэффективности дома в Германии.
3. Сравнить результаты с энергоэффективным домом в России.
4. Исследовать влияние климатических условий на энергоэффективность зданий.

#### 2.2. Объект исследования

Анализ энергоэффективности проводится на реальном доме, расположенном в г. Лейпциг, Германия (рис. 1).



Рис. 1 Исследуемый дом в г. Лейпциг (Германия).

Общая площадь дома 342 м<sup>2</sup>. Теплозащитные характеристики представлены в табл. 1. Длина здания 13,73 м, ширина 13,2 м, высота до вершины пирамидальной крыши – 13 м. Крыша четырехскатная. Юж-

ная и западная часть крыши используются для размещения 11 солнечных батарей на южной стороне,

на западной стороне - 8 штук. На южной стороне сделан зимний сад. Высота потолков: 3,0 м.

Таблица 1. Параметры теплозащиты ограждающих конструкций в доме.

Зона	Материал	$\delta_i$ , м	$\lambda_i$ , Вт/м·К	$U_i$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
Крыша	Минеральная вата	0,175	0,035	0,183
	Фанера	0,012	0,13	
	Железобетон	0,37	2,04	
Стена выше уровня земли	Кирпич Т10	0,365	0,1	0,236
	Гипсокартон	0,06	0,21	
	Теплая Штукатурка	0,025	0,2	
Пол первого этажа	Керамзит	0,03	0,026	0,351
	Железобетон	0,37	2,04	
	Пенополистирол	0,06	0,026	
Стены подвала	Белый кирпич	365	0,44	0,565
	Пенопласт	30	0,037	

### 3. ВЕМ И ВІМ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

ВІМ (Building Information Modeling) модель энергоэффективного дома создавалась в программе ArchiCAD. Высота потолков задана 3 м. Был предусмотрен запас по высоте потолков для перекрытий между этажами. В модели создан зимний сад, крыша в виде пирамиды. Учтено расположение здания по отношению к сторонам света.

Процесс создания ВІМ-модели в ArchiCAD начался с настройки карты проекта и создании слоев (модельных видов). Карта проекта – это дерево модели. Был создан подвальный этаж, первый этаж, второй этаж. Слои необходимы для корректного отображения всех элементов ВІМ-модели и облегчения доступа к конкретным семействам.

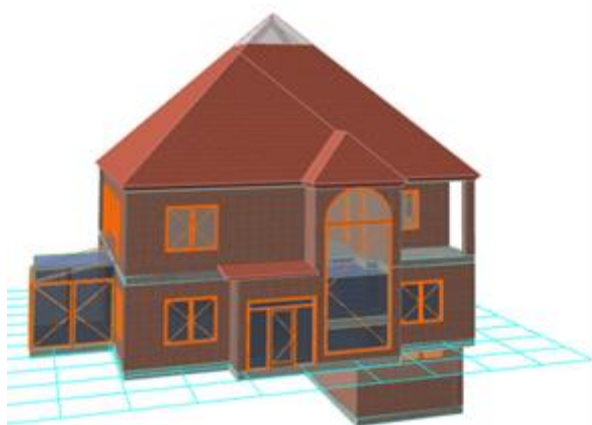


Рис. 2. 3D модель здания в ArchiCAD.

Основное утепление происходит за счёт наружных стен, выполненных из кирпича марки Т10. Дом имеет очень большую площадь остекления 160 квадратных метров, средний коэффициент сопротивления составил 0,96 м<sup>2</sup>·К/Вт. Сквозь такую большую площадь идут большие тепловые потери в

окружающую среду. Для домов с низким энергопотреблением рекомендуется подбирать окна с термическим сопротивлением не менее 1,25 м<sup>2</sup>·К/Вт.

Для расчета в ВЕМ (Building Energy Modeling) пакетах модель была переведена из формата ArchiCAD в формат для работы в DesignPH. Программы PHPP и designPH разработаны Институтом пассивного дома (PassivhausInstitut – PHI) в г. Дармштадте (Германия) и предназначены для моделирования системы энергоснабжения. С помощью этого инструмента проектирования задают параметры оборудования, условия эксплуатации здания, климатические условия, параметры теплового контура здания (толщины слоёв ограждающих конструкций, коэффициенты теплопроводности материалов и т. д.) [2, 5]. Программа designPH – это дополнение для SketchUp, в котором производят построение геометрии дома в трёхмерном пространстве. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Моделирование проводилось по методологии, описанной в [5-7].

PHPP – программа в Excel, выполненная в виде расчетных листов для моделирования энергетического баланса зданий. PHPP позволяет проводить более точные расчёты годового энергопотребления здания по сравнению с designPH.

В данном исследовании предлагаются мероприятия по снижению энергопотребления уже построенного жилого дома.

Источником теплоснабжения является тепловой насос «воздух - вода». Имея данные по расходу воды системы отопления в конденсаторе теплового насоса  $G$ , её температурам на входе и выходе ( $t_{обp}$ ,  $t_{под}$ ), была определена теплопроизводительность теплового насоса  $Q$  при соответствующих параметрах теплоносителя и допущении о равенстве изобарной теплоёмкости 4,2 кДж/кг. Также по данным системы мониторинга теплового насоса имеются данные по температурам фреона в конденсаторе и испарителе теплового насоса и коэффициентам производительности COP (coefficient of

performance) для соответствующих режимов (табл.2).

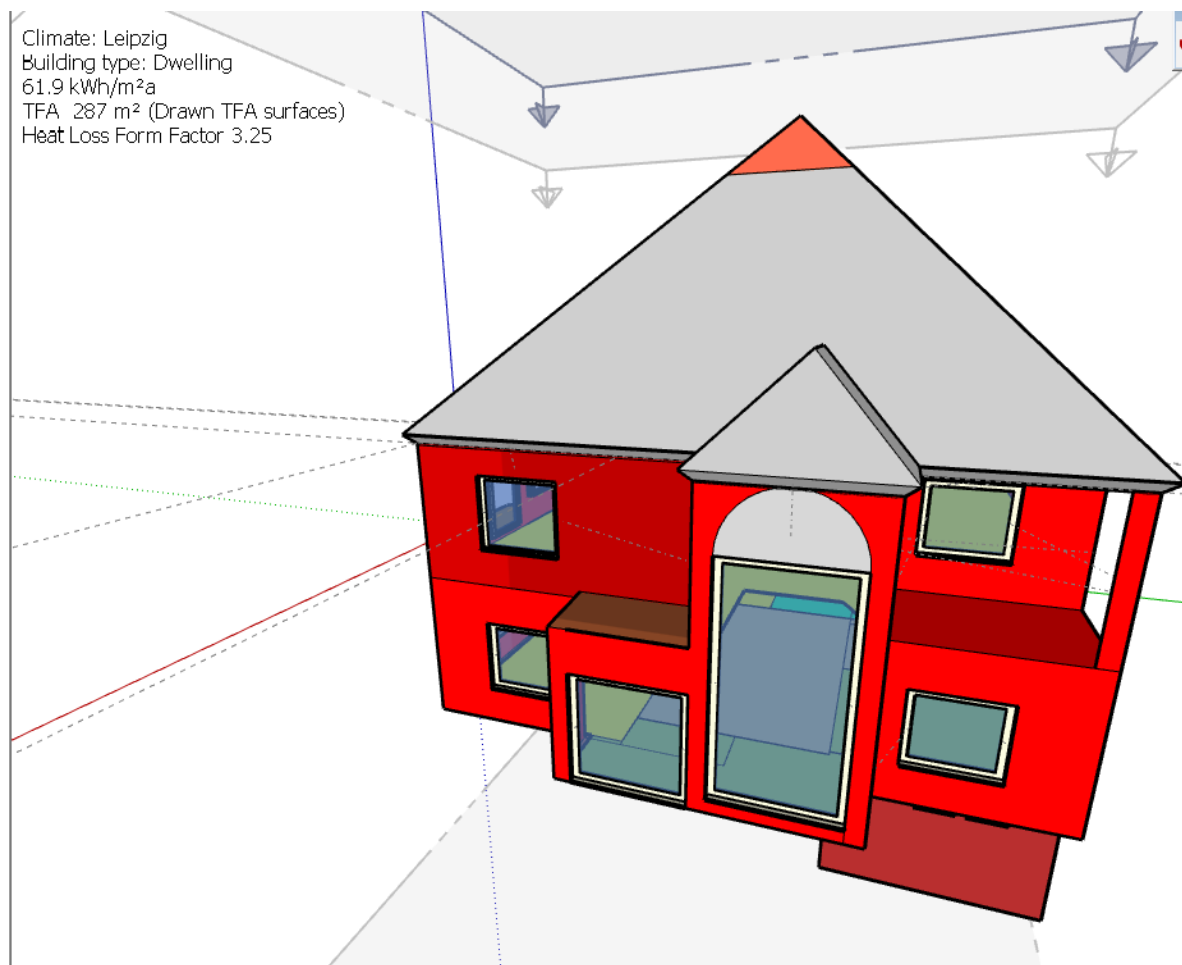


Рис. 3 ВЕМ модель в программе designPH.

Таблица 2. Параметры теплоносителя и теплопроизводительность по контуру отопления.

G, кг/с	C <sub>p</sub> , кДж/кг	t <sub>под</sub> , C°	t <sub>обр</sub> , C°	Q, кВт
0,6	4,2	29,4	25	11,0
0,6	4,2	29,3	27	6,0
0,2	4,2	31,6	29,1	2,1
0,2	4,2	30,9	28,4	2,5
0,2	4,2	31,1	29	2,1
0,2	4,2	31,5	29,1	2,4
0,2	4,2	31,1	28,1	2,8
0,3	4,2	33,2	29,4	5,2
0,3	4,2	30,4	26,7	4,2

По результатам моделирования в designPH (рис. 3) годовое потребление энергии на отопление и вентиляцию составляет 61,9 кВт·ч/м². На рис. 4 представлены результаты расчётов в RHPP. Такие значения энергопотребления позволяют отнести дом к классу с низким энергопотреблением [8]. Однако этот показатель очень далёк от показателей пассивного дома.

Сравнение рассчитанного годового расхода электроэнергии на тепловой насос с эксплуатационными данными позволяет сделать вывод об адекватности моделирования:

$$\Delta = 100 - \frac{E_{\text{модель}}}{E_{\text{факт}}} = 100 - \frac{5804}{5913} = 1,84\% \quad (1)$$

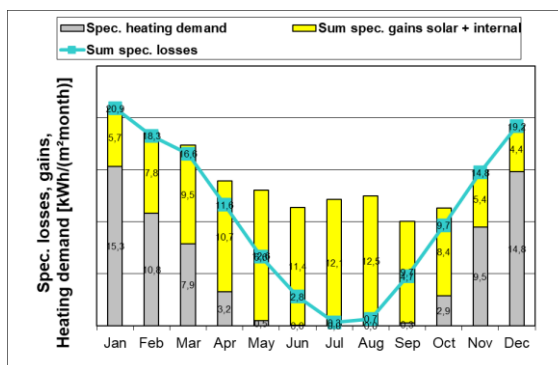


Рис. 4 Потребление тепловой энергии на отопление и вентиляцию.

В доме установлены монокристаллические солнечные панели на крыше в количестве 11 на южной и 8 на западной стороне здания. Теоретическая годовая выработка по результатам моделирования составляет 6281 кВт·ч/год (рис. 5). Эта электроэнергия позволяет покрывать 74% от всей потребляемой электроэнергии в доме.



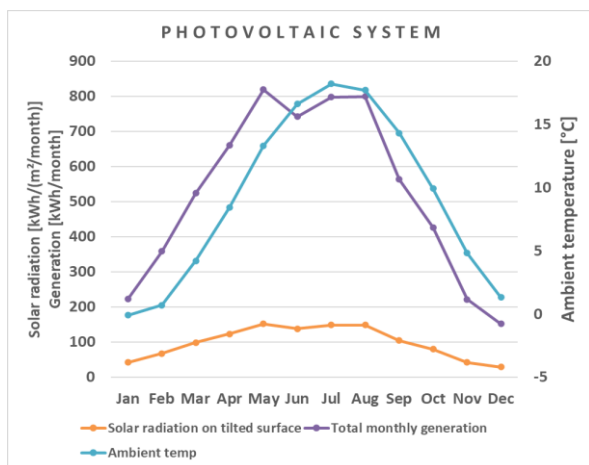


Рис. 5. Выработка электрической энергии солнечными панелями.

#### 4. ОЦЕНКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЯ

Построена BIM, BEM модель дома в Германии, для модели в designPH получено значение 61,9 кВт·ч/год годового потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Модель была уточнена в PHPP, там результат составил 65 кВт·ч/год.

Рассчитанная выработка электроэнергии в PHPP солнечными батареями за год составила 6281 кВт·ч/год, что составило 74% от годового потребления ЭЭ.

Поскольку дом уже построен, то можно рассмотреть следующие мероприятия:

1. Установка вентиляционной системы с рекуперацией тепла удаляемого воздуха [9].
2. Монтаж дополнительного слоя утеплителя на наружных стенах (100 мм минеральной ваты).
3. Установка второго фасада для зимнего сада [10].

Также в целях сокращения потребления электроэнергии из сети на восточной стороне крыши можно установить 8 солнечных панелей.

Рассмотренные варианты повышения энергоэффективности здания могут привести к снижению потребления тепла более, чем в 2 раза, с 65 кВт·ч/год до 30 кВт·ч/год.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведён расчёт нагрузок на систему отопления, горячего водоснабжения, вентиляции в трёх вариантах. В доме используются следующие энергоэффективные технологии: система отопления «тёплый пол», солнечные батареи. Для построения BIM и BEM модели здания для определения энергопотребления было применено следую-

щее программное обеспечение: ArchiCAD, «Passive House Planning Package Version 8», «SketchUp Pro» и «designPH». В designPH получено значение 61,9 кВт·ч/год годового потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Модель была уточнена в PHPP. Результаты моделирования показывают, что необходимо 65 кВт·ч/год тепловой энергии на отопление и вентиляцию. Также было определено потребление электроэнергии теплого на выработку необходимого тепла и данный результат был сравнен с реальным потреблением. Погрешность составила 1,84%. Это говорит о том, что результаты моделирования адекватны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Werner S., Trumpf H. Sustainable Tall Buildings – Some Introductory Remarks // CTBUH 2008 8th World Congress, Dubai. 2008.
2. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов. М.: ООО «КОНТИ ПРИНТ», 2015. 144 с.
3. Сеппанен, О. Требования к энергоэффективности зданий в странах ЕС // Энергосбережение. 2010. N 7. С. 42-53.
4. Бродач М. М., Ливчак В.И. Здание с близким к нулевому энергетическому балансу // АВОК. 2011. N 5. С. 4-12.
5. Султангузин И.А., Кругликов Д.А., Яцюк Т.В., Калякин И.Д., Яворовский Ю.В., Баргенов А.И., Говорин А.В., Жигулина Е.В. Применение BIM-, BEM- и CFD-технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // СОК. 2019. N 3. С. 36-42.
6. Султангузин И.А., Шютц У., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Хромченков В.Г., Малахова А., Ланцке Б., Даман А. Расчет, строительство и обследование фасада энергоэффективного дома // Строительство и реконструкция. 2017. N 4. С. 110 – 118.
7. Калякин И.Д. Разработка системы энергоснабжения жилого дома с околонулевым энергопотреблением. Бакалаврская работа, МЭИ, 2016. 43 с.
8. Schütz W. Energy saving regulations in Germany, history — status — future. 3. // Ingenieurtag 2016. Der Fakultät Maschinenbau, Elektround Energiesysteme. GUSund Ostteuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. Cottbus, Germany. November 14–15, 2016. P. 167–173.
9. Ахмяров Т. А., Беляев В. С., Спиридонов А. В., Шубин И. Л. Система активного энергосбережения с рекуперацией тепла // Энергосбережение. 2013. №4. С. 36-46.
10. Pomponi, F. Energy performance of Double-Skin Facades in temperate climates: a systematic review and meta-analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. N 54. P. 1525-1536.

Е.Г. Гаши<sup>1</sup>, А.И. Киселева<sup>2</sup>, А.М. Фокин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup>Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

## МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СИСТЕМАХ ПАРΟΣНАБЖЕНИЯ В НЕПРОЕКТНЫХ РЕЖИМАХ

### АННОТАЦИЯ

Целью исследования является анализ работы паропровода, предназначенного для снабжения производственных потребителей паром заданных параметров от централизованного источника – котельной, с целью обеспечения технологического процесса и теплоснабжения промышленных предприятий. В данной работе были рассмотрены энергосберегающие мероприятия в паровых системах теплоснабжения и их эффективность и экономическая целесообразность.

Потери энергии в системах теплоснабжения неразрывно связаны с потерей ресурсов. Согласно [1], снижение тепловых потерь в тепловых сетях — одна из важнейших задач в общей проблеме энергосбережения.

В связи с этим актуальной становится задача разработки и оценки энергосберегающих мероприятий в тепловых сетях. Рассмотрим основные энергосберегающие мероприятия в паровых сетях на примере паропровода, конфигурация и тепловые нагрузки которого представлены на рисунке 1.

Снижение потребления технологического пара по сравнению с проектным режимом работы вызвало резкое ухудшение удельных потерь тепла, связанных с уменьшением скорости движения.

Объясняется это тем, что при меньшей скорости движения, пар находится в трубе большее время, в связи с чем, количество теплоты, отводимое в окружающую среду через тепловую изоляцию, увеличивается.

Оценить увеличение удельных тепловых потерь можно следующим образом: паропровод проектировался на расход пара 65 т/ч, диаметр трубопровода при проектной скорости движения 50 м/с, составляет в среднем по наиболее протяженным участкам 300-400 мм. Удельные тепловые потери с метра длины паропровода такого диаметра по [2] составляют 175-209 Вт/м. На сегодняшний день расход потребляемого пара сократился более чем в 2 раза и составляет 35.1 т/ч. Для передачи пара потребителю с проектными режимами работы паропровода необходимо уменьшить диаметр трубопровода до 200–250 мм.

Удельные потери теплоты в окружающую среду с метра длины «нового» паропровода по [2] составили бы 129 Вт/м. Увеличение потерь, по сравнению с «новым» паропроводом, составляет 42–59%. Таким образом, компенсация дополнительных тепловых потерь из-за работы паропровода в нерасчетных режимах осуществляется за счет увеличенного отпуса пара в размере 40–60%.

Графическая зависимость удельных тепловых потерь с единицы длины паропровода от диаметра представлена на рис.2. Если пересчитать удельные тепловые потери в зависимости от скорости движения пара, то графически для рассматриваемого паропровода имеет вид, представленный на рис.3.

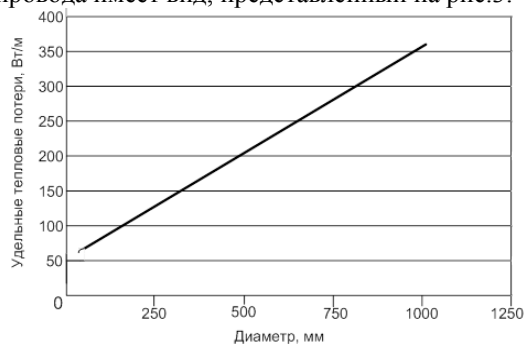


Рис. 2. Зависимость удельных тепловых потерь от диаметра паропровода.

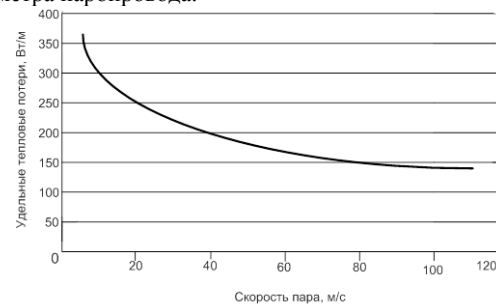


Рис. 3. Зависимость удельных тепловых потерь от скорости движения пара

С учетом неизменности диаметра существующего паропровода, прирост удельных тепловых потерь, возникающий из-за снижения скорости движения пара, представлен на рис.4.

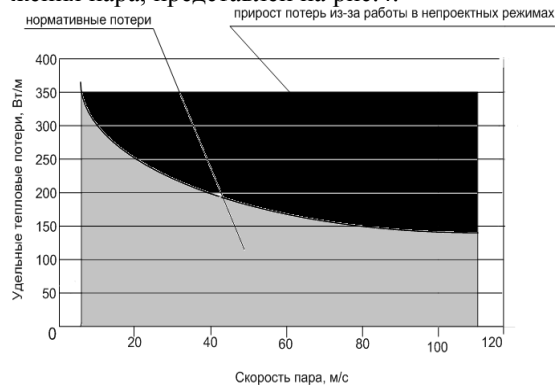


Рис. 4. Увеличение удельных тепловых потерь из-за работы паропровода в непроектных режимах

Из графика видно, что в результате снижения скорости движения пара до 6–10 м/с удельные тепловые потери возрастают на 40-60%, о чем было сказано ранее.

Из результатов расчета следует, что в существующей системе теплоснабжения в некоторых режимах работы не обеспечиваются требуемые параметры пара. Поэтому необходимы энергосберегающие мероприятия – изоляция и изменение диаметра труб.

В работе были рассмотрены 2 энергосберегающих мероприятия, направленных на поддержание договорных параметров пара у потребителей и снижение тепловых потерь [3]:

- 1) увеличение толщины изоляции паропровода;
- 2) обеспечение движения пара при экономичной скорости.

Рассмотрим эффективность применения следующих энергосберегающих мероприятий: изменение диаметра трубопровода и увеличение толщины теплоизоляции на примере паропровода от котельной.

В зимнем режиме работы паропровод от котельной полностью справляется с технологической нагрузкой. За счет экономически целесообразной скорости движения теплоносителя и большого расхода пара, все потребители получают пар заданных параметров, а именно – перегретый. Поэтому проведение энергосберегающих мероприятий возможно только с целью уменьшения полных, а следовательно, и удельных потерь. Выберем произвольный участок паропровода и сравним эффективность примененных энергосберегающих мероприятий. Результаты расчета представлены в таблице 1.

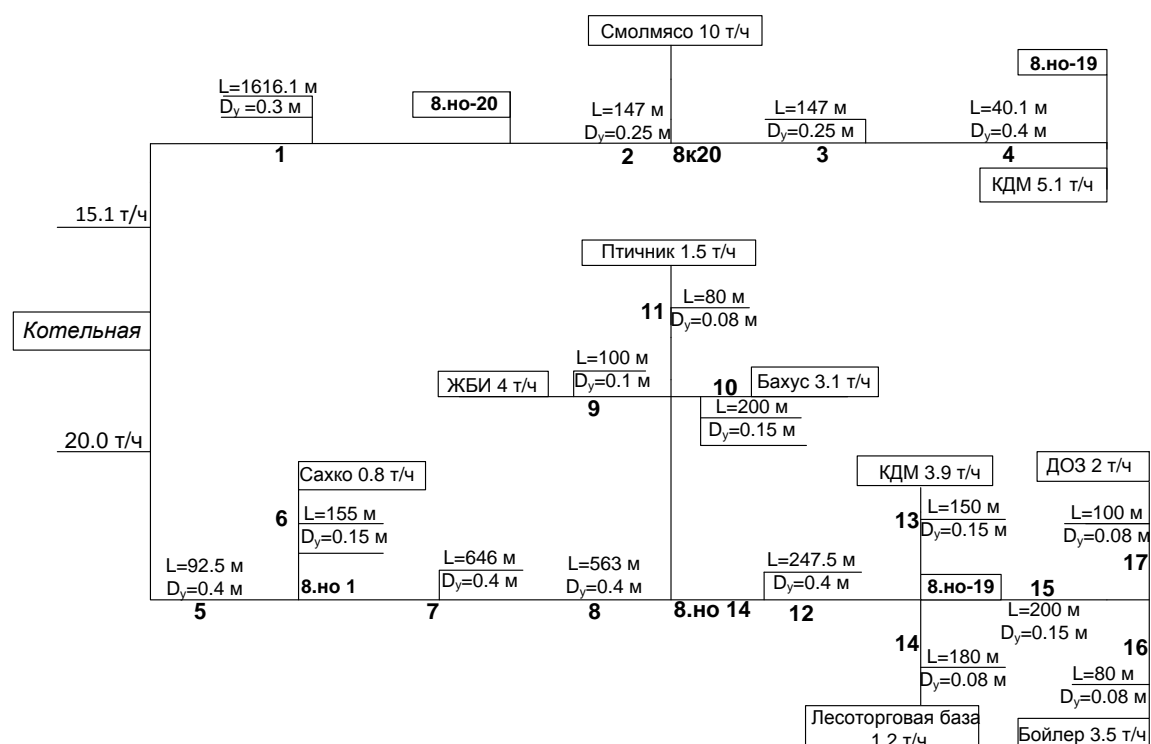


Рис.1. Схема подключения потребителей тепла к Смоленской ТЭЦ-1 (режим котельной) в зимнем режиме работы.

Таблица 1. Эффективность проведения энергосберегающих мероприятий в зимнем режиме работы

Участок	Техническая конструкция	Энергосберегающие мероприятия		
		Изменение диаметра $D_y$ : 0,15 → 0,1 м	Увеличение толщины изоляции $\delta_{из}$ : 0,12 м → 0,17 м	Увеличение толщины изоляции и диаметра трубопровода: $D_y$ : 0,15 м → 0,1 м $\delta_{из}$ : 0,12 м → 0,17 м
Участок 9, L=200 м	$D_y=0.15$ м, $\delta_{из}=0.12$ м.			
$Q$ , Вт	15851.22	15847.41	13328.19	4161.52
$q$ , Вт/м	79.26	79.24	66.64	20.81

Как показывают результаты, проведение таких энергосберегающих мероприятий как изменение диаметра и увеличение толщины изоляции по

отдельности, не сильно сказывается на величине удельных потерь на участке. Однако, при изменении этих параметров ( $D_y, \delta_{из}$ ) совместно, можно уви-



деть, что величина удельных потерь значительно уменьшается и составляет всего лишь 26,25% от потерь при первоначально заданной конструкции паропровода. Но проведение данных мероприятий требует капитальных затрат и может быть экономически невыгодно, поэтому первоначально необходимо оценить будут ли эти меры экономически оправданы и целесообразны при данной конструкции.

В летнем режиме работы, несмотря на высокие параметры пара, часть потребителей не получает теплоноситель требуемых параметров. Поэтому проведение энергосберегающих мероприятий в данном режиме является необходимым условием.

Аналогично зимнему режиму, выберем произвольно участок паропровода и сравним эффективность проведения энергосберегающих мероприятий (табл.2).

Таблица 2. Эффективность проведения энергосберегающих мероприятий в зимнем режиме работы

Участок №13, L=150 м	Техническая конструкция $D_y=0.15\text{ м},$ $\delta_{из}=0.12\text{ м}.$	Энергосберегающие мероприятия		
		Изменение диаметра $D_y:$ 0.15 м → 0.1 м	Увеличение толщины изоляции $\delta_{из}:$ 0.12 м → 0.17 м	Увеличение толщины изоляции и диаметра трубопровода: $D_y: 0.15\text{ м} \rightarrow 0.1\text{ м}$ $\delta_{из}: 0.12\text{ м} \rightarrow 0.17\text{ м}$
Q, Вт	8308.64	6780.12	7651.37	6460.65
q, Вт/м	55.39	45.20	51.01	43.07

В отличие от зимнего режима, увеличение толщины изоляции при неизменном диаметре является не самым эффективным мероприятием по сбережению тепловой энергии. Увеличение толщины слоя тепловой изоляции на 42% дает уменьшение удельных тепловых потерь всего на 8%, что показывает низкую эффективность влияния толщины изоляции в летнем режиме работы, и при этом часть потребителей получает влажный пар вместо перегретого. При данном режиме работы конструктивно можно исполнить только изменение диаметра трубопровода без изменения толщины теплоизоляционного слоя, как тепловые потери при данных случаях фактически равны, а увеличение теплоизоляции требует наибольших капитальных затрат.

Исходя из специфики рассматриваемого объекта из всех энергосберегающих мероприятий применимо только усиление теплоизоляции паропровода.

Для этого рассчитаем срок окупаемости. Расчет проведем исходя из следующих условий:

1) толщину изоляции увеличим на 0.05 м (с 0.12 до 0.17 м);

2) расчет проведем для одного ответвления паропровода, в котором пар к потребителям приходит влажным.

При стоимости 1 Гкал/ч = 1485.5 руб., получается, что экономия тепла при увеличении толщины изоляции трубопровода составляет 363.1 Гкал/ч или 539385.1 рублей в год. При работе котельной, получим, что окупаемость проведения такого энергосберегающего мероприятия составляет около 2.2 лет. Таким образом, можно рекомендовать данное мероприятие как энергосберегающее.

Несмотря на то, что тепловые потери уменьшаются фактически на 13%, конечные потребители (2 из 8) все равно не получают пар заданных параметров.

Ниже представлены расчеты по экономии тепла при увеличении толщины изоляции на 0.1 м (таблица 3).

Графически зависимость тепловых потерь от увеличения толщины изоляции приведена на рис. 5.

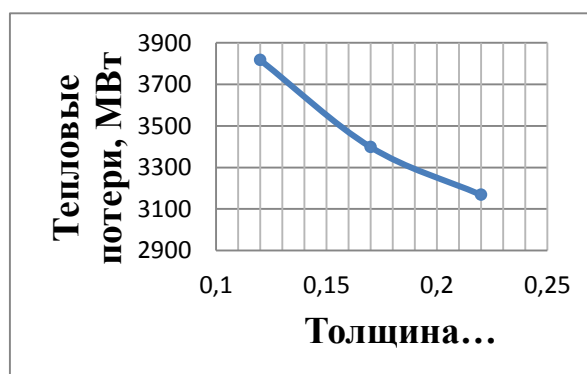


Рис.5. Зависимость тепловых потерь от толщины теплоизоляционного материала

Из анализа расчетов следует, что оптимальным следует признать увеличение толщины изоляции до 0.17 м, так как дальнейшее увеличение толщины изоляции приводит к продлению срока окупаемости мероприятия при незначительном повышении качества пара получаемого потребителями.

**Таблица 3. Сравнение эффективности и экономической целесообразности увеличения толщины изоляции**

Толщина теплоизоляционного слоя, $\delta_{из}$ , м		Изоляция при конструкции 0.12	0.17	0.22
Тепловые потери Q, ГДж	Летний режим	3 606.11	3 165.00	2 978.50
	Зимний режим	10 136.01	8 087.45	7 444.97
ИТОГО	ГДж:	13 742.12	11 252.45	10 423.50
	Гкал:	3 279.74	2 685.55	2 487.71
Уменьшение тепловых потерь по сравнению с заводской изоляцией, %			18.2	24.1
Экономия тепла, при увеличении изоляции, Гкал/год			594.2	792.0
Стоимость 1 Гкал/ч: 1485.5 руб.				
Годовая экономия за счет уменьшения потерь тепла, руб.			882 684.1	1 176 516
Стоимость проведения энергосберегающего мероприятия, руб.			2 955 395	5 910 790
Окупаемость энергосберегающего мероприятия, лет.			3.4	5.0
Количество потребителей, получающих пар заданных параметров / количество всех потребителей			6/8	7/8

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года".
2. СП Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов
3. **Киселева А.И.**, Фокин А.М. Энергосберегающие мероприятия по снижению тепловых потерь при транспортировке пара с целью поддержания параметров у потребителей // Энергетика, информатика, инновации -2018: сборник трудов VIII-ой Международной научно-технической конференции. Смоленск: Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, 2018.

*Т.А. Матухнов, О.Д. Матухнова, М.Ю. Юркина*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НАКИПИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе рассмотрен вопрос о существующих недостатках системы химводоподготовки теплоэнергетических систем. Проведен анализ литературных данных и анализ работ по проблеме исследования образования отложений солей жесткости в теплообменном оборудовании и методов расчета скорости образования и влияния на теплогидравлические характеристики оборудования.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

На современном этапе развития теплоэнергетической отрасли России проблема образования отложений на внутренней поверхности теплотехнического оборудования систем теплоснабжения является актуальной задачей при эксплуатации. Изменение проходного сечения диаметра теплообменного оборудования и трубопроводов вследствие образования отложений увеличивает гидравлическое и термическое сопротивление, что приводит к повышению расхода электроэнергии на перекачивание теплоносителя и увеличению удельного расхода топлива на производство тепловой энергии, а через непродолжительное время теплообменное оборудование и вовсе становится непригодным к использованию.

Существующие методы расчета интенсивности образования отложений различны в определяющих факторах данного процесса. Некоторые исследователи в своих работах определяющим фактором процесса выпадения солей жесткости на поверхности нагрева считают предел растворимости солей при соответствующей температуре. Скорость процесса определяется значением местной тепловой нагрузки во второй степени. Другие авторы полагают, что масса отложений на поверхности теплообмена может быть пропорциональна плотности теплового потока в первой, второй и более высокой степени.

### **2. ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Образование отложений на внутренней части теплотехнического оборудования обусловлено

процессом кристаллизации: при нагреве, испарении или кипении происходит выделение твердой фазы из перенасыщенного раствора солей в воде, а механизм и интенсивность образования отложений обусловлены их содержанием в воде [1].

Основу отложений в системах с очищенной водой составляют соединения железа (50-80 %), т.е. продукты коррозии, а для системы технической воды - соединения  $Ca^{+2}$  (30-90 %), дисперсные частицы или продукты коррозии конструкционных материалов теплообменной поверхности. Карбонаты, являясь основным компонентом отложений в теплообменниках системах технической воды, кристаллизуются более чем в 30 модификаций, но чаще и в виде кальцита и арагонита. При этом в основной массе отложений содержится арагонита 7-52 %, кальцита - 10-35 %, оксида кальция - 10 % и сложных комплексов таких, как: сидерита - 2-10, серпентинита - 4-9, оксалата - 1-6, магнезита - 4-6, фосфорита - 1-3, магнетита - до 1% и др. [2].

Усовершенствованный метод анализа для интерпретации обрастания в кожухотрубных теплообменниках используется в работе [3]. В результате исследования получено, что сопротивление образованию отложений на стенках теплообменника тем выше, чем ниже его температурная эффективность.

Автор [1] выделяет три формы отложения солей:

- 1) Первичная накипь – отложения выпадают непосредственно на поверхности нагрева;
- 2) Шлам – отложения, выпадающие в объеме раствора на поверхности взвеси;
- 3) Вторичная накипь – отложения взвеси, прикипающие к поверхности нагрева.

Между данными формами отложений не существует четкой границы, так как при определенных условиях накипь может преобразовываться в шлам, а шлам в накипь.

В работе [4] автор приводит характеристику отложений и коэффициент теплопроводности к каждому виду накипи, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики отложений

Вид накипи	Характер отложений	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Силикатная накипь (с содержанием SiO <sub>2</sub> 20-25% и более)	твёрдая	0,06 - 0,23
Гипсовая накипь (с содержанием CaSO <sub>4</sub> до 50%) сульфатная	твердая плотная	0,60 - 2,90
Карбонатная накипь (с содержанием CaCO <sub>3</sub> , MgCO <sub>3</sub> более 50%)	от аморфного порошка до твердого котельного камня	0,60 - 7,00
Смешанная накипь, состоящая из гипса, карбонатов и силикатов кальция и магния	твердая плотная	0,80 - 3,50

Накипь классифицируют в следующие виды [5]:

- карбонатная накипь (соли кальция и магния – CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>) – откладываются в форме плотных кристаллических отложений на внутренней поверхности оборудования, где отсутствует кипение воды и имеется щелочная среда;

- сульфатная накипь (CaSO<sub>4</sub>) – при осаждении как следствие понижается растворимость сульфата кальция и происходит увеличение температуры. Чем выше температура испарения или напряженность поверхности нагрева, тем меньше кратность упаривания, при которой начинается отложение сульфатной накипи, составляет основную помеху в работе испарителей при температуре выше 100 - 120 °С.;

- силикатная накипь (CaSiO<sub>3</sub> – кремнекислые соединения кальция, магния, железа, алюминия) – содержит более 20% кремневой кислоты, образуется на наиболее теплонапряженных элементах поверхности и обладает большой твердостью и очень малой теплопроводностью, чаще всего встречается в котлах высокого давления, даже при малой толщине очень опасна.

Существует три основных этапа осаждения на внутреннюю поверхность оборудования описываются в [6]:

- 1) Диффузионный перенос молекул вещества через пограничный слой, прилегающий к поверхности оборудования;
- 2) Адгезия осадка к поверхности;
- 3) Отрыв частиц от поверхности.

### 3. ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ

В источнике [6] описано влияние толщины отложений на скорость и число Re потока смеси. При уменьшении диаметра проходного сечения в 2 раза, в связи с образованием отложений, и при постоянном расходе, скорость смеси увеличивается в 4 раза, а число Re увеличивается в 2 раза. Кроме того, шероховатость поверхности отложений будет отличаться от шероховатости внутренней поверхности чистого оборудования, что приводит к изменению уровня турбулентности, особенно вблизи поверхности. Большая шероховатость создаст большую турбулентность или более гладкая поверхность может снизить уровень турбулентности.

В работе [7] отмечена особенность образования отложений: при высоких скоростях верхняя поверхность растущего слоя накипи гораздо более

гладкая. Массовые потоки с большой скоростью, преобладающие в этих условиях, имеют тенденцию влиять на морфологию растущих кристаллов накипных отложений, приводя к появлению своеобразных округлых чашечек на поверхности.

В работе [8] описано влияние накипи на работу систем отопления многоквартирных домов. Образование отложений на внутренней части трубопроводов системы отопления при уменьшении диаметра на один миллиметр необходимо увеличить напор на 20 % для поддержания расчётного расхода, при уменьшении на 5 миллиметров необходимо увеличить разность давления в 2 раза, а при уменьшении на 7 миллиметров – увеличение разности давления составляет 6 раз.

Результаты исследований представленные в [4], по влиянию толщины отложений на коэффициент теплопередачи пластинчатого и кожухотрубчатого теплообменников первой и второй ступеней подготовки горячего водоснабжения приведены на рисунке 4. Коэффициент теплопередачи у пластинчатого теплообменника почти в 2 раза выше, чем у кожухотрубчатого. При толщине слоя накипи в 1 мм, коэффициент теплопередачи уменьшается, в случае с кожухотрубным теплообменным аппаратом снижение коэффициента в 2 раза, а с пластинчатым – в 2,5 раза.

По результатам работ [4; 9] можно сделать вывод, что теплообменный аппарат с большим расчетным значением коэффициента теплопередачи значительно более чувствителен к поверхностному загрязнению, чем теплообменник с более низким расчетным коэффициентом теплопередачи (т.е. его коэффициент теплопередачи при одной и той же толщине отложений уменьшается на большую долю).

В статье [10] описаны результаты исследований при образовании накипи в котельном агрегате КВ-Г-4,0-115Н, предназначенном для теплоснабжения потребителей. При толщине в один миллиметр в жаровой трубе увеличивается температура стенки на 100 – 120 °С. При толщине накипи три миллиметра и более температура металла достигает уже более 500 °С и углеродистая сталь теряет свою прочность.

Также автор описывает увеличение расхода топлива (табл. 2). Перерасход топлива котлов достигает 10% при толщине коррозионно-накипных отложений в один миллиметр.

Таблица 2. Зависимость перерасхода топлива от толщины отложений

Наименование показателя	Ед. изм	Показатель							
		0,4	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4	9,6	12,7
Толщина слоя накипи	мм	0,4	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4	9,6	12,7
Перерасход газа	%	4	7	11	18	27	38	48	60
Перерасход угля	%	8	14	22	36	54	76	96	120
Перерасход жидкого топлива	%	4	7	11	18	27	38	48	60

Образование отложений солей на внутренней поверхности теплотехнического оборудования негативно влияет на гидравлическим режим. В статье [11] приводится опыт эксплуатации теплообменного оборудования, в результате которого при расчетном гидравлическом сопротивлении теплообменных аппаратов равным 0,4 кгс/см<sup>2</sup>, фактическое значение сопротивления достигало значений равных 2,0 - 2,5 кгс/см<sup>2</sup>.

#### 4. ВЫВОДЫ

Возникновение накипи на теплообменном оборудовании приводит к следующим последствиям:

- перерасход топлива;
- ускоренный износ участков и деталей оборудования;
- невозможность реализации заданного технологического процесса в связи с нарушением проектного температурного графика;
- увеличивается вероятность возникновения аварийной ситуации;
- уменьшение коэффициента теплопередачи;
- увеличение гидравлического сопротивления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минаев А.П., Гладкова Н.А., Крюков А.А. Процессы накипеобразования и коррозии в элементах судовых энергетических установок // Вологодские чтения. 2009. № 75. с. 115-117;
2. Бубликов, И. А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых атомных электростанций: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.14 / НПИ. – Новочеркасск, 2004;
3. T. Takemoto, B. D. Crittenden, S. T. Kolaczowski. Interpretation of fouling data in industrial shell and tube heat exchangers // Trans IChemE, 1999, 77, с. 769-778;
4. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017);
5. Абрамов В.А. Накипеобразование в судовых теплообменниках, методы их очистки и растворимость CaCo<sub>3</sub> в растворах сульфаминовой кислоты при повышенных давлениях Co<sub>2</sub> // Судовые энергетические установки. 2013. № 31. с. 5-24;
6. T.R. Bott, Fouling of Heat Exchangers, Elsevier, Amsterdam, 1995;
7. D. Hasson, in: E.F.C. Somerscales, J.G. Kundsen (Eds.), Precipitation Fouling, in Fouling of Heat Transfer Equipment, Hemisphere, Washington, DC, 1981, pp. 527–568;
8. Минко В. А. Влияние накипи на работу систем отопления / В. А. Минко, А.С. Семенов, И.В. Гунько, Ю.В. Елистратова, Л.Н. Колца, Л.В. Ткач // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – 2014. Белгород. № 6. с. 21-23;
9. Абдуллин Ю.Р., Габдрахимов А.Т., Смородова О.В. Влияние загрязнения поверхностей теплообмена на работу аппаратов // «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки». 2018. № 8. (24);
10. Васильев А.В. Особенности водного режима при эксплуатации современных жаротрубных водогрейных котлов // Новости теплоснабжения. 2002. № 4. с. 50-52.;
11. Жаднов О.В. Пластинчатые теплообменники - дело тонкое // Новости теплоснабжения. 2005. № 1.

*Б. Бу Дакка<sup>1</sup>, И.А. Султангузин<sup>1</sup>, Ю.В. Яворовский<sup>1</sup>, А.И. Бартенев<sup>1</sup>, Н.А. Белехова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, кафедра ПТС, ИЭВТ «НИУ «МЭИ»

## КАМЕРА СГОРАНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА

### АННОТАЦИЯ

В связи с быстрым ростом численности населения спрос на электроэнергию и транспорт привел к новой волне исследований в энергетическом секторе. Для производства и транспортировки энергии требуется сжигать большое количество топлива [1]. Газотурбинные двигатели вносят свой вклад в производство энергии в течение нескольких десятилетий. Разработка таких двигателей помогла снизить расход топлива, а также уменьшить количество загрязняющих веществ в уходящих газах. В докладе рассмотрены конструкции камеры сгорания для сжигания водорода в микрогазовых турбин.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Экологическая проблема является очень актуальной для многих исследователей во всем мире. Несмотря на множество причин, влияющих на величину выбросов, на промышленный сектор приходится около 50% парниковых газов. Необходимы срочные меры для значительного сокращения этих выбросов. В результате этого, в настоящее время в мире наблюдается тенденция к значительно большему использованию водородной энергетики. С другой стороны, накопление энергии, как в среднесрочной, так и в долгосрочной перспективе, наиболее осуществимо за счет использования избыточной электроэнергии (например, производимой ветроустановками при сильном ветре) для получения зеленого водорода с помощью электролиза [2]. Однако низкая объемная плотность энергии водорода ( $\sim 2,7$  кВтч /  $\text{nm}^3$ ) [3] заставляет сосредоточить исследования на преобразовании водорода в другие формы хранения. Такие формы, как аммиак или синтетическое топливо на основе углерода [4], особенно удобны для транспортных применений. Но такой способ оказывается очень дорогим. Поэтому лучшим вариантом, особенно для стационарных применений, является непосредственное использование водорода для выработки электроэнергии. Одной из актуальных проблем современного мегаполиса является строительство крупных электростанций и нестабильность в подаче электроэнергии. Поэтому децентрализованные энергосистемы являются самым логичным выбором. Таким образом, становится очевидной важность исследований в области проектирования малых и средних газовых турбин, работающих на водород-

ном топливе микрогазовых турбин МГТ, для повышения эффективности отечественного производства тепла и электроэнергии [5]. Чтобы конкурировать с другими двигателями внутреннего сгорания, газотурбинная установка должна иметь КПД 40%. Для этого нужно решать две основные проблемы: проектирование камеры сгорания для использования водорода с низкой эмиссией оксидов азота и турбины с высокой температурой на входе [5]. Авторы в работе [6] проанализировали информацию, полученную в ходе выполнения нескольких проектов по синтез-газу, использование которого способствует снижению затрат и повышению эксплуатационной надежности газовых турбин. Согласно их выводам, в будущем необходимы дальнейшие улучшения конструкции установки и работы системы в целом. Поэтому в этом докладе мы рассмотрим наиболее важные современные тенденции в проектировании камеры сгорания газотурбинной установки (ГТУ), в особенности для тех, которые работают на водороде, и разработаем предварительную концепцию камеры сгорания для микрогазовой турбины мощностью 100 кВт.

### 2. КАМЕРА СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ

Конструкция газотурбинного двигателя и состав топлива являются ключевыми параметрами для количественной оценки выбросов. Сегодня производители оборудования газовых турбин разрабатывают новые конструкции для работы в широком диапазоне нагрузок и на различных видах топлива, соблюдая при этом нормы выбросов, а также повышая экономичность по расходу топлива [7]. Кроме того, выбросы парниковых газов могут быть снижены за счёт улучшения качества топлива и повышения эффективности сгорания. Но основной вклад в общий объем выбросов при любых условиях оказывает  $\text{NO}_x$ . Стандарты по выбросам  $\text{NO}_x$  строго регламентированы во всем мире. Однако, для удовлетворения вводимых в настоящее время весьма жестких требований и ограничений на вредные выбросы газотурбинных двигателей, требуются существенные изменения конструкции фронта кольцевых камер и внедрение микромодульных форсунок или горелок с низкими выбросами  $\text{NO}_x$ . Высокие экологические показатели ка-

меры сгорания и для всей ГТУ можно получить тремя основными методами [1]:

- применением камер сгорания обычной конструкции с диффузионным факелом и впрыском воды (пара);
- дополнительным использованием каталитической очистки выходных газов ГТУ;
- применением сухого микрофакельного многоступенчатого сжигания обедненной топливной смеси в сухих камерах сгорания.

### 3. КАМЕРА СГОРАНИЯ ВОДОРОДА

Конструкция водородной камеры сгорания полностью отличается от камеры, работающей на природном газе. Например, проблема нестабильности водородного пламени может привести к катастрофическому удару пламени в обратном направлении. В настоящее время, геометрия экспериментальной камеры сгорания, работающей на водороде или водородсодержащих газах, имеет 3 основных типа конструкции.

#### 3.1. Одинарное сопло с дополнительной конструкцией завихрителя

Эта конструкция (тип 1) основана на конструкции классических крупномасштабных камер сгорания газовых турбин, использует одно центральное сопло с добавленным завихрителем потока для стабилизации пламени и улучшения внутреннего смешивания выхлопных газов в одном объеме, как в статьях [8-10].

#### 3.2. Конструкция с несколькими тангенциально установленными соплами

Эта конструкция приводит к образованию большого стабилизирующего вихря в пламени, аналогичного конструкции типа 1, но без необходимости в отдельном завихрителе. Например, конструкция, рассмотренная в исследовании [11].

Компания Capstone, производитель микрогазовых турбин (МГТ) из США, уже много лет успешно использует конструкцию типа 2 для сжигания метана. Также уже была проведена экспериментальная работа по сжиганию либо чистого водорода, либо метано-водородной смеси [11]. Это связано с тем, что эти агрегаты работают при высоком интервале теплотворной способности. Например, газотурбинная установка ГТУ Capstone C200 с электрической мощностью 200 кВт, имеет определенные требования к качеству газа: требуемая теплотворная способность газа должна находиться в пределах от 7,34 до 100,5 МДж/м<sup>3</sup> [12].

#### 3.3. Конструкция с несколькими соплами «микромикс»

В этой конструкции формирование стабильности пламени происходит с помощью нескольких стабильных струй, создаваемых рядом небольших кольцевых сопел, как и в справочных исследованиях [13,14].

Авторы статьи [15] предположили, что наиболее выгодной геометрией для уменьшения выбро-

сов NO<sub>x</sub> при сжигании водорода является геометрия микромикса (тип 3). Все три концепции камер сгорания уже были протестированы экспериментально в лабораторных условиях [8, 16], продемонстрировав их потенциал с точки зрения стабильности пламени и контроля выбросов.

### 4. СЖИГАНИЕ ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ (ВСГ)

При сжигании водородсодержащих газов (ВСГ) с высокой концентрацией водорода потребуются замена или модернизация горелочного устройства. Горелочное устройство, адаптированное для сжигания водорода, должно быть оборудовано не только системой обнаружения «обратного» пламени, но и защитой от распространения пламени вверх по потоку. Система подготовки ВСГ должна иметь специальную систему мониторинга состояния оборудования и газопроводов. Газопроводы и запорно-регулирующая арматура должны быть изготовлены из материалов, позволяющих избежать водородного охрупчивания [17]. В статье [12] была рассмотрена конструкция камеры сгорания ГТУ, разработанная для сжигания твердых коммунальных отходов ТКО. Для расчета технологической схемы утилизации была за основу взята ГТУ Capstone C200 с электрической мощностью 200 кВт. Для конструкции камеры сгорания ГТУ определены основные габаритные размеры жаровой трубы – объем 0,011 м<sup>3</sup>; диаметр 0,178 м; длина 0,533 м; диаметры отверстий для вторичного воздуха в зонах горения 0,016 м и смешения 0,012 м, что показано на рис. 1. Трёхмерное моделирование процесса горения топливной смеси синтез-газа в трубчатой камере сгорания газовой турбины представлено в работе [18]. Цель работы состоит в том, чтобы понять влияние состава топлива и теплотворной способности на эффективность сгорания и образование вредных выбросов. Состав топлива, сжигаемого в камере сгорания, был изменен с природного газа (метана) на топливо, состоящее из синтез-газа с объемным соотношением водорода к монооксиду углерода (H<sub>2</sub>/CO) в диапазоне от 0,63 до 2,36. Геометрия трубчатой камеры сгорания газовой турбины показана на рис. 2. Размер камеры сгорания составляет 590 мм в направлении Z, 250 мм в направлении Y и 230 мм в направлении X для 50 кВт с использованием метана. Из результатов исследования было установлено, что температура пламени для синтез-газа зависит не только от отношения водорода к монооксиду углерода (горючие компоненты), но и от объемной доли негорючего (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) в синтез-газе. Чем выше объемная доля водорода в синтез-газе, тем выше температура газа, и чем выше объемная доля инертного газа в синтез-газе, тем ниже температура газа. Кроме того, единственным топливом, состоящим из синтез-газа, которое показывает снижение массы NO<sub>x</sub> на 33% на единицу выработки энергии, является синтез-газ с высокой объемной долей содержания воды (22,6%).



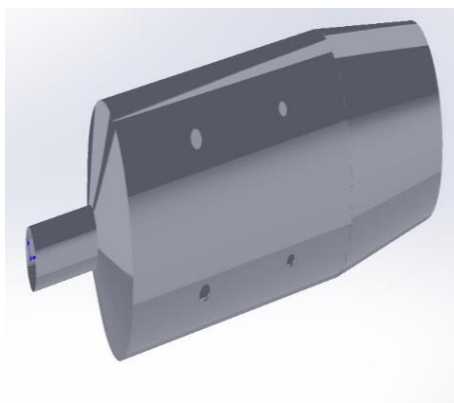
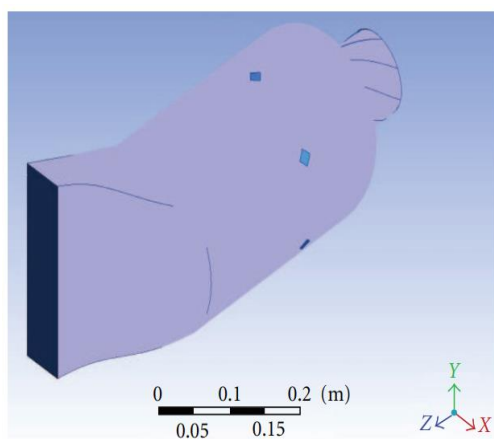


Рис. 1. Прототип жаровой трубы по результатам конструкторского расчета [12].



(b)

Рис. 2. Геометрия трубчатой камеры сгорания [18].

## 6. МИКРОГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА, РАБОТАЮЩАЯ НА СМЕСИ МЕТАНА И ВОДОРОДА

С использованием программы EPSILON проводилось исследование влияния объемной концентрации водорода в смеси с метаном, используемой в качестве топлива для сжигания в микрогазотурбинной энергоустановке (МГТУ), на рабочие параметры установки при следующих условиях.

- микрогазовая турбина рассчитана для выработки мощности 100 кВт;
- параметры воздуха, поступающего в компрессор, постоянны и равны: температура  $t=25^{\circ}\text{C}$ , давление  $p=1,013$  бар, расход  $M=0,7$  кг/с;
- давление воздуха на выходе компрессора является постоянным и равным 4,5 бар.

Исследования показали, что изменение концентрации водорода, добавляемого в топливо, существенно влияет как на объемный расход, так и на массовый расход топлива. По мере увеличения концентрации водорода массовый расход топливной смеси метан-водород уменьшается, в то время как объемный расход топливной смеси увеличивается, как показано на рис. 3. Это связано со снижением объемной удельной теплоты сгорания водорода в результате уменьшения плотности водорода.

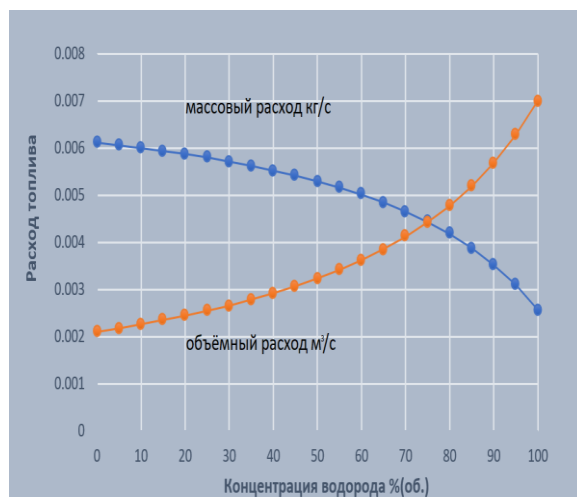


Рис. 3. Зависимость объемного и массового расхода топлива от объемной концентрации водорода % (об.).

Изменение объемного расхода топлива в камеру сгорания требует изменения диаметра горелочного устройства в камеру сгорания. На рис. 4 видно, что по мере увеличения объемного процента водорода, добавляемого в топливо, общая площадь сечения горелочного устройства для подачи топлива, увеличивается, когда скорость подачи топлива в камеру постоянна.

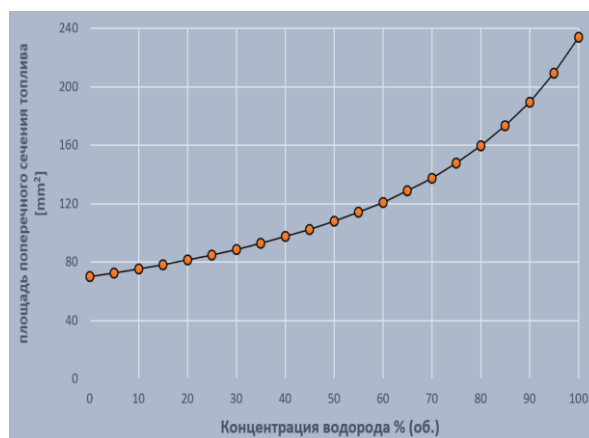


Рис. 4. Зависимость объемного и массового расхода топлива от объемной концентрации водорода % (об.).

## 5. КАМЕРА СГОРАНИЯ

Для определения конструкции камеры сгорания МГТ был проведен конструкторский расчет как показано в [19,20]. Расчет проводился для вырабатываемой мощности микрогазовой турбины 100 кВт при сжигании метана. В результате этого были определены основные габаритные размеры жаровой трубы – объем  $0,007$  м<sup>3</sup>, диаметр жаровой трубы  $0,06$  м, длина жаровой трубы  $0,150$  м, как показано на рис. 5.

Конструкция камеры сгорания будет разработана, чтобы позволять сжигать эквивалентное количество водорода для получения той же мощности (100 кВт) и при той же температуре отходящих газов.

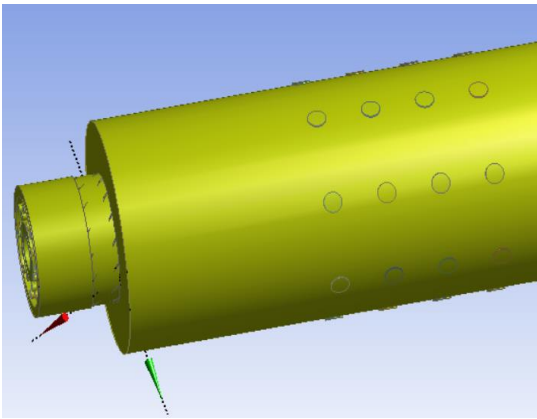


Рис. 5. Камера сгорания для выработки 100 кВт мощности.

Необходимые требования для достижения оптимальной конструкции камеры сгорания [21]:

- полное сгорание топлива;
- снижение падения давления в камере сгорания;
- удержание пламени внутри камеры сгорания;
- равномерность температуры на выходе из камеры сгорания для предотвращения повреждения или разрушения устройств путем термического крекинга;
- предотвращение загрязнения окружающей среды.

Следовательно, необходимо усовершенствовать конструкцию камеры сгорания, чтобы удовлетворить этим требованиям и, с другой стороны, реализовать возможность ее использования для сжигания водорода.

Трубчатые камеры сгорания просты по конструкции, удобны в эксплуатации, надёжны в работе. К преимуществам индивидуальных трубчатых камер сгорания относятся простота конструкции и сравнительно малые потери давления, достигающие 1,5 - 3 % [19]. Камера сгорания будет спроектирована с учетом следующих условий:

- улучшение смешивания воздуха с водородом за счет увеличения интенсивности турбулентности в камере сгорания на фоне увеличенной площади поверхности контакта между воздухом и водородом, что поможет уменьшить образование «горячей» области, и как следствие, уменьшить образование  $\text{NO}_x$ . Для этого используются 3 завихрителя с одинаковыми лопатками, установленными под определенным углом. Угол лопатки  $\beta$  был выбран на основе предыдущих исследований, которые предполагают, что угол  $\beta = 40^\circ$  лучше всего подходит для смешивания [22].
- принципы сухого сжигания с низким содержанием  $\text{NO}_x$  основаны на предварительном смешивании и, таким образом, снижение температуры горения. Однако, это невозможно для газовых турбин, работающих на водороде, из-за высокой воспламеняемости водорода, что увеличивает риск движения пламени в обратном направлении (воспламенение перед каме-

рой сгорания, приводящее к неконтролируемому сгоранию внутри камеры сгорания). Таким образом, в конструкции должно быть несколько коротких факелов вместо одного большого пламени. Это сокращает время пребывания в зоне высоких температур, что приводит к снижению выбросов  $\text{NO}_x$  [23].

- угол подачи топлива  $\alpha=40^\circ$  — это связано с тем, что направление потока топлива совпадает с линейным направлением движения воздуха ( $\beta= 40^\circ$ ). Следовательно, топливно-воздушная смесь горит на выходе из модульной горелки, и пламя в большей мере распределено по сечению. Кроме того, обратные потоки уменьшаются, а топливно-воздушная смесь направляется к выходу жаровой трубы.

На основании вышеизложенного будет подготовлен прототип камеры сгорания для сжигания водорода, который впоследствии будет изучен с помощью программы ANSYS для проверки эффективности и надежности работы.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство коммерческих камер сгорания микрогазовых турбин не способны сжигать топливо с высоким содержанием водорода, если они не модифицированы конструктивно.

В этом докладе были рассмотрены предлагаемые конструкции камеры сгорания для использования водорода. После этого были проработаны особенности конструкции такой камеры на основе данных, приведенных в современных исследованиях.

Далее планируется выполнение следующих задач:

- трехмерное моделирование горения метана в обычной камере сгорания;
- трехмерное моделирование горения водорода в модифицированной камере сгорания;
- изучение влияния новой конструкции на
  - распределение температур на стенках жаровой трубы;
  - распределение температур газов на выходе из камеры сгорания;
  - падение давления в камере сгорания;
  - образование выбросов  $\text{NO}_x$ .

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

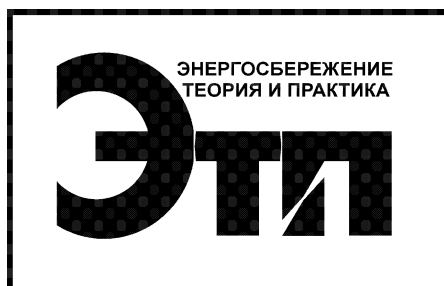
- МГТ — сокращенное наименование микрогазовых турбин;
- ГТУ — сокращенное наименование газотурбинной установки;
- ВСГ — сокращенное наименование водородсодержащих газов;
- ТКО — сокращенное наименование твердых коммунальных отходов;
- $\beta$  — угол подачи топлива,  $^\circ$ ;
- $\alpha$  — угол подачи топлива,  $^\circ$ ;
- $T$  — температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;
- $p$  — давление воздуха, бар;

М—массовый расход воздуха, кг/с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М.: Издательство МЭИ, 2002. 584 с.
2. **Noe M., Südmeyer I.J. and Gil Bardají M.E.** Study on mission-oriented r&i energy storage to speed up the energy transition // European Commission. Feb. 2018. Accessed: Mar. 13, 2022. [Online]. Available: <http://europa.eu>.
3. **Müller K., Geng J. and Arlt W.** Reversible vs. Irreversible Conversion of Hydrogen: How to Store Energy Efficiently? // Energy Technol. Jan. 2013. vol. 1, no. 1. P. 42–47. doi: 10.1002/ENTE.201200022.
4. **Bailera M., Lisbona P., Romeo L.M. and Espatolero S.** Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO<sub>2</sub> // Renew. Sustain. Energy Rev. Mar. 2017. vol. 69, P. 292–312. doi: 10.1016/J.RSER.2016.11.130.
5. **Devriese C., Penninx G., De Ruiter G., Bastiaans R. and De Paepe W.** The CFD Design and Optimisation of a 100 kW Hydrogen Fuelled mGT // Proc. ASME Turbo Expo. Jan. 2021. vol. 8. doi: 10.1115/GT2020-14473.
6. **Schefer R.W., Wicksall D.M. and Agrawal A.K.** Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner // Proc. Combust. Inst. 2002. vol. 29, no. 1. P. 843–851. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80108-0.
7. **Hong X. and Shi F.** Comparative analysis of small-scale integrated solar orc-absorption based cogeneration systems // Energies. 2020. vol. 13, no. 4. doi: 0.3390/en13040946.
8. **Mira D. et al.** Numerical Investigation of a Lean Premixed Swirl-Stabilized Hydrogen Combustor and Operational Conditions Close to Flashback // Volume 4B: Combustion, Fuels, and Emissions. Jun. 2018. vol. 4B-2018. doi: 10.1115/GT2018-76229.
9. **N. Iki et al.** NO<sub>x</sub> Reduction in a Swirl Combustor Firing Ammonia for a Micro Gas Turbine. Aug. 2018. doi: 10.1115/GT2018-75993.
10. **Calabria R., Chiariello F., Massoli P. and Reale F.** A Biogas Fuelled Micro Gas Turbine Using Dual-Fuel Approach. Aug. 2018. doi: 10.1115/GT2018-76667.
11. **Therkelsen P., Werts T., McDonell V. and Samuelsen S.** Analysis of NO<sub>x</sub> formation in a hydrogen-fueled gas turbine engine // J. Eng. Gas Turbines Power. May 2009. vol. 131, no. 3. doi: 10.1115/1.3028232.
12. **Кайраткызы А., Комаров И.И.** Разработка конструкции камеры сгорания для сжигания продуктов газификации ТКО // International Scientific Conference «Actual Questions and Innovations in Science II» Balikesir, Turkey, 2019. pp. 354–357.
13. **Hasemann S., Seliger H., Kutne P. and Aigner M.** Experimental and Numerical Design Study for a Small Scale Jet-Stabilized Micro Gas Turbine Combustor. Jun. 2018. doi: 10.1115/GT2018-75050.
14. **Liu X. et al.** Investigation of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>-Air Flame Characteristics of a Micromix Model Burner at Atmosphere Pressure Condition // ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Aug. 2018. vol. 4B-2018. doi: 10.1115/GT2018-76276.
15. **Ben Abdallah R., Sethi V., Gauthier P.Q., Rolt A.M. and Abbott D.** A Detailed Analytical Study of Hydrogen Reaction in a Novel Micromix Combustion System // ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Aug. 2018. vol. 4B-2018. doi: 10.1115/GT2018-76586.
16. **York W.D., Ziminsky W.S. and Yilmaz E.,** Development and testing of a low NO<sub>x</sub> hydrogen combustion system for heavy-duty gas turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. Feb. 2013. vol. 135, no. 2. doi: 10.1115/1.4007733/373379.
17. **Савитенко М.А., Рыбаков Б.А.** Снижение выбросов парниковых газов в водогрейных и паровых котлах // Энергетика и промышленность России. 2021. no. № 17-18. P. 420–421.
18. **Ghenai C.** Combustion of syngas fuel in gas turbine can combustor // Adv. Mech. Eng. 2010. vol. 2010. doi: 10.1155/2010/342357.
19. **Рудаченко А.В., Чухарева Н.В.** Газотурбинные установки для транспорта природного газа. Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
20. **Харитонов В.Ф.** Проектирование камер сгорания: учеб. пособие. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2008. 138 с. .
21. **Treedet W., Suntivarakorn R.** Effect of various inlet geometries on swirling flow in can combustor // J. Mech. Eng. Sci. 2018. vol. 12, no. 2. P. 3712–3723. doi: 10.15282/jmes.12.2.2018.16.0328.
22. **Садыкова С.Б.** Разработка и исследование микромодульных воздушных форсунок для кольцевых камер сгорания ГТД. Некоммерческое акционерное общество «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева».
23. **Boerner S., Funke H.H.-W., Hendrick P., Recker E. and Elsing R.** Development and integration of a scalable low NO<sub>x</sub> combustion chamber for a hydrogen-fueled aerogas turbine // Prog. Propuls. Phys. 4. 2013. P. 357–372. doi: 10.1051/EUCASS/201304357.





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одинадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 3

*Энергосбережение  
при потреблении энергии*

А.Д. Лобов<sup>1</sup>, А.А. Кобзева<sup>1</sup>, Ч.А. Кадыров<sup>1</sup>, В.С. Глазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ВЛИЯНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты расчета и анализ влияния на теплогидравлические характеристики теплообменника типа «труба в трубе» толщины накипи, появляющейся и растущей в кольцевом канале.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране существует много энергоемких производств в разных отраслях и секторах промышленности. К энергоемким отраслям относятся, например, нефтеперерабатывающая промышленность, металлургия, строительные материалы, химия и нефтехимия [1]. Так, доля удельных затрат в себестоимости промышленной продукции на топливо и энергию в 2012 году в нефтеперерабатывающей отрасли составляет 54,7 %.

Для повышения эффективности энергоемких производств могут использоваться:

- 1) Части отработанной тепловой энергии теплоносителей обратно в технологический цикл с помощью применения теплообменных аппаратов;
- 2) Теплоизоляционные материалы, снижающие потери тепловой энергии через наружные ограждения теплотехнологических установок, зданий и сооружений;
- 3) Оптимизации производства.

В настоящее время для повышения эффективности производства используются различные типы теплообменных аппаратов (ТА):

- Трубчатые;
- Пластинчатые;
- С развитой поверхностью;
- Регенеративные.

Трубчатые ТА в свою очередь подразделяются на:

- Кожухотрубные ТА;
- Змеевиковые ТА;
- Спиральные ТА;
- Теплообменники типа «труба в трубе».

Теплообменники типа «труба в трубе» используются в системах, в которых нужно подавать малые тепловые потоки.

Расчет теплоотдачи теплообменников «труба в трубе» описана в книге [4]. При развитом ламинарном режиме течения ( $Re < 2300$  при  $0,1 < Pr < 10^3$ ) формула вычисления теплоотдачи (1):

$$Nu_{lam} = Nu_{\infty} + f \left( \frac{d_i}{d_o} \right) \frac{0,19 [Pe(d_h/L)]^{0,8}}{1 + 0,117 [Pe(d_h/L)]^{0,467}} \quad (1)$$

Теплообмен при турбулентном течении в кольцевом канале, где обе стенки не теплоизолированные, рассчитывается по формуле (2):

$$\frac{Nu_b}{Nu_{tube}} = \frac{0,86(d_i/d_o)^{0,84} + [1 - 0,14(d_i/d_o)^{0,6}]}{1 + d_i/d_o} \quad (2)$$

Основной проблемой эксплуатации теплообменных аппаратов разных типов связано с уменьшением их эффективности, за счет образования загрязнения на теплопередающих поверхностях.

Так, эффективность теплообменника фирмы «Альфа-Лаваль», установленного в г. Санкт-Петербурге на центральном тепловом пункте (ЦТП), снижается на 5% после первого года эксплуатации, а после второго года на 15% [2].

Основными методами борьбы с загрязнениями поверхностей теплообменников являются:

- проведения химических промывок теплообменников;
- использование установок по очистке теплоносителя, например, воды;
- применение акустических противонакипных устройств;

В работе [3] исследователями из Белорусского государственного технологического университета рассмотрено влияние загрязнения на эффективность ТА воздушного охлаждения. В данной работе влияния загрязнений на тепловые характеристики учитываются при расчете тепловой эффективности ребер (3):

$$E = \frac{\tanh(\beta h_c)}{\beta h_c} \left\{ 1 - 0,372 \left[ 1 - \frac{1}{\operatorname{csch}(\beta h_c)} \right] \right\} \ln \frac{d_p}{d_n} \quad (3),$$

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{\lambda_p \delta_p \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}}$$

где  $h_c$  – сумма высоты ребра и половины его толщины;  $d_p$  – наружный диаметр ребра (материал – алюминий);  $d_n$  – наружный диаметр трубы, несущей ребра;  $\delta_p$  – средняя толщина ребра;  $\delta_3$  – толщина загрязнения;  $\lambda_p$  – теплопроводность ребра;  $\lambda_3$  – теплопроводность загрязнения.

Однако в работе не учитывается влияние отложений на изменение коэффициента теплоотдачи (КТО)  $\alpha$ . Кроме того, отложения, обладающие малым коэффициентом теплопроводности, выполняют роль тепловой изоляции. Значит её толщина, с точки зрения критического диаметра изоляции, будет определять величину теплового потока, передаваемого от одного теплоносителя другому через цилиндрическую

стенку. Поэтому, **целью** нашей работы является определение условий, при которых наличие и рост отложений на теплообменных поверхностях аппарата типа «труба в трубе» не снижает его тепловую эффективность.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКА

Таблица 1. Исходные данные

Наименование величины	Обозначение	Значение	Размерность
Температура горячего теплоносителя на входе	$T_1'$	368,15	К
Температура горячего теплоносителя на выходе	$T_1''$	343,15	К
Температура холодного теплоносителя на входе	$T_2'$	278,15	К
Коэффициент теплопроводности материала трубы	$\lambda_{тр}$	320	Вт/(м·К)
Коэффициент теплопроводности загрязнений	$\lambda_3$	0,06	Вт/(м·К)
Расход теплоносителя в трубе	$G_1$	1,217	кг/с
Расход теплоносителя в межтрубном пространстве	$G_2$	0,556	кг/с
Толщина стенки внутренней трубы	$\delta_{внут}$	0,005	м
Толщина стенки наружной трубы	$\delta_{наруж}$	0,005	м
Диаметр внутренней трубы	$d_{внут}$	0,38	м
Диаметр наружной трубы	$d_{наруж}$	0,44	м
Число часов эксплуатации ТА в году	$T_{год}$	8736	ч
Стоимость 1 кВт.ч	$S_{1кВт.ч}$	1,56	руб./кВт
Плотность материала внутренней трубы	$\rho_{внут}$	2700	кг/м <sup>3</sup>
Плотность материала внешней трубы	$\rho_{наруж}$	2700	кг/м <sup>3</sup>
Стоимость 1 кг материала внутренней трубы	$S_{внут}$	7	руб.
Стоимость 1 кг материала внешней трубы	$S_{наруж}$	7	руб.
Нормативный срок окупаемости капитальных вложений	$T_{норм}$	6	год
КПД насоса, используемого для прокачки 1-го т.н.	$\eta_1$	1	
КПД насоса, используемого для прокачки 2-го т.н.	$\eta_2$	1	

На данном графике представлено изменение коэффициента теплоотдачи, в зависимости от толщины образующегося загрязнения (см. рис. 1). При увеличении толщины отложений равномерно на двух стенках кольцевого канала, коэффициент теплоотдачи увеличивается.

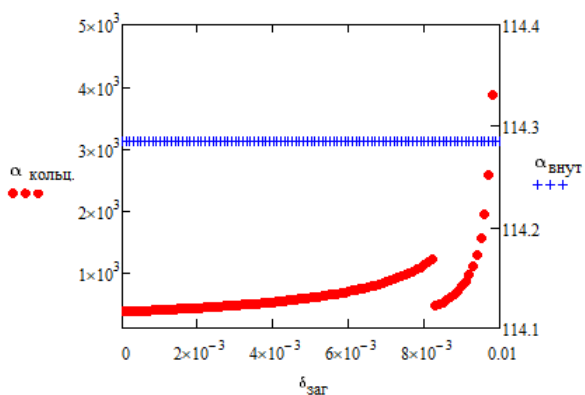


Рис. 1. КТО кольцевого канала (кружки) и внутреннего канала (крестики) в зависимости от толщины загрязнений

На рис. 2. представлено изменение коэффициента теплопередачи (К), в зависимости от толщины обра-

В работе рассматривается оптимизация теплообменного аппарата типа «труба в трубе» вода-вода, при заданных исходных данных (см. табл. 1).

Предполагается, что процесс теплообмена протекает в кольцевом канале, на внутренней и наружной стенках которого образуются отложения в виде силикатной накипи с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3 = 0,06$  Вт/(м·К).

зующихся загрязнений ( $\delta_{заг}$ ). Видно, что при одинаковом увеличении толщины отложений на 2-х стенках кольцевого канала, существует область, в пределах которой коэффициент теплопередачи уменьшается. Кроме того, стоит отметить наличие максимума величины коэффициента теплопередачи при толщине отложений в районе 1,2 мм. На интервале от 0 до 1,2 мм отложения увеличивают теплоотдачу.

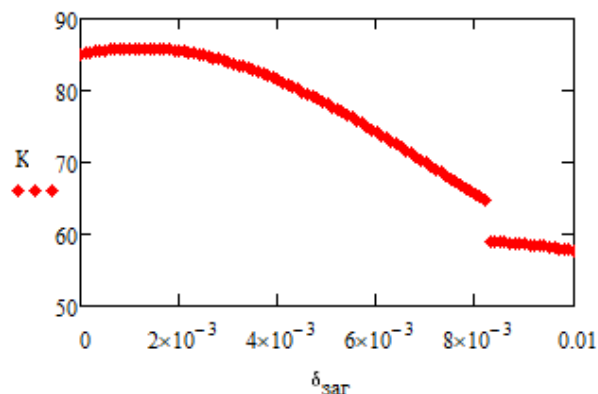


Рис. 2. Изменение локального коэффициента теплопередачи в зависимости от толщины отложений



На рис. 3. представлено изменение критического диаметра изоляции в зависимости от толщины отложений. Критический диаметр ( $D_{кр}$ ) имеет тенденцию к снижению на интервале от 0 до 8,1 мм, однако при толщине  $\delta_3 = 8,3$  мм происходит скачок значения критического диаметра изоляции, связанный со сменной режима течения в кольцевом канале. При толщине отложений  $\delta_3 = 1,2$  мм,  $D_{кр} = 0,3025$  мм.

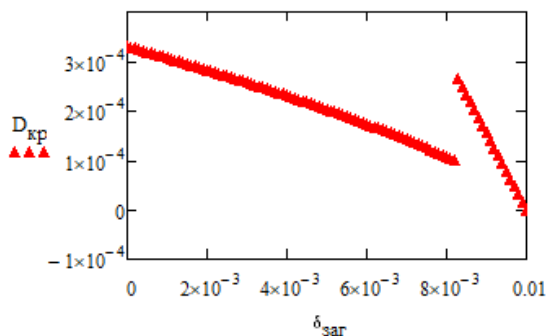


Рис. 3. Изменение критического радиуса изоляции в зависимости от толщины отложений

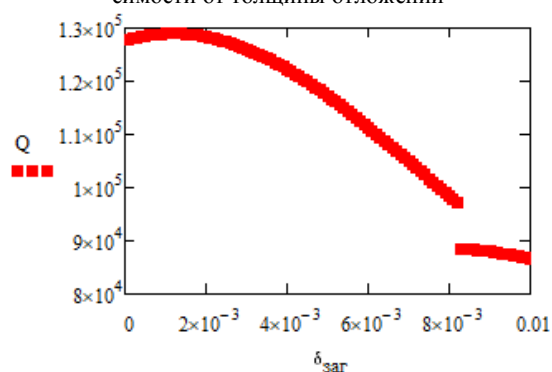


Рис. 4. Изменение суммарной мощности теплового потока в зависимости от толщины отложений

Как видно из графика рис. 4 существует область, в пределах которой увеличение толщины загрязнения приводит к монотонному снижению теплового потока. Однако стоит обратить внимание и на область, в которой наблюдается увеличение теплового потока при изменении толщины загрязнений на интервале от 0 до 1,2 мм. При значении  $\delta_3 = 1,2$  мм величина теплового потока ( $Q$ ) достигает максимума и составляет, при фиксированных исходных данных, 129 кВт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был рассмотрен теплообменный аппарат типа «труба в трубе», в кольцевом канале которого постепенно нарастает слой загрязнений, влияющий на теплогидравлические характеристики аппарата. Анализ полученных результатов

показал, что на начальном этапе, когда толщина отложений изменяется от нуля до 1,2 мм, тепловой поток увеличивается, а затем падает до исходного значения. При толщине загрязнения превышающей 1,2 мм наступает период резкого снижения теплового потока. По нашему мнению, такое явление можно объяснить тем, что диаметр отложений вначале меньше критического диаметра изоляции, а затем превышает его. Поэтому тепловой поток вначале увеличивается, а потом падает до исходного значения. При толщине загрязнения, превышающей 3 мм, наступает период резкого снижения теплового потока. Полагаем, что, если на начальном этапе роста теплового потока постепенно снижать расход теплоносителя с учетом скорости отложений, то в результате этой процедуры должен измениться коэффициент теплоотдачи и, как следствие, критический диаметр изоляционной накипи, что должно привести к сохранению или медленному снижению величины теплового потока. Следовательно, даже при наличии отложений можно обеспечить необходимые показатели для потребителя путем регулирования режимных параметров одного из теплоносителей. Отмеченная процедура позволит сэкономить на затратах, связанных с прокачкой теплоносителя, и замедлить темп нарастания загрязнений.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КТО – коэффициент теплоотдачи;  
 ТА – теплообменный аппарат;  
 $D_{кр}$  – величина критического диаметра изоляции, м;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $h_c$  – сумма высоты ребра и половины его толщины, м;  
 $d_p$  – наружный диаметр ребра, м;  
 $d_n$  – наружный диаметр трубы, несущей ребра, м;  
 $\delta_p$  – средняя толщина ребра, м;  
 $\delta_3$  – толщина загрязнения, м;  
 $\lambda_p$  – теплопроводность ребра, Вт/м·К;  
 $\lambda_3$  – теплопроводность загрязнения, Вт/м·К;  
 $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  
 $Q$  – величина теплового потока, Вт;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Промышленность России. 2012. Росстат.
2. Слепченко В.С., Быстров В.Д., Зак М.Л., Палей Е.Л. «Отопительные котельные малой мощности» // «Новости теплоснабжения», 2004 г., № 9, с. 24-33.
3. Володин В.И., Кунтыш В.Б., Петреева Н.Г., Бессонный А.Н., Бессонный Е.А. Влияние внешнего загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов воздушного охлаждения.
4. Петухов Р. Д. Справочник по теплообменникам. Ленинградское отделение: Энергия, 1971.

*Т.С. Вайсс<sup>1</sup>, Л. Вайсс<sup>2</sup>, А.Б. Горяев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup>Университет Фридриха-Александра Эрланген-Нюрнберг, Германия

## СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ПРЯМЫМ ВПРЫСКОМ

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена анализу современного состояния развития технологии прямого впрыска топлива в камеру сгорания автомобильного бензинового двигателя. Представлено описание важных особенностей смесеобразования в камере сгорания двигателя с прямым впрыском, приведено обоснование основных преимуществ технологии, ведущих к достижению существенной теоретической экономии топлива, проанализированы трудности применения технологии и пути их решения. Сделан вывод о необходимости проведения дополнительных исследований с целью получения подробной информации о полях температур, концентраций и давлений в камере сгорания двигателя с прямым впрыском.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Технология прямого впрыска топлива применяется в большинстве двигателей внутреннего сгорания современных автомобилей. Она пришла на смену технологии распределённого впрыска, главное её отличие от которой состоит в том, что впрыск топлива происходит напрямую в камеру сгорания двигателя без использования камеры для предварительной подготовки топливно-воздушной смеси.

Технология прямого впрыска топлива прошла долгий путь развития с момента её первого применения в авиационных двигателях в 1940-е годы, а затем и в автомобильном двигателе, впервые представленном на рынке компанией Mitsubishi в 1996 году. На настоящий момент технология прямого впрыска применяется с целью повышения эффективности двигателей внутреннего сгорания, а также удовлетворения современных требований к выбросам от автомобильного транспорта путём снижения потребления топлива.

Настоящая работа ставит своей целью представление и анализ современного состояния развития технологии прямого впрыска, актуальных проблем в области её применения и путей их решения.

### 2. ПРЯМОЙ ВПРЫСК ТОПЛИВА

#### 2.1. Особенности смесеобразования

К стандартным условиям в камере сгорания автомобильного бензинового двигателя можно отнести давление впрыска 100–170 бар, температуру впрыскиваемого топлива 25–98°C и скорость сносящего

воздушного потока, поступающего из впускного клапана – до 50 м/с. Наличие сносящего потока является важным аспектом, влияющим на смесеобразование в камере сгорания двигателя. Поступая в камеру сгорания при открытии впускного клапана, данный поток преобразуется в вертикальный вихревой поток, раздувающий топливную струю в направлении перпендикулярном её впрыску (см. рис.1). Это так называемый такт впуска. При этом поршень движется вниз.

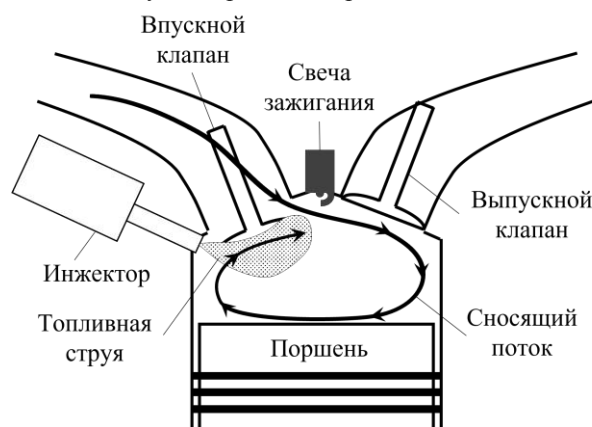


Рис. 1. Схема формирования сносящего потока в камере сгорания двигателя.

Сносящий воздушный поток позволяет добиться гомогенности топливно-воздушной смеси, при котором коэффициент избытка воздуха близок к единице. В большинстве случаев двигатель работает на гомогенной смеси, обеспечивающей наибольшую устойчивость его работы. Топливо-воздушная смесь нужной концентрации должна сформироваться за короткое время равно примерно 3 миллисекундам. Далее имеет место такт сжатия, когда впускной и выпускной клапаны закрыты, а поршень движется вверх, сжимая топливно-воздушную смесь. В конце такта происходит воспламенение. Во время третьего такта – рабочего хода – поршень движется вниз под действием давления горячих газов, пока не достигнет нижней мёртвой точки. Очистка цилиндра от отработавшей горючей смеси происходит во время четвёртого такта. Поршень движется вверх, при открытом выпускном клапане, вытесняя выхлопные газы.

## 2.2. Теоретическая экономия топлива

Технология прямого впрыска обладает рядом преимуществ по сравнению с распределённым впрыском, позволяющих добиться существенной теоретической экономии топлива, достигающей до 60% в режиме холостого хода, до 35% в режимах средней и низкой нагрузки и до 6% в режиме высокой нагрузки [1]. К основным преимуществам технологии относится следующее:

### 1. Снижение потерь при дросселировании.

Дроссельная заслонка установлена перед впускным клапаном и служит для регулирования количества воздуха или топливно-воздушной смеси, подаваемых камеру сгорания. В случае двигателя с прямым впрыском топливо поступает напрямую в камеру сгорания, а через дроссельную заслонку проходит только воздух. В двигателях с распределённым впрыском в цилиндр поступает готовая топливно-воздушная смесь. Таким образом потери на дросселирование в первом случае меньше, так как дроссельную заслонку проходит воздух с меньшей массой, чем топливно-воздушная смесь во втором случае.

### 2. Охлаждение топливного заряда.

Другое очень важное преимущество – это использование эффекта охлаждения топливного заряда в цилиндре двигателя. При прямом впрыске топлива тепло, затрачиваемое на его испарение, отбирается у воздуха поступающего в цилиндр двигателя из впускного клапана. В результате средняя температура в камере сгорания снижается, за счёт чего также снижается вероятность детонации, и степень сжатия может быть повышена. Повышение степени сжатия приводит к росту давления в конце сжатия и соответственно к увеличению термического коэффициента полезного действия.

### 3. Режим послойного смесеобразования

В режиме послойного смесеобразования двигатель работает на обеднённой смеси, а необходимая для возгорания концентрация создаётся только в области близкой к свече зажигания. К достоинствам работы двигателя в режиме послойного смесеобразования можно отнести снижение количества, потребляемого топлива, а также снижение тепловых потерь со стенок цилиндров.

## 2.3. Трудности применения

Применение технологии прямого впрыска топлива влечёт за собой ряд трудностей. Одной из которых является необходимость достижения мелкого распыла с размерами капель топлива 5–100 микрон. Такой распыл требует применения дорогостоящих инжекторов, позволяющих существенно увеличить давление впрыска.

Конструктивной трудностью является необходимость встроить головку инжектора в цилиндр камеры сгорания, для чего необходимо дополнительное пространство, которое возможно обеспечить лишь путём уменьшения диаметра впускного канала, а значит и диаметра дроссельной заслонки. Это, по сути, сводит

к нулю первое преимущество технологии прямого впрыска – снижение потерь при дросселировании.

Следующей трудностью является обеспечение стабильной работы двигателя на сверхобеднённой смеси в режиме послойного смесеобразования. Ни одному из производителей до сих пор не удалось создать и внедрить на рынок автомобиль с двигателем, стабильно работающим в режиме послойного смесеобразования. Именно сносящий поток, о котором говорилось ранее, не позволяет обеспечить «послойность» смеси в камере сгорания, когда нужна для возгорания концентрация создаётся только в области свечи зажигания, в то время как в остальной части камеры сгорания смесь остаётся обеднённой. Исследованию влияния сносящего потока на топливную струю посвящено большое количество исследований [2-7, 10]. Однако по-прежнему нет чёткой информации о влиянии сносящего потока на поля концентраций, температур и давлений в камере сгорания двигателя во всех режимах его работы. Решение данной задачи является трудной и вынуждает исследователей искать пути её обхода, наиболее актуальный из которых описан далее.

## 2.3. Влияние температуры

Еще одним важным фактором, влияющим на распространение топливной струи в камере сгорания помимо сносящего потока, является температура. В университете Фридриха-Александра в Германии была проведена серия экспериментов по исследованию закономерностей влияния температуры на распространение жидких струй углеводородов в том числе в сносящем воздушном потоке. В качестве исследуемых углеводородов использовались изооктан и этанол температурой 25-98°C, давление впрыска составляло 100 и 170 бар, скорость сносящего потока 0–41,2 м/с. Основные характеристики экспериментальной установки, порядок проведения экспериментов и их результаты подробно изложены в работах [7-8]. На основе повторяемости результатов многочисленных экспериментов показано, что увеличение температуры с 25°C до 98°C приводит к росту дальности струй изооктана и этанола в среднем на 18,3% и 16,0% соответственно (см. рис. 2 и рис. 3).

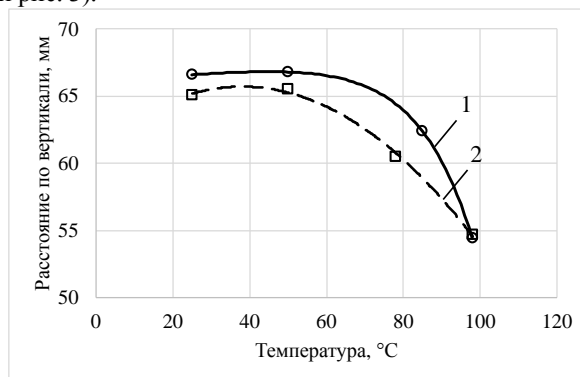


Рис. 2. Зависимость дальности струй от температуры при давлении 100 бар в момент времени  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с после начала впрыска 1 – изооктан, 2 – этанол

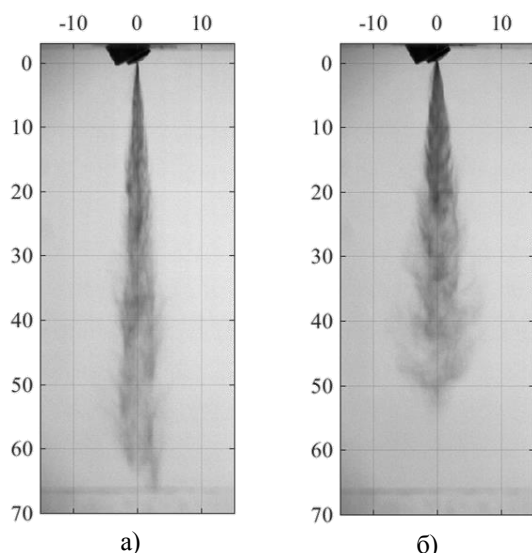


Рис. 3. Сделанные в ходе эксперимента фотографии струй изооктана без сносящего потока при давлении впрыска 100 бар в момент времени  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с после начала впрыска при температуре а)  $25^\circ\text{C}$  б)  $98^\circ\text{C}$ .

Увеличение температуры также ведёт к росту угла раствора струй в среднем на 32,6% и 35,5% (см. рис. 4).

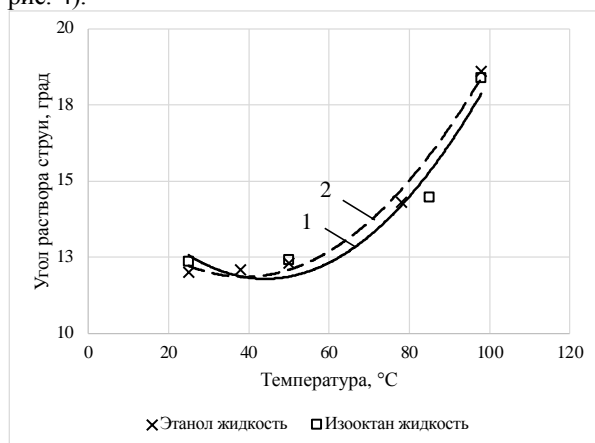


Рис. 4. Зависимость угла раствора струй от температуры при давлении 100 бар в момент времени  $0,8 \cdot 10^{-3}$  с после начала впрыска, 1 – изооктан; 2 – этанол.

Путём проведения численного моделирования показано, что решатель sprayfoam программной среды OpenFOAM позволяет качественно описывать закономерности распространения струй жидких углеводородов в покоящейся среде и в сносящем потоке [9-10] (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты моделирования распространения струй углеводородов при разной температуре в отсутствие сносящего потока.

Углеводород	Температура углеводорода, $^\circ\text{C}$	Дальнобойность струй, $\cdot 10^{-3}$ м
Этанол	25	68,7
Этанол	50	67,4
Этанол	78	65,5
Этанол	98	64,0
Изооктан	25	66,3
Изооктан	50	65,6
Изооктан	85	61,8
Изооктан	98	60,0

Однако для достижения адекватных результатов требуется знать ряд параметров, таких как угол раствора струй и распределение частиц по диаметрам на выходе из сопла инжектора. Данные параметры задаются как исходные перед запуском решателя. В связи с этим полученные экспериментальные данные имеют важное значение и могут быть использованы для верификации математических моделей для расчёта прямого впрыска.

### 3. Альтернативные решения

Для обеспечения возможности работы двигателя на обеднённых смесях исследователи и инженеры предлагают использование камеры предварительного сгорания [11-15]. Она устанавливается на место свечи зажигания, её объём составляет 2–3% от объёма камеры сгорания. В камере предварительного сгорания происходит воспламенение небольшого количества топливного заряда, затем горячие реактивные струи через отверстия в нижней части камеры предварительного сгорания поступают в основную камеру сгорания, обеспечивая воспламенение обеднённой смеси.

Камеры предварительного сгорания делятся на пассивные и активные. При использовании пассивной камеры впрыск топлива по-прежнему происходит в основной камере сгорания, а смесь для воспламенения поступает в камеру предварительного сгорания через отверстия в её нижней части во время такта сжатия. Такие камеры просты в установке, так как возможна их установка напрямую вместо свечи зажигания. Однако существует ряд проблем с обеспечением стабильного горения во всей области основной камеры сгорания, что часто требует установки дополнительной свечи зажигания в основной камере сгорания [13]. Это значительно усложняет и удорожает конструкцию двигателя. Также существует проблема с обеспечением удаления продуктов сгорания из камеры предварительного сгорания – её продувкой.

Камера предварительного сгорания называется активной, если она оснащена дополнительной подачей топлива. Такие камеры более эффективны и могут обеспечить снижение продолжительности горения на 60% [14] и стабильную работу двигателя на обеднённой смеси с коэффициентом избытка воздуха до 2 [15]. Существенным недостатком является необходимость установки дополнительного топливного бака. Однако уже существуют патент на использование паров топлива из основного топливного бака в качестве топлива, подаваемого в камеру предварительного сгорания [15].

Камеры предварительного сгорания на данный момент являются следующим большим шагом в эволюции бензиновых двигателей с прямым впрыском для обеспечения его стабильной работы на обеднённой смеси.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология прямого впрыска является многообещающей, однако по-прежнему ставит перед исследователями ряд трудных задач по обеспечению стабильности работы двигателя и реального достижения возможной теоретической экономии топлива при её применении.

Одним из решений по-прежнему является направление усилий исследователей на анализ и получение данных и закономерностей о полях концентраций, давлений и температур в камере сгорания двигателя при наличии сносящего потока, в том числе для обеспечения его стабильной работы на обеднённой смеси. Получение этих данных, возможно, позволило бы избежать применения сложных и дорогостоящих технических решений, в том числе применения камер предварительного сгорания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Van Basshuysen R., Spicher U.** Gasoline engine with direct injection: processes, systems, development, potential. – Berlin : Vieweg+ Teubner, 2009.
2. **Welss R., Bornschlegel S., Wensing M.** Characterizing Spray Propagation of GDI Injectors under Crossflow Conditions SAE Technical Paper 2018-01-1696
3. **Guo M., Shimasaki N., Nishida K., Ogata Y., Wada Y.** Experimental study on fuel spray characteristics under atmospheric and pressurized cross-flow conditions. Fuel 2016 Vol. 184, pp. 846-855
4. **Долгушина О.В., Платонов Н.И., Белоусов В.С., Долгушин Д.М.** Динамика капель диспергированной струи в поперечном потоке газа. Вестник Челябинского государственного университета. 2012. № 30 (284), с. 26–31
5. **Зуева Т. С., Вайсс Л., Венсинг М., Гаряев А.Б.** Экспериментальное исследование влияния сносящего воздушного потока на распространение струй углеводородов различной температуры//Материалы III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики»: сборник трудов конференции. – Москва, 19–23 октября 2020. – с.112-113
6. **Zueva T.S., Garyaev A.B., Weiss L.** Model of fuel spray propagation in direct injecting internal combustion engines under cross-flow conditions. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1565. pp. 1-7
7. **Zueva T.S., Weiss L., Wensing M., Garyaev A.B.** Experimental investigation of spray propagation under crossflow conditions with Shadowgraph and Schlieren techniques. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. pp. 1-7.
8. **Вайсс Т.С., Гаряев А.Б., Вайсс Л.** Экспериментальное исследование влияния температуры на распространение жидких струй углеводородов. Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 9, с. 388-400.
9. **Вайсс Т.С., Гаряев А.Б.** Численное моделирование влияния температуры на распространение струй жидких углеводородов//XXVIII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл. – М., 2022. – с. 518.
10. **Вайсс Т.С., Гаряев А.Б., Вайсс Л.** Применение пакета OpenFOAM для расчёта парожидкостной струи в сносящем потоке//XXVII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл. – М., 2021. – с. 663.
11. **Yu, X., Zhang, A., Baur, A., Engineer, N.** The Impact of Pre-Chamber Design on Part Load Efficiency and Emissions of a Miller Cycle Light Duty Gasoline Engine. SAE Technical Paper, 2021.
12. **Gussak, L., Turkish, M., Siegla, D.** High Chemical Activity of Incomplete Combustion Products and a Method of Prechamber Torch Ignition for Avalanche Activation of Combustion in Internal Combustion Engines. SAE Technical Paper, 1975
13. European Patent Office: Gasoline internal combustion engine with a combustion pre-chamber and two spark plugs, MASERATI S.p.A. 41121 Modena (IT), EP 3 453 856 B1, 08.09.2017
14. **Stadler H., Sauerland H., Härtl M., Wachtmeister G.** The Potential of Gasoline Fueled Pre Chamber Ignition Combined with Elevated Compression Ratio, in SAE Technical Paper, 2020.
15. **Russwurm, T., Schumacher, M., and Wensing, M.** “Active Fuelling of a Passenger Car Sized Pre-Chamber Ignition System with Gaseous Components of Gasoline,” SAE Technical Paper Series, SAE Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting, SEP. 22, 2020, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2020.

*И.В. Яковлев, Н.В. Авдокунин*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

### АННОТАЦИЯ

IT-сектор экономики – один из наиболее динамично развивающихся потребителей электрической энергии. Центры обработки данных (ЦОД) представляют неотъемлемую часть IT-сектора, на долю которых приходится значительная часть энергопотребления. До 50% потребляемой ЦОД электрической энергии преобразуется в теплоту, сбрасываемую в окружающую среду. Статья посвящена обзору методов охлаждения оборудования ЦОД, утилизации сбросной теплоты и направлений применения утилизируемой теплоты. Обоснована актуальность применения теплоты ЦОД. Представлена оценка потенциала энергосбережения при реализации утилизации теплоты ЦОД в Российской Федерации. Обсуждаются критерии энергоэффективности ЦОД и утилизационных установок, в том числе и предлагаемые авторами. Определены перспективные направления исследований в части реализации методов утилизации теплоты ЦОД.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире присутствует тенденция к увеличению потребления электроэнергии, в немалой степени это связано с широким использованием цифровых технологий во всех отраслях экономики.

В период с 2010–2022 года резко увеличилось техническая оснащённость населения. Так, в сфере недвижимости большинство жилых и коммерческих зданий внедряются smart системы, в промышленности и на транспорте проводится масштабная автоматизации систем. Наблюдается резкий рост количества и разнообразия гаджетов. В сфере коммуникаций увеличилось потребление энергии соцсетям и современными интернет-технологиями (5G; VR; AR и др.). Пандемия COVID-19 также способствовала ускорения тенденции роста потребления электроэнергии в связи с переходом на дистанционный формат. Все это стимулирует рост потребления электроэнергии IT – индустрией, под которой понимают сферу разработки и применения информационных технологий, таких как, компьютеры, места хранения, дата-центры, постоянные сети, мобильные сети, IT устройства, сетевое оборудование, производственные устройства и т.д. [1]. Неотъемлемой частью IT – индустрией представляются центры обработки данных (ЦОД).

В информационном периоде одной из главных задач является не только поддержание бесперебойной работы, но и ее обработка и хранение. Поэтому

наряду с развитием компьютерных технологий, необходимо развивать средства обработки поступающей информацией. К таким средствам относят центры обработки данных (ЦОД).

На данный момент суммарное мировое потребление электроэнергии составило за 2019 год - 22500 ТВт·ч. При отдельном рассмотрении IT – сектора можно заметить, что годовое потребление за 2020 г составило 1935 ТВт·ч, что сопоставимо с общим потреблением электроэнергии такими лидерами, как Россия или Япония, и составляет примерно половину от потребления энергии США [2]. На долю IT – сектора приходится около 9% мирового потребления электроэнергии, а в перспективе к 2030 году 11,5% [2], что является существенным фактором для применения различных мер по снижению затрат электроэнергии. В 2020 году доля в потреблении электроэнергии ЦОД составляла 209 ТВт·ч или 10,8 % от общего потребления IT – индустрией.

Динамика потребления электроэнергии IT – индустрией (рис. 1), включая ЦОД, показывает непрерывный рост, а прогноз на ближайшие 10 лет – ускоренное потребление энергоресурсов, что требует повышенного внимания к вопросам энергоэффективности и энергосбережения в этой сфере.

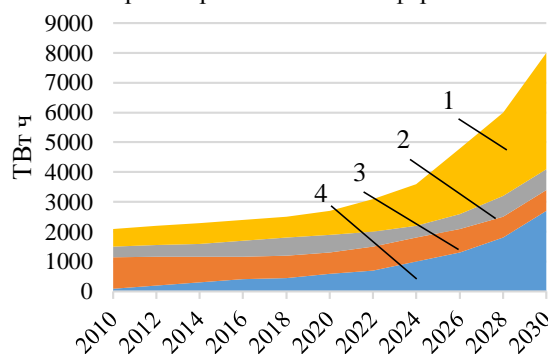


Рис.1. Динамика потребления электроэнергии IT – индустрией [3]. 1 – сети (беспроводные и проводные); 2 – производство; 3 – потребительские устройства ИКТ; 4 – ЦОД.

Из приведенной на рис. 1 диаграммы следует, что наиболее существенный рост потребления энергии ожидается центрами обработки данных (примерно в 5 раз к 2030 году по сравнению с потреблением в 2020 году, по данным [2] – в 6 раз).



Прирост мощности ЦОД и потребления энергии в России следует мировым тенденциям и этот сектор ИТ – индустрии требует внимания с позиций энергоэффективности и энергосбережения.

Центры обработки данных, являясь одним из существенным потребителем энергии, заслуживают внимания и как объекты, на которых имеют место существенные потери энергии в виде теплоты, отводимой от ИТ оборудования и сбрасываемой в окружающую среду. С использованием сбросной теплоты ЦОД возникает вопрос – сколь велики эти потери и как их использовать, рассматривая как вторичный энергетический ресурс?

## 2. ИНФРАСТРУКТУРА ЦОД И ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Центры обработки данных - структура или группа структур, предназначенных для централизованного размещения, организации взаимодействия и эксплуатации ИТ-систем, сетевого и телекоммуникационного оборудования, обеспечивающих возможность оказания услуг в области хранения, обработки и передачи данных, а также все объекты и инфраструктура, используемые для распределения электроэнергии и контроля среды в сочетании со средствами обеспечения требуемой устойчивости и безопасности для достижения желаемого уровня доступности оказываемых услуг [4]. ЦОД может быть крупным, занимая одно или несколько зданий, а может быть совсем небольшим, размещаясь в отдельном помещении. Мощность крупных ЦОД от 0,2 до 50 МВт, малые ЦОД имеют мощность от 0,005 до 0,02 МВт [4].

Суммарная мощность крупных коммерческих ЦОД составляет по состоянию на 2020 год 533,75 МВт [5]. С учетом средних и малых ЦОД общая мощность коммерческих ЦОД в России оценивается примерно в 600 МВт [6]. Сюда следует добавить мощность корпоративных ЦОД, по которым данные отсутствуют.

ЦОД представляют крупных потребителей электрической энергии. По каким направлениям расходуется энергия внутри ЦОД? Следует выделить следующие группы потребителей: серверное оборудование и компьютеры; оборудование для охлаждения серверов и компьютеров; вспомогательное оборудование (источники бесперебойного питания, освещение, сигнализация и т.д.); системы микроклимата офисного помещения.

При рассмотрении распределение электроэнергии в дата-центрах (рис .2), было выявлено, что максимальная потребность приходится на систему охлаждения серверного оборудования (около 50 %) [7], по другим данным [4] примерно 70 % от общего потребления.

Полагая, что практически вся потребляемая ИТ и вспомогательным оборудованием электрическая энергия превращается в теплоту, которая отводится системой охлаждения в окружающую среду, можно утверждать, что в окружающую среду выбрасывается до 50 % энергии, потребляемой ЦОД.

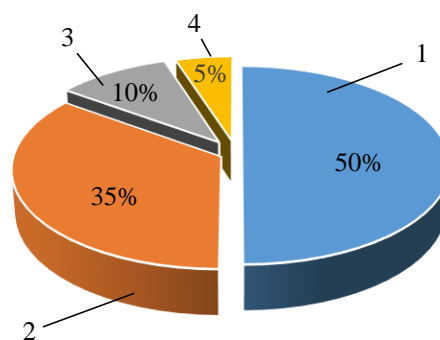


Рис. 2. Распределение потребления электроэнергии дата – центров. 1 – Система вентиляции и кондиционирования (50%); 2 – Серверное оборудование и компьютеры (35%); 3 – источники бесперебойного питания (10%); 4 – осветительные приборы, датчики сигнализации (5%).

Источниками теплоступления является основное и вспомогательное оборудование ЦОД, по данным [8] плотность потока теплоты в расчете на 1 м<sup>2</sup> площади помещений ЦОД составляет 3 кВт/м<sup>2</sup>. Вся поступающая теплота отводится в окружающую среду, при этом затрачивается от 50 до 70 % потребляемой энергии.

Оценивая потери в виде сбросной теплоты в 30...50% от потребляемой мощности и учитывая выше сделанную оценку установленной мощности ЦОД в 600 МВт, можно предположить, что в окружающую среду за год выбрасывается в среднем  $2,1 \cdot 10^6$  МВт ч/год. Полученное значение потерь тепловой энергии составляет примерно 1% от потребления тепловой энергии в России, которое составляет порядка 2092 ТВт ч/год.

Если темп прироста мощности ЦОД сохранится на уровне 2020 года (13,5-14 %), то к 2030 году следует ожидать потерь в размере  $6,3 \cdot 10^6$  МВт ч/год.

## 3. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ЦОД

Существует ряд общепринятых показателей в той или иной мере характеризующие энергоэффективность центров обработки данных [9].

1) Power Utilization Efficiency (PUE) – эффективность энергопотребления показывает на сколько эффективно используется электроэнергия.

$$PUE = \frac{P_{\text{сум}}}{P_{\text{ИТ}}} = \frac{P_{\text{ИТ}} + P_{\text{всп}}}{P_{\text{ИТ}}}, \quad (1)$$

где,  $P_{\text{сум}}$  – суммарная мощность всего оборудования ЦОД;  $P_{\text{ИТ}}$  – суммарная мощность оборудования ИТ;  $P_{\text{всп}}$  – суммарная мощность вспомогательного оборудования ЦОД.

В идеальных условиях коэффициент PUE должен стремиться к единице, указывая на то, что вся потребляемая объектом энергия расходуется только ИТ-оборудованием. Существенного снижения PUE можно добиться только при тщательном планировании.



Повышая эффективность использования энергии в ЦОДе, сокращаются расходы на электроэнергию и уменьшается совокупная стоимость владения.

Энергоснабжение и охлаждение – это две наиболее значимые статьи расходов в ЦОДе, причем в составе как капитальных затрат, так и эксплуатационных. В настоящее время рассматриваются возможности снижения PUE за счет использования в системах охлаждения ЦОДов тех или иных новых технических решений, а также модернизации классических схем (рассматриваются ниже).

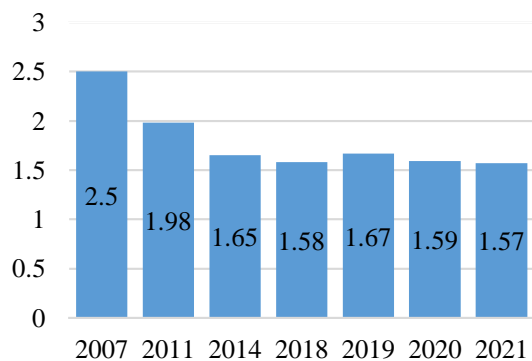


Рис. 3. Изменение среднего PUE дата-центров по годам [10].

Наблюдается динамика по уменьшению коэффициента PUE (рис. 3), данный показатель говорит, что в последние года дата-центры становятся более эффективнее. С 2018 года данный коэффициент стал выходить на плато, то есть современные дата-центры приблизились к максимальному потенциалу в области улучшения своего оборудования. Для дальнейшего увеличения своей энергоэффективности необходимо найти иные пути.

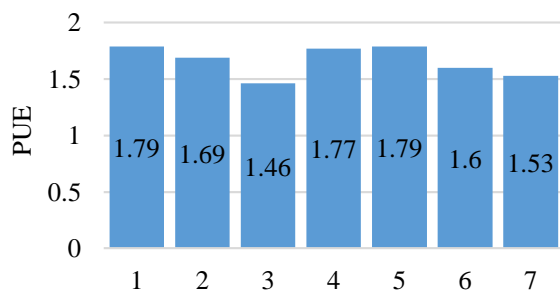


Рис. 4. Значение PUE дата-центров в зависимости от регионов. 1 – Африка; 2 – Азиатско – тихоокеанский регион; 3 – Европа; 4 – Латинская Америка; 5 – Ближний Восток; 6 – Россия и СНГ; 7 – США и Канада [11].

PUE зависит не только от оборудования установленного на ЦОД, но и от климата (рис. 4). Из диаграммы следует, что в целом в Европе находятся самые энергоэффективные центры обработки данных, а на Ближнем Востоке и в Африке — показатель PUE хуже всего. В регионах, где температура воздуха выше, чем в зонах с умеренными климатическими условиями, может быть меньше возможностей воспользоваться преимуществами технологий естественного охлаждения (фрикулинга), которые позволяют существенно снизить потребление энергии. Это особенно актуально в районах с высокой влажностью или нехваткой воды.

В двух регионах — в Европе и США/Канаде — средний PUE существенно ниже. Это может быть связано с тем, что цены на энергоносители в Европе, как правило, выше, что служит дополнительным стимулом большего внимания к проблеме энергоэффективности ЦОД.

2) Data Center Infrastructure Efficiency (DCiE) – эффективность инфраструктуры ЦОД показывает долю мощности, потребляемой ИТ оборудованием, в общем потреблении ЦОД:

$$DCiE = \frac{P_{IT}}{P_{сум}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

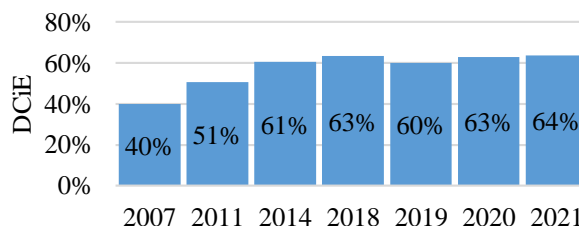


Рис. 5. Изменение среднего значения DCiE дата-центров по годам [10].

Величина этого показателя обратная величине показателя PUE, поэтому динамика его изменения (рис.5) с точностью наоборот повторяет динамику изменения показателя PUE. Если полагать, что  $P_{IT}$  – полезная составляющая всей потребляемой ЦОД энергии, то данный показатель может служить мерой эффективности использования электроэнергии.

3) Energy reuse factor (ERF) – показывает долю повторно используемой энергии центра обработки данных [12]. Значение коэффициента варьируется в пределах от 0 до 1, где ноль (0) означает, что генерируемое серверным оборудованием внутри дата-центра тепло никак не используется повторно, а единица (1) означает, что повторно используется 100% произведенного серверами тепла.

$$ERF = \frac{P_y}{P_{сумм}}, \quad (3)$$

где,  $P_y$  – повторное использование энергии за пределами дата-центров.

Для оценки дата – центра необходимо ориентироваться не только на определенный коэффициент, но и на их совокупность, так наиболее лучшим вариантом будет когда совместно коэффициенты PUE и ERF стремятся к 1 [12].

4) Energy reuse effectiveness (ERE) [12]– показывает эффективность повторного использования энергии.

$$ERE = \frac{P_{сум} - P_y}{P_{IT}} = PUE \cdot (1 - ERF). \quad (4)$$

Хотя PUE, безусловно, является наиболее известным показателем инфраструктуры центра обработки данных, его критикуют как несовершенный показатель в случаях, когда возникает необходимость описать общую энергоэффективность ЦОД [13]. Появление новых показателей, таких как эффективность повторного использования энергии (ERE) или коэффициент повторного использования энергии (ERF) в

определенной мере отражает долю повторного использования отработанного тепла, образующегося в центрах обработки данных [13].

Общепринятые критерии энергоэффективности не учитывают потерь в виде теплоты, отводимой от ИТ – оборудования, и потерь в виде теплоты от вспомогательного оборудования. Такой подход не подразумевает использование сбросной теплоты с целью повышения энергетической эффективности ЦОД. Вышеприведенные критерии не учитывают тот факт, что потребляется электрическая энергия, а потери имеют место в виде в виде сбросной теплоты. Кроме того, эти критерии не отражают эффективность использования сбросной теплоты, а представляют только долю вторично используемой (в виде тепла) электрической энергии.

В работе авторов [14] предложен критерий оценки эффективности использования теплоты ЦОД, представляющий собой удельный (в расчете на единицу количества выделяемой за рассматриваемый период ЦОД теплоты) показатель в виде экономии энергоресурсов на источнике тепловой энергии в условном топливе. Конкретный вид критерия зависит от состава оборудования утилизационной установки. Для установки в составе теплообменника «воздух-антифриз», промежуточного циркуляционного контура и теплового насоса формула удельной экономии, кг у.т./кВт ч, будет

$$b'_{эк} = \varepsilon \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_n} \frac{1}{\mu(t''_a) - 1} [\mu(t''_a) b_Q - b_Э]. \quad (5)$$

Здесь  $\varepsilon$  – тепловая эффективность теплообменника;  $t'_a$  – температура антифриза на входе в теплообменник;  $t''_a$  – то же на выходе;  $t_n$  – температура приточного охлаждающего воздуха;  $t_y$  – температура удаляемого нагретого воздуха;  $\mu$  – коэффициент трансформации теплоты теплового насоса;  $b_Q$  и  $b_Э$  – удельные расходы условного топлива на выработку тепловой и электрической энергии соответственно. Использование теплового насоса, повышающего потенциал сбросной теплоты, позволяет применять утилизируемую теплоту для внутренних целей и внешнего применения, например для обогрева помещений ЦОД или зданий на прилегающей территории.

Если теплоту вентиляционных выбросов использовать для внутреннего потребления, например для подогрева приточного воздуха, то удельная экономия может быть представлена в виде

$$b'_{эк} = \varepsilon \frac{t_y - t_n^{cp}}{t_y - t_n} b_Q, \quad (6)$$

где  $t_n^{cp}$  – средневзвешенная температура наружного воздуха, в пределах периода использования системы. Применение формулы (6) к расчету удельной экономии для случая воздушного охлаждения ЦОД наружным воздухом (фрикулинг) в различных климатических условиях приводится на рис.6. Извлекаемая из воздуха теплота используется для подогрева наружного воздуха, если температура последнего опускается ниже 14 °С. Здесь явно прослеживается связь экономии с климатическими условиями района размещения ЦОД.

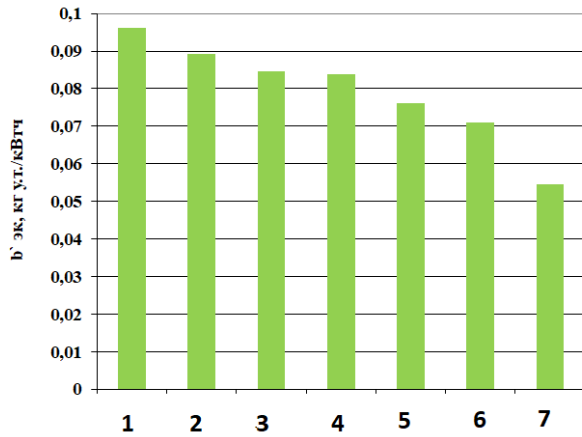


Рис. 6. Удельная экономия условного топлива на источнике при применении утилизируемой теплоты ЦОД в различных климатических условиях. 1 – Кемерово; 2 – Уфа; 3 – Владивосток; 4 – Москва; 5 – Санкт-Петербург; 6 – Кисловодск; 7 – Симферополь

Приводимый показатель не дает ответ на вопрос об эффективности ЦОД в целом, но позволяет оценить эффективность применения утилизационной установки и снижение «углеродного следа» ввиду снижения расхода топлива на источнике. Кроме того, показатель вида (5) позволят оптимизировать параметры утилизационной установки, например температуру антифриза или коэффициент трансформации теплоты теплового насоса, с получения наибольшего энергосберегающего эффекта.

В ряде источников, например в [15], приводятся ключевые тенденции в развитии ЦОД, которые помимо организационных и технических мер по совершенствованию структуры и технологий обработки и хранения данных предусматривают повышение энергоэффективности ЦОД. Рост энергоэффективности ЦОД будет происходить путем утилизации и перенаправления сторонним потребителям утилизируемой теплоты, а также путем использования возобновляемых источников энергии.

Возможности применения утилизируемой теплоты ЦОД во многом зависят от способа охлаждения оборудования и потребностью в теплоте для внутреннего потребления.

Внутреннее потребление ограничено применением теплоты при охлаждении оборудования наружным воздухом и необходимостью его подогрева при низких температурах (фрикулинг), а также применением на собственные нужды для обогрева и вентиляции офисных помещений ЦОД.

Так как центры обработки данных нуждаются в охлаждении оборудования, возможно использование теплоты для производства холода в абсорбционных холодильных машинах [16] с дальнейшим использованием его внутри ЦОД.

Как уже упоминалось, перспективным представляется, по крайней мере для ЦОД большой и средней мощности, внешнее использование теплоты с повышением ее потенциала с применением тепловых насосов. Получаемая теплота может использоваться в системах отопления и горячего водоснабжения объектов на прилегающей к ЦОД территории.

Мировой опыт применения утилизируемой теплоты ЦОД с повышением ее потенциала, показывает, что внешнее использование теплоты ЦОД может быть конкурентно способно по сравнению альтернативными источниками теплоты и может обеспечивать теплом целые городские районы [16, 17]. Например, дата-центр Bahnhof Pionen, расположенный в Стокгольме (Швеция) и потребляющий электрическую мощность 1,5 МВт, способен выдавать в тепловую сеть порядка 0,6 МВт (0,52 Гкал/ч) при температуре теплоносителя в подающем трубопроводе 68 °С. Потенциал источника повышается тепловым насосом.

Внешнее применение утилизируемой теплоты ЦОД не ограничивается теплоснабжением. В качестве возможных направлений использования утилизируемой теплоты рассматриваются сушка биомассы, подогрев воды на источниках энергии, опреснение воды и производство электроэнергии (органический цикл Ренкина, пьезоэлектрический или термоэлектрический генератор) [16].

С экономической точки зрения повторное использование вторичной теплоты центра обработки данных целесообразно только в том случае, если оно имеет конкурентоспособную цену по сравнению с тепловыми станциями и вторичными энергетическими ресурсами других промышленных предприятий.

Помимо экономической существует и техническая сторона проблемы применения сбросной теплоты ЦОД. Встает вопрос, какие из освоенных способов охлаждения оборудования ЦОД позволяют извлекать из охлаждающей среды и использовать теплоту? Наибольший интерес представляют способы организации охлаждения оборудования, которые позволяют использовать сбросную теплоту наиболее эффективно и с наименьшими затратами энергоресурсов и финансов.

#### 4. ОБЗОР СПОСОБОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЦОД

При работе центров обработки данных выделяется огромное количество теплоты, в связи с этим необходимо рассмотреть способы охлаждения оборудования, т.к. от этого зависит энергетическая эффективность всей системы в целом.

##### 4.1 Парокомпрессионный цикл охлаждения дата-центров.

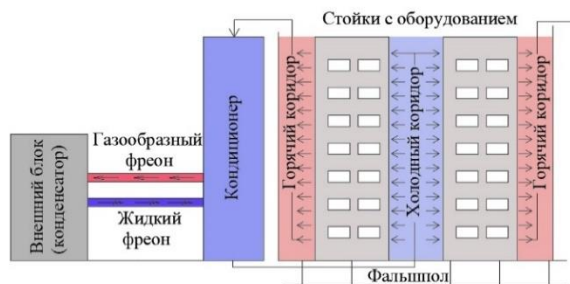


Рис. 7. Охлаждение ЦОД с применением кондиционеров [18]

а) Промышленный кондиционер (рис. 7). Данный вид охлаждения является наиболее распространённым из-за своей простоты конструкции и готового оборудования, также этот метод хорошо изучен. Нагретый воздух при использовании такой системы будет выводиться в отдельный коридор и затем поступать в кондиционер. Холодный коридор позволяет охлаждать систему с помощью зальных и внутрирядных кондиционеров. Он обеспечит поддержание стабильного уровня влажности, в результате будет охлаждаться именно оборудование (стойки, шкафы). Основные преимущества размещения холодного коридора: оптимальный потенциал энергосбережения, стабильность температурных показателей оборудования, система общеобменной вентиляции выполняется на основе вентиляторов с автоматическими жалюзи [18].

##### б) Чиллерная система охлаждения (рис. 8).

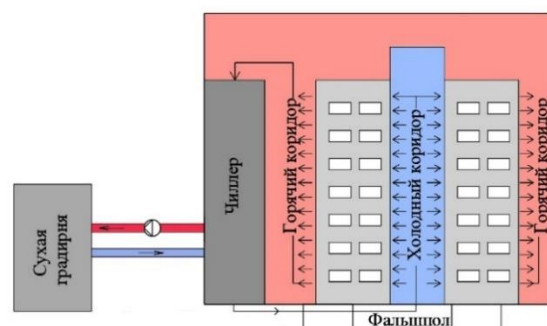


Рис. 8. Чиллерная система охлаждения ЦОД [18]

Подобная система охлаждения включает в себя воздухоохлаждающую парокомпрессионную холодильную машину или чиллер, работающую на фреоновом цикле.

Схема с холодными и горячими коридорами дает до 5% экономии электроэнергии, поэтому так важно провести изоляцию холодного и горячего воздушного коридора.

Энергоэффективность чиллерной схемы выше в сравнении с кондиционерами, и это объясняется тем, что внешний компрессорно-конденсаторный блок чиллера включается в работу лишь при температурах окружающей среды выше +12°C, причем вентиляторы внешнего блока включаются постепенно, по мере роста температуры гликолевого теплоносителя.

##### 4.2 Прямой косвенный фрикулинг.

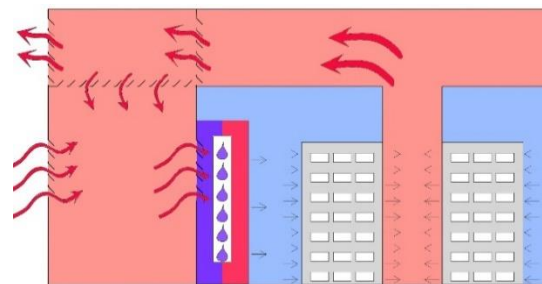


Рис. 9. Фрикулинг с доохлаждением адиабатической системой в ЦОД [2]

а) Прямой фрикулинг. Фрикулинг – это технология охлаждения объекта за счёт окружающей среды

без применения компрессоров и другого энергоёмкого оборудования. Данная система является обычной приточно-вытяжной системой вентиляции, в которой воздух забирается из окружающей среды, проходит через стойки с оборудованием и отводится в окружающую среду.

В зимнее время по мере необходимости холодный воздух предварительно подогревается теплым воздухом от серверов в камере смешения для поддержания постоянной температуры обдува оборудования.

б) Фрикулинг с доохлаждением с помощью адиабатической системой (рис. 9). Данный метод применяется, когда наружный воздух слишком теплый, тогда включается система адиабатического охлаждения.

Технология адиабатического охлаждения построена на распылении воды в виде мельчайших капель на пути воздушного потока, что позволяет охлаждать воздух за счет испарения воды. При этом уровень влажности остается в пределах допустимых значений для IT-оборудования.

### 4.3 Жидкостное охлаждение.

а) Трубки с циркулирующей охлаждающей жидкостью (рис. 10).

Жидкостной метод охлаждения является развивающейся системой, используется в основном на суперкомпьютерах, с большой мощностью.

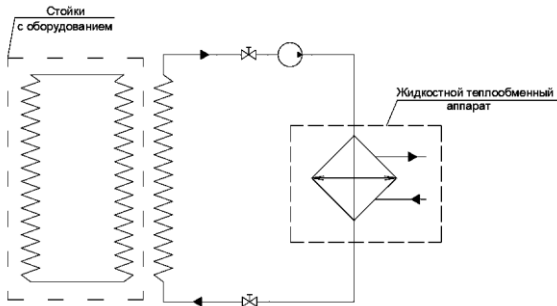


Рис. 10. Схема с водяного охлаждения с помощью микротрубок [19].

Трубки с циркулирующей охлаждающей жидкостью проходят непосредственно через стойки с оборудованием и располагаются вблизи у радиаторов процессоров, которые нагреваются до 85°C. Поэтому для оптимальной работы, необходимо использовать для охлаждения горячую воду около 60°C, которая проходит через медные микротрубки, охлаждает процессор и нагревается до 65°C.

Нагретая вода проходит через теплообменник или градирню, охлаждается и возвращается в цикл. Данную теплоту можно также использовать в качестве отопления близлежащих зданий или направить на собственные нужды ЦОД [19].

б) Система погружного охлаждения.

В системах с погружным охлаждением стойки с оборудованием находятся в специальном хладагенте Сторус-ОХЛ14 [20], изготовленном на базе синтетического масла на основе силикона, который является

диэлектриком и химически нейтрален. Благодаря таким свойствам жидкость не оказывает никакого влияния на работу электроники. Охлажденный хладагент при температуре 45°C подается в нижнюю часть ванны, а нагретый около 54°C удаляется из верхней части. Далее с помощью насоса, хладагент направляют в теплообменное оборудование, где он охлаждается. Данную теплоту можно также использовать. Погружной метод охлаждения мало распространён, вызывает недоверие и боязнь за дорогое оборудование.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

IT – индустрия занимает существенное место в мировом энергопотреблении, значительная часть которого приходится на центры обработки данных. Потребление энергоресурсов ЦОД растет динамичнее, чем других составляющих IT – индустрии. Соответственно будут расти и потери теплоты, выделяемой оборудованием ЦОД и сбрасываемой в окружающую среду. Потенциал энергосбережения путем полезного использования сбросной теплоты ЦОД в России на настоящее время оценивается в  $2,1 \cdot 10^6$  МВт ч/год и в перспективе к 2030 году – в  $6,3 \cdot 10^6$  МВт ч/год.

Ключевые тенденции совершенствования ЦОД включают использование утилизируемой теплоты ЦОД. При этом внешнее использование теплоты с повышением ее потенциала рассматривается как основное и перспективное. Внутреннее использование теплоты ограничено ввиду специфики энергопотребления ЦОД. Для ЦОД небольшой мощности можно рассматривать внутреннее использование теплоты на нужды теплоснабжения офисных помещений при обесновании конкурентоспособности по сравнению с теплоснабжением от централизованных источников. Другое направление применения теплоты – подогрев приточного воздуха в системе охлаждения оборудования наружным воздухом (фрикулинг). Следует рассмотреть возможность производства электрической энергии на собственные нужды с применением низкотемпературных циклов.

Предложенные критерии энергоэффективности ЦОД и системы утилизации теплоты односторонне отвечают поставленной цели. Необходимо разработать комплексный критерий, учитывающий эффективность всех структурных элементов ЦОД.

Установки утилизации теплоты ЦОД могут быть встроены в системы охлаждения оборудования, использующие наружный воздух (фрикулинг) или жидкостное охлаждение. С позиции интеграции систем охлаждения и утилизации интерес представляет метод охлаждения по парокомпрессионному циклу с водяным охлаждением компрессорно-конденсаторного блока.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЦОД – центр обработки данных;  
 IT – информационные технологии;  
 $P_{\text{сум}}$  – суммарная мощность всего оборудования ЦОД, Вт;  
 $P_{\text{IT}}$  – суммарная мощность оборудования IT, Вт;

$P_{всп}$  – суммарная мощность вспомогательного оборудования ЦОД, Вт;  
 $P_y$  – повторное использование энергии за пределами ЦОД, Вт.  
 $\varepsilon$  – тепловая эффективность теплообменника;  
 $t_a^i$  – температура антифриза на входе в теплообменник, °С;  
 $t_a^n$  – то же на выходе, °С;  
 $t_n$  – температура приточного охлаждающего воздуха, °С;  
 $t_y$  – температура удаляемого нагретого воздуха, °С;  
 $\mu$  – коэффициент трансформации;  
 $b_{Э}$  – удельные расходы условного топлива на выработку электрической энергии, т у.т./ (тыс. кВт ч);  
 $b_Q$  – то же на выработку тепловой энергии, т у.т./Гкал;  
 $t_n^{ср}$  – средневзвешенная температура наружного воздуха, °С.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Статистика** по глобальному энергетическому переходу [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>. – Дата доступа: 29.03.2022.
2. **Petit, V.** Digital economy and climate impact / V. Petit, S. Carlini, V. Avelar. – Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2021. – 28 с.
3. **(Больше)** устойчивый центр обработки данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cargemini.com/2020/01/the-more-sustainable-data-center/>. – Дата доступа: 12.03.2022.
4. **Методические** рекомендации по проектированию центров обработки данных. Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве. Москва. 2019.
5. **Крупнейшие** поставщики услуг ЦОД в России 2020 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cnews.ru/reviews/rynok\\_tsod\\_2021/review\\_table/5f7814d77ea4727236ba2eac672513dda25c4130](https://www.cnews.ru/reviews/rynok_tsod_2021/review_table/5f7814d77ea4727236ba2eac672513dda25c4130). – Дата доступа: 29.03.2022.
6. **Асонов Д. А.** Утилизация тепла ЦОД / Д. А. Асонов, Т. Н. Романова. – Текст: электронный // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 09–13 декабря 2019 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2019. — С. 34–37.
7. **Энергопотребление** дата-центров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.grandmothers.ru/dc\\_power\\_consumption.php](https://www.grandmothers.ru/dc_power_consumption.php). – Дата доступа: 29.03.2022.
8. **Хомутский Ю.** Почему центры обработки данных охлаждаются отдельно? Общие требования и особенности СКВ ЦОД // Мир климата. 2017. № 104. С. 92–97.
9. **Belady C.** (editor), Rawson A., Pflueger J., Cader T. (contributors). Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCiE (The Green Grid White Paper, 2008).
10. Uptime Institute Global Data Center Survey 2021 / D. Bizo [и др.]. Uptime Institute, 2021. – 26 с.
11. **В 2020** году Европа по-прежнему лидирует по уровню энергоэффективности ЦОД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://servernews.ru/1017638>. – Дата доступа: 12.03.2022.
12. **В. Tschudi, O. Vangeet, J. Cooley, D. Azevedo.** Ene: a metric for measuring the benefit of reuse energy from a data center. – 2010.
13. **Саунаваара Ю.,** Лайне А. Исследования, разработки и образование e: создание основы для центров данных в Арктике и на Севере [Электронный ресурс] / Саунаваара Ю., Лайне А. Арктика и Север. 2021. № 42. – Режим доступа [https://narfu.ru/upload/iblock/122/145\\_169.pdf](https://narfu.ru/upload/iblock/122/145_169.pdf). - Дата доступа: 14.06.2022.
14. **Яковлев И.В.** Утилизация теплоты вентиляционных выбросов центров обработки данных / Яковлев И.В., Авдокунин Н.В. В сборнике: ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. Труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. Курск, 2020. С. 104-109.
15. **Прохоров А.** Центры обработки данных. Анализ, тренды, мировой опыт / Прохоров А., Рахматуллин С. Издание первое – М.: ООО «Альянс Принт», 2021. – 416 с.
16. **M. Wahlroos,** Future views on waste heat utilization – Case of data centers in Northern Europe /M. Pärssinen, S. Rinne // Renewable and Sustainable Energy Reviews T. 82, февраль 2018. С. 1749-1764
17. **Примеры** повторного использования тепла центров обработки данных в Скандинавии: Vela J., Helsinki data centre to heat homes. [Электронный ресурс] - Режим доступа <https://www.theguardian.com/environment/2010/jul/20/helsinki-data-centre-heat-homes> Дата доступа 24.06.2022.
18. **Системы охлаждения** в дата-центрах Selectel [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://selectel.ru/blog/cooling-data-centre-selectel/> - Дата доступа 14.06.2022.
19. **Хомутский Ю.,** Жидкостное охлаждение в ЦОД: опыт, выводы, перспективы // Сетевые решения – 2019.
20. **Компьютер в аквариуме:** создана новая система водного охлаждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://refportal.com/news/events/komp-ater-v-akvariume-sozdana-novaya-sistema-vodnogo-ohlajdeniya/> (дата обращения: 2021).



*В.А. Филиппов, В.С. Агабабов*

ПСК «ЭНЕРГОМОНТАЖ», Москва, Россия

## **ВЗАИМОВОСТРЕБОВАННЫЕ УСТАНОВКИ В МЕТАЛЛУРГИИ\***

### **АННОТАЦИЯ**

В данном исследовании показана возможность использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) с помощью взаимовостребованных установок (ВВУ) в металлургической промышленности. Показана принципиальная структурная схема двух ВВУ. Приведена технологическая схема ВВУ на базе двухступенчатого детандер-генераторного агрегата (ДГА) и двухступенчатого компрессора с электроприводом с описанием принципов работы этой схемы. Для демонстрации положительного эффекта от применения ВВУ на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом в составе доменного производства металлургического предприятия был проведён расчёт для реальных расходов газа и воздуха. Результаты выполненного исследования показывают, что использование ВВУ на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом в составе доменного производства металлургического предприятия позволит полезно утилизировать избыточное давление природного газа, обеспечить приемлемую температуру природного газа низкого давления, выработать дополнительную электроэнергию, тем самым частично обеспечив привода компрессора, увеличить массовую производительность двухступенчатого компрессора на 7 – 8 %

*\* Доклад подготовлен при финансовой поддержке Российского научного фонда гранта на проведение фундаментальных научных исследований Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (№ Проекта 22-29-00096).*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Металлургия является неотъемлемой частью промышленности технологически и экономически сильного государства. Отличительной особенностью металлургии служит высокое потребление первичных энергоресурсов и произведённых энергоносителей. Кроме того, множество технологических процессов в металлургии, которые протекают при достаточно высоких температурах и давлениях, ведут к неполному использованию энергии топлива, в результате чего не в полной мере задействуется энергетический потенциал топлива, запасённый в нём. Зачастую, неиспользованная энергия топлива отражена в виде побочных или промежуточных продуктов, так называемых *вторичных энергоресурсов (ВЭР)*, энергетический потенциал которых выражен в форме химически запасённой энергии, физической теплоты или потенциальной энергии избыточного давления. Значительное количество ВЭР образуется и в технологических процессах, протекающих в чёрной металлургии.

На многих технологических стадиях производства в чёрной металлургии в качестве первичного энергоресурса используется природный газ. Так, согласно [1], на доменную плавку расходуется 80 – 120 м<sup>3</sup> природного газа на 1 тонну чугуна.

Как известно, природный газ в системе газоснабжения транспортируется с давлением, которое многократно превышает значения давлений, необходимых для использования газа потребителями. В настоящее время для уменьшения давления на станциях технологического понижения давления обычно используются дросселирующие устройства. Механическая энергия потока транспортируемого газа, определяемая высоким потенциалом его давления в магистральных газопроводах по сравнению со значением давления, которое необходимо конечному потребителю, при дросселировании теряется. Использование этой энергии возможно с применением ДГА. В этом случае на станции технологического понижения давления его уменьшение осуществляется не в дросселирующих устройствах, а в ДГА, где происходит расширение газа, и часть энергии потока транспортируемого газа преобразуется в детандере ДГА в механическую работу. Полученная механическая работа может быть преобразована в произведённые энергоносители, в первую очередь, в электроэнергию в генераторе ДГА. Было проведено достаточно много исследований, касающихся применения ДГА в промышленности [2 – 5], показавших полезность утилизации избыточного давления транспортируемого природного газа.

Помимо генерации электроэнергии, в ходе утилизации ВЭР избыточного давления природного газа, в процессе расширения последнего, в ДГА при определённых условиях может производиться и холод.

В эффективности применения ДГА на объектах технологического понижения давления играют определённую роль затраты топлива на подогрев газа перед или после ДГА, зависящие, главным образом, от способа подогрева газа. Процесс расширения газа в ДГА сопровождается понижением температуры. Поэтому, для предотвращения образования конденсата и гидратов в газопроводах и арматуре, его подогревают в теплообменнике перед детандером. Согласно [6], температура газа на выходе детандера не должна быть ниже минус 10 °С. Кроме того, при подогреве газа перед ДГА увеличивается теплоперепад при расширении газа в детандере ДГА, позволяя генерировать больше электроэнергии, чем при отсутствии подогрева.

Также, стоит отметить, что в ходе многих технологических процессов, протекающих в чёрной металлургии, существует необходимость в сжатом воздухе. Согласно [7] на доменную плавку требуется 800 – 3500 м<sup>3</sup> сжатого воздуха на 1 тонну чугуна, а в мартеновском процессе 60 – 1400 м<sup>3</sup> на 1 тонну стали.

Довольно часто, на металлургических предприятиях сжатый воздух подготавливают на ТЭЦ – ПВС – комбинация ТЭЦ и паровоздуходувной станции. В свою очередь, часть произведённого пара потребляется ПВС для привода многосекционных компрессорных установок (КУ). В некоторых ситуациях для привода этих установок используется электроэнергия.

Как известно, менее энергозатратным является сжатие более холодного воздуха. Поэтому для снижения энергозатрат при производстве сжатого воздуха применяют охлаждение воздуха перед секциями компрессора.

Одним из вариантов охлаждения сжимаемого воздуха перед секциями компрессора является использование холода, полученного в детандер-генераторном агрегате (ДГА).

## 2. ВЗАИМОВОСТРЕБОВАННЫЕ УСТАНОВКИ

При совместном использовании ДГА и КУ возникает ситуация, когда вторичный энергетический ресурс детандера – поток холода - используется как первичный энергоноситель для работы компрессорной установки, у которой, в свою очередь, есть свой вторичный энергетический ресурс, выраженный в виде потока теплоты, применяемый как первичный энергетический ресурс для работы детандера. При совместной работе такие установки в [8] было предложено называть взаимовостребованными установками (ВВУ).

Простейшая схема из двух ВВУ приведена на рисунке 1.

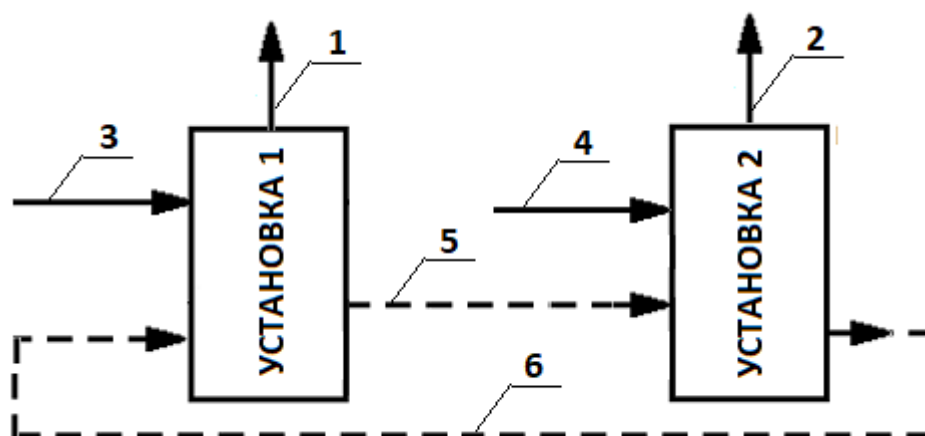


Рис.1 – Структурная схема двух взаимовостребованных установок. 1-продукция установки 1; 2-продукция установки 2; 3-первичная энергия установки 1; 4-первичная энергия установки 2; 5-линия подачи ВЭР1 из установки 1 в установку 2; 6- линия подачи ВЭР2 из установки 2 в установку 1.

Изначально выбрасываемые в окружающую среду вторичные энергетические ресурсы установки 1 (линия 5) поступают в установку 2, где полезно используются для повышения энергетической эффективности её работы, а изначально теряемые в окружающую среду энергетические выбросы установки 2 (линия 6), полезно используются для повышения энергетической эффективности работы установки 1. При этом расход первичных энергетических ресурсов, поступающих в эти установки по линиям 3 и 4, может быть уменьшен, а в некоторых случаях даже и прекращён, когда

вторичных энергетических ресурсов, поступающих в установку, достаточно для обеспечения её работоспособности [8].

## 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВВУ НА БАЗЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ДГА И ДВУХСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Технологическая схему ВВУ на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом приведена на рисунке 2.



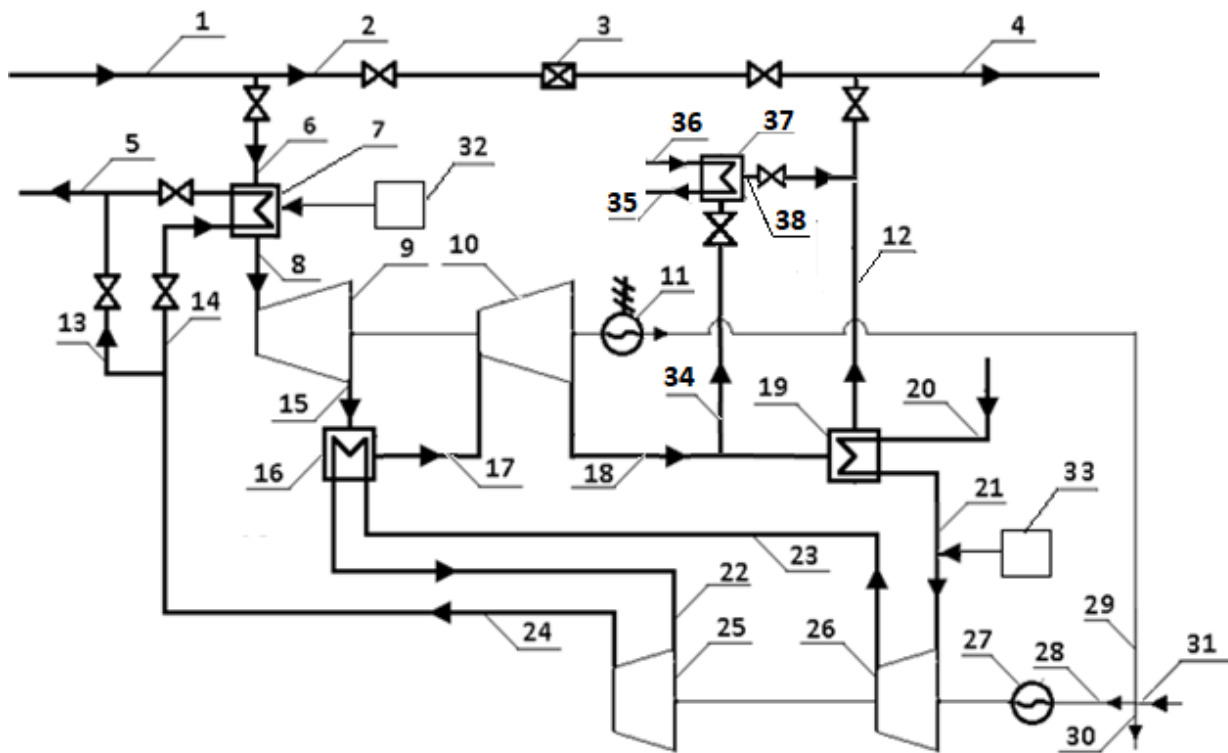


Рис.2 – Технологическая схема взаимостребованной установки на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом. 1 – линия подвода газа высокого давления на входе на ГРП; 2 – линия подвода газа высокого давления к дросселирующему устройству ГРП; 3 – дросселирующее устройство ГРП; 4 – линия отвода газа низкого давления из ГРП потребителям; 5 – линия подачи сжатого воздуха потребителям; 6 – линия подачи газа высокого давления в теплообменник подогрева газа перед первой ступенью детандера ДГА; 7 – теплообменник подогрева газа перед первой ступенью детандера ДГА и охлаждения воздуха после второй ступени компрессора; 8 – линия подачи газа высокого давления в первую ступень детандера ДГА; 9 – первая ступень детандера ДГА; 10 – вторая ступень детандера ДГА; 11 – электрический генератор ДГА; 12 – линия подачи газа низкого давления в газопровод низкого давления на выходе из ГРП; 13 – линия подачи сжатого воздуха после второй ступени компрессора в линию подачи сжатого воздуха потребителям в обход теплообменника подогрева газа перед первой ступенью детандера ДГА; 14 – линия подачи сжатого воздуха после второй ступени компрессора в теплообменник подогрева газа перед первой ступенью детандера ДГА; 15 – линия отвода газа после первой ступени детандера ДГА; 16 – теплообменник подогрева газа перед первой ступенью детандера ДГА и охлаждения воздуха после первой ступени компрессора; 17 – линия подачи газа во вторую ступень детандера ДГА; 18 – линия отвода газа из второй ступени детандера ДГА; 19 – теплообменник подогрева газа после второй ступени детандера ДГА и охлаждения воздуха перед первой ступенью компрессора; 20 – линия подвода воздуха в теплообменник подогрева газа после второй ступени детандера ДГА и охлаждения воздуха перед первой ступенью компрессора; 21 – линия подачи воздуха в первую ступень компрессора; 22 – линия подачи воздуха во вторую ступень компрессора; 23 – линия отвода воздуха из первой ступени компрессора; 24 – линия отвода воздуха из второй ступени компрессора; 25 – вторая ступень компрессора; 26 – первая ступень компрессора; 27 – электродвигатель; 28 – линия подачи электроэнергии на электродвигатель; 29 – линия отвода электроэнергии от электрогенератора ДГА; 30 – линия подачи электроэнергии потребителям; 31 – линия подачи электроэнергии из сети; 32 – внешний источник тепла; 33 – внешний источник холода; 34 – линия отвода части газа низкого давления в холодильник; 35 – линия отвода потока хладагента от холодильника; 36 – линия подвода потока хладагента к холодильнику; 37 – холодильник; 38 – линия отвода газа низкого давления от холодильника в линию подачи газа низкого давления в газопровод низкого давления на выходе из ГРП.

Назначением установки является повышение термодинамической эффективности работы компрессорной установки за счет охлаждения (уменьшения температуры) воздуха, направляемого в ступени компрессора для сжатия, с применением для этого генерирующей электроэнергии детандер-генераторного агрегата, использующего для обеспечения своей работы механическую энергию потока газа при технологическом уменьшении его давления на газораспределительных станциях и газорегуляторных пунктах системы газоснабжения.

Основными элементами установки являются компрессорная установка, детандер-генераторный

агрегат и три теплообменника. В состав ДГА входят две последовательно включенные ступени детандера: первая 9 и вторая 10, а также электрогенератор 11. Компрессорная установка содержит две последовательно включенные ступени компрессора: первую 26 и вторую 25 и электродвигатель 27. Все три теплообменника входят как в состав ДГА, так и в состав компрессорной установки. Один из теплообменников (позиция 7), установленный по ходу движения газа перед первой ступенью детандера 9 ДГА, предназначен для подогрева поступающего в него по линии 6 газа высокого давления с использованием тепла воздуха, подаваемого в теплообменник 7 по линии 14.

Второй теплообменник (позиция 16) используется для снижения температуры поступающего в него из компрессора 26 первой ступени компрессорной установки, по линии 23, воздуха с одновременным нагревом газа промежуточного давления, направляемого в него из детандера 9 первой ступени ДГА по линии 15. Назначением третьего теплообменника (позиция 19) является уменьшение температуры поступающего в него по линии 20 воздуха с одновременным подогревом газа, направляемого в этот теплообменник из детандера 10 второй ступени ДГА и отводимого из него в линию 4 отвода газа низкого давления из СТУД потребителям.

Принцип действия установки заключается в следующем.

Поток газа высокого давления, поступающий на станцию технологического уменьшения давления (СТУД) транспортируемого газа по линии 1, разделяется на две части. Одна из частей потока газа по линии 2 направляется к дросселирующему устройству 3, где его давление уменьшается до необходимого по условиям эксплуатации газоиспользующего оборудования, после чего поступает в линию 4 отвода газа низкого давления из СТУД потребителям. Вторая часть газа высокого давления по линии 6 поступает в теплообменник 7, где производится подогрев этого потока газа за счет тепла воздуха высокого давления, направляемого в этот теплообменник по линии 14. После подогрева в теплообменнике 7 газ по линии 8 направляется в первую ступень 9 детандера ДГА, а отдавший часть тепла воздух по линии 5 отводится потребителям.

Поток газа, часть потенциальной энергии которого в детандере первой ступени 9 преобразуется в механическую работу, в следствии чего его давление снижается до промежуточного значения, а температура уменьшается, отводится из детандера первой ступени 9 по линии 15 в теплообменник 16. В этот же теплообменник по линии 23 направляется поток воздуха после первой ступени 26 компрессора. В теплообменнике 16 происходит охлаждение потока воздуха, после чего этот поток поступает во вторую ступень 25 компрессора, где производится его окончательное сжатие до необходимого давления. Поток сжатого воздуха отводится из второй ступени 25 компрессора по линии 24. В схеме установки предусмотрена возможность отвода части потока сжатого воздуха из линии 24 по линии 13 мимо теплообменника 7 непосредственно в линию 5 подачи сжатого воздуха потребителям, что позволяет при необходимости регулировать температуру подогрева газа в теплообменнике 7.

Из теплообменника 16 поток газа направляется во вторую ступень детандера 10, где часть потенциальной энергии потока газа преобразуется в механическую работу, в следствии чего его давление снижается до необходимо по условиям эксплуатации газопотребляющего оборудования значения, а температура уменьшается. Из второй ступени де-

тандера 10 газ по линии 18 отводится в теплообменник 19, куда также, по линии 20, подводится поток воздуха с начальным давлением и температурой более высокой, чем температура потока газа на входе в теплообменник 19. В результате теплообмена температура воздуха уменьшается, а температура газа увеличивается. Из теплообменника 19 газ по линии 12 отводится в линию 4 отвода газа низкого давления из СТУД потребителям, а воздух по линии 21 поступает в первую ступень компрессора 26.

Механическая работа, произведенная потоком газа в первой 9 и второй 10 ступенях детандера ДГА, в генераторе 11 ДГА преобразуется в электроэнергию, которая по линии 29 поставляется потребителям. Одна часть выработанной генератором 11 электроэнергии отводится из линии 29 по линии 28 на электродвигатель 27 компрессора, вторая часть отводится из линии 29 по линии 30 потребителям. Когда потребляемая мощность компрессора больше, чем мощность, генерируемая ДГА, то электроэнергии подводится из сети по линии 31. В схеме предусмотрены также автономные источники тепла 32 и холода 33. Они предназначены для обеспечения необходимых температур газа высокого давления и воздуха высокого давления соответственно в тех случаях, когда сделать это в теплообменнике 7 только за счёт тепла воздуха после компрессора и в теплообменниках 16 и 19 только за счёт холода газа после детандера оказывается невозможным.

В тех случаях, когда содержание холода в потоке газа низкого давления после второй ступени детандера 10 оказывается излишним для использования его в теплообменнике 19, в схеме предусмотрена возможность отвода части газа низкого давления помимо теплообменника 19 по линии 34 в холодильник 37 с последующим подводом этой части газа по линии 38 в линию 12 и затем по линии 12 в газопровод низкого давления 4.

Для демонстрации положительного эффекта от применения ВВУ на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом в составе доменного производства металлургического предприятия был проведён расчёт для реальных расходов газа и воздуха при следующих условиях: в компрессоре производится сжатие воздуха для технологических нужд доменного производства от атмосферного давления до 5 бар; номинальная производительность компрессора составляет 84 кг/с; номинальная мощность электропривода компрессора, потребляемая из сети, составляет при этом 17,2 МВт. При установке ДГА, в котором осуществляется снижение давления газа от 9 до 3 бар, при расходе природного газа 28,22 кг/с может быть получена дополнительная электрическая мощность, равная 3,77 МВт. Таким образом, применение ВВУ в этом случае позволяет уменьшить расход электроэнергии, потребляемой из сети на привод компрессора, на 22%.

При подогреве природного газа высокого давления в теплообменнике перед первой ступенью

детандера (позиция 7 рисунка 2) до 50°C при заданных параметрах процесса его температура на выходе из первой ступени детандера будет равна 26,5°C. Полученный поток холода может использоваться для охлаждения воздуха перед его сжатием во второй ступени компрессора до температуры 95°C. При подогреве природного газа промежуточного давления в теплообменнике перед второй ступенью детандера (позиция 16 рисунка 2) до 39,6°C при заданных параметрах процесса его температура на выходе из второй ступени детандера будет равна 1,6°C. Полученный поток холода может использоваться для охлаждения воздуха перед его сжатием в первой ступени компрессора до температуры 10°C. Транспортируемый воздухом тепловой поток, составляющий при принятых параметрах процесса 4275 кВт, достаточен для подогрева газа перед первой ступенью детандера от 10 до 50°C и перед второй ступенью детандера с 26,5 до 39,6°C, а также после детандера в теплообменнике (позиция 19 рисунка 2) до температуры 10°C.

Кроме того, стоит упомянуть, что перед каждой ступенью компрессора при охлаждении воздуха его плотность увеличится суммарно примерно в 1,07 раза, что при прочих равных параметрах процесса повысит массовую производительность двухступенчатого компрессора на 7–8%.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организации ВВУ на базе двухступенчатого ДГА и двухступенчатого компрессора с электроприводом в составе доменного производства металлургического предприятия позволит:

- 1) Уменьшить расход первичных энергоносителей, используемых при сжатии воздуха.
- 2) Снизить выброс парниковых газов, так как для осуществления сжатия воздуха расходуется меньше первичных энергоносителей.
- 3) Выработать дополнительную электроэнергию, одним из вариантов использования которой является частичное обеспечение привода компрессорной установки.
- 4) Решить вопрос с подогревом природного газа низкого и высокого давления, нагрев которого будет осуществляться с помощью сжимаемого воздуха.

5) Получить возможность снижения себестоимости произведённой продукции предприятий чёрной металлургии.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВВУ – взаимовостребованные установки;  
ВЭР – вторичный энергетический ресурс;  
ГРП – газорегуляторный пункт;  
ДГА – детандер-генераторный агрегат;  
КУ – компрессорная установка;  
ПВС – паровоздуховная станция;  
СТУД – станция технологического уменьшения давления

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Центральный** металлургический портал [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://metallichekiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie\\_gazov/ochistka\\_d\\_omennogo\\_gaza/3](https://metallichekiy-portal.ru/articles/chermet/ispolzovanie_gazov/ochistka_d_omennogo_gaza/3)
2. **Агабабов, В.С.** Оценка эффективности использования детандер-генераторных агрегатов для получения электроэнергии / В.С. Агабабов // Энергосбережение и водоподготовка. -2001. -№2. -с.13-18.
3. **Агабабов В.С.** Сравнение различных способов подогрева газа в детандер-генераторном агрегате / В.С. Агабабов, И.В. Галас, Е.В. Джураева, Н.А. Зройчиков, А.В. Корягин // Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 46-50.
4. **Клименко А.В.** Генерация холода с применением детандер-генераторных агрегатов / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, Ю.О. Байдакова // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С. 37-44.
5. **Клименко А.В.** Термодинамическая эффективность использования детандер-генераторных агрегатов на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, П.Н. Борисова, С.Н. Петин // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – № 6 (24). – С. 961-968.
6. **СТО Газпром 2-3/5-501-2006.** Нормы технологического проектирования магистральных газопроводов.
7. **Дёмин, Ю.К.** Разработка энергоэффективной схемы промежуточного охлаждения сжимаемого газа в промышленных компрессорных установках / Дис. канд. техн. наук. М. МЭИ (ТУ), 2017 г.
8. **Клименко А. В.** Взаимовостребованные установки - частный случай использования вторичных энергетических ресурсов / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, Петин С.Н., Филиппов В.А. // Промышленная энергетика. – 2022. – № 6.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЛАГОВЫПАДЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются рекуперативные теплообменники с влаговываждением, методики и подходы к их расчёту в случаях, когда происходит охлаждение насыщенного влажного воздуха. Производятся расчёты изменения температур теплоносителей, анализ изменения коэффициента влаговываждения и анализ изменения среднего температурного напора в теплообменнике с влаговываждением.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменники с влаговываждением – это рекуперативные теплообменники, в которых один теплоноситель – влажный воздух, или другой влажный газ, и в котором происходит конденсация паров из влажного воздуха на поверхности теплообмена. Это происходит тогда, когда температура поверхности ниже температуры точки росы. Такие аппараты работают в системах вентиляции и кондиционирования в качестве воздухоохладителей, а также утилизаторов теплоты вытяжного воздуха.

Существует несколько инженерных методов расчёта таких теплообменников: метод Льюиса-Меркеля, метод перехода к условному сухому режиму и метод коэффициента влаговываждения [1-3]. Все эти методы имеют допущения, основное из которых – постоянство температуры стенки, разделяющей теплоносители.

В случае, когда наружный воздух имеет высокую температуру и большую влажность, как, например, в тропическом и субтропическом климате, в процессе охлаждения он может быстро достичь состояния насыщения, и тогда его дальнейшее охлаждение приведет не только к образованию конденсата на поверхности теплообмена, но и к объёмному влаговываждению – образованию тумана. Инженерных методов расчёта таких аппаратов на данный момент не существует, а применимость известных методик расчёта теплообменников с влаговываждением неизвестна. В процессе с образованием тумана температурный напор не будет меняться по экспоненциальному закону, а значит, его среднеинтегральная величина будет отличаться от средней логарифмической. Для разработки методик расчёта таких теплообменников необходимо понять, на сколько сильно будут отличаться значения среднеинтегрального температурного напора и среднего логарифмического, как объёмное влаговываждение будет влиять на распределение температур в аппарате и как будет выглядеть его температурный график, как изменится величина коэффициента влаговываждения.

Целью данной работы является изучение влияния различных режимных параметров работы теплообменника с влаговываждением на изменение температурного напора и коэффициента влаговываждения.

### 2. РАСЧЁТ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ В ВОДЯНОМ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕ

#### 2.1. Допущения

Допущения, вводимые при расчёте:

- 1) Термическое сопротивление стенки, разделяющей теплоносители, не учитывается, то есть температура стенки равна температуре холодного теплоносителя;
- 2) Термическое сопротивление плёнки конденсата не учитывается, то есть температура плёнки конденсата равна температуре поверхности теплообмена;
- 3) Нет загрязнений на поверхности теплообмена;
- 4) Распределение температуры по поверхности теплообмена, а также по сечениям каналов, равномерное;
- 5) Гидродинамические эффекты, возникающие на смоченной поверхности теплообмена, не учитываются: не учитывается гидрофобность/гидрофильность поверхности, не учитываются силы поверхностного натяжения пленки жидкости, которые могут влиять на движение плёнки конденсата – нет струй и сухих пятен;
- 6) Теплообменник считается противоточным.

#### 2.2. Математическая модель

Перепад энтальпий влажного воздуха в теплообменном аппарате разбивается на  $n$  участков. Считается, что на каждом участке происходит смешение влажного воздуха из ядра потока с влажным насыщенным воздухом вблизи плёнки конденсата. Для каждого  $i$ -го сечения, записывается система уравнений, включающая:

- уравнение теплового баланса:

$$\Delta Q = L \Delta H = G_w c_{pw} (t_{wi-1} - t_{wi}), \quad (1)$$

где  $\Delta H = (H' - H'')/n$ ;

- пропорция, связывающая точку на поверхности теплообмена и точку, характеризующую текущие параметры влажного воздуха:

$$\frac{t_{i-1} - t_i}{t_{i-1} - t_{wi}} = \frac{\Delta H}{H_{i-1} - H_{wi}}; \quad (2)$$

- формулы для вычислений давления насыщения, влагосодержания и энтальпии, соответственно:

$$P_s = 133,3 \cdot \exp\left(18,6 - \frac{3992}{233,8 + t}\right), \quad (3)$$

$$d = 622 \cdot \frac{\varphi P_s}{P - \varphi P_s}, \quad (4)$$

$$H = c_B t + 0,001 d (r_0 + c_n t), \quad (5)$$

где  $c_b$ ,  $c_n$ ,  $r_0$  – это удельная изобарная теплоёмкость воздуха, водяного пара и теплота парообразования при 0 °С.

Когда линия процесса изменения параметров влажного воздуха пересекает линию насыщения, т.е. значение относительной влажности в очередном сечении становится выше 100%, считалось, что дальнейший процесс идёт по линии насыщения. Параметры влажного воздуха при этом определялись по обобщающей формуле (6) и формулам (3) - (5):

$$t = \frac{p_1 H^2 + p_2 H + p_3}{q_1 + H}, \quad (6)$$

где  $p_1 = 0,0367$ ,  $p_2 = 60,52$ ,  $p_3 = -584,1$ ,  $q_1 = 93,61$  – численные константы.

Система уравнений (1) – (6) позволяет найти параметры теплоносителей в каждом сечении, построить температурный график и посчитать среднеинтегральный температурный напор в аппарате как:

$$\Delta \bar{t} = \sum \Delta t_i / n, \quad (7)$$

где  $\Delta t_i = t_i - t_{wi}$  – перепад температур на участке.

Кроме того, определялось среднеинтегральное значение коэффициента влаговыпадения по формуле (8):

$$\bar{\xi} = \sum \xi_i / n, \quad (8)$$

где  $\xi_i = \frac{\Delta H}{c_p (t_i - t_{i+1})}$  – коэффициент влаговыпадения на  $i$ -ом участке.

Исходными данными для расчёта были: температура воздуха на входе в теплообменник  $t'$ , влажность на входе  $\varphi'$ , температура воздуха на выходе  $t''$ , и влажность на выходе  $\varphi''$ , теплоёмкость воздуха  $c_p$  и расход воздуха  $L$ ; температура воды на выходе  $t_w''$ , теплоёмкость воды  $c_{pw}$  и расход воды  $G_w$ .

Результатом расчёта являются следующие величины: температура воды на входе  $t_w'$ , коэффициент

Таблица 1. Результаты расчёта.

	I	II	III	IV	V	VI
Температура воздуха на входе $t'$ , °С	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5	33.5
Влажность воздуха на входе $\varphi'$ , %	60	60	65	90	90	90
Температура воздуха на выходе $t''$ , °С	13.995	16.441	12	18	18	18
Температура воды на входе $t_w'$ , °С	-0.81	2.538	6.884	-1.434	7.783	18.286
Температура воды на выходе $t_w''$ , °С	10	12	20	13	15	22
Разность входных температур $t' - t_w'$ , °С	34.31	30.962	26.616	34.934	25.717	15.214
Соотношение расходных теплоёмкостей $(c_{pw}G_w)/(c_pL)$	4.169	4.169	4.169	4.169	8.338	12.507
Коэффициент влаговыпадения по (10) $\xi_0$	2.311	2.313	2.543	3.88	3.88	4.038
Среднеинтегральный коэффициент влаговыпадения $\bar{\xi}$ по (8)	2.315	2.313	2.546	3.947	3.931	4.043
Средний логарифмический температурный напор $\Delta t_{\log}$ по (9), °С	18.819	17.427	8.641	19.958	13.945	6.885
Среднеинтегральный температурный напор по (7) $\Delta \bar{t}$ , °С	19.156	17.767	9.17	20.088	14.503	7.605
Отклонение результатов при вычислении коэффициента влаговыпадения $\delta \xi$ , %	0.202	0	0.099	1.726	1.316	0.143
Отклонение результатов при вычислении среднего температурного напора $\delta \bar{t}$ , %	1.791	1.95	6.13	0.651	3.996	10.461

теплопередачи  $k$ , тепловая мощность аппарата  $Q$  и площадь поверхности теплообмена  $F$ .

Среднеинтегральные величины, определённые по формулам (7) и (8), сравнивались со значениями, определёнными в соответствии с применяемыми инженерными методиками по формулам (9) и (10):

$$\Delta t_{\log} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}}, \quad (9)$$

$$\xi_0 = \frac{H' - H''}{c_p (t' - t'')}. \quad (10)$$

Эти параметры определяются по параметрам теплоносителей во входном и в выходном сечениях теплообменного аппарата.

### 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Численный эксперимент

Было рассмотрено несколько случаев с различными параметрами влажного воздуха и воды. Результаты расчёта представлены в таблице 1. В первых трёх случаях различие заключалось в том, где лежат конечные параметры влажного воздуха: вблизи линии насыщения или на ней. В следующих случаях изменялась разность входных температур теплоносителей (IV, V, VI случаи).

Результаты расчётов водяного воздухоохладителя для всех рассмотренных случаев сведены в таблицу 1. Процесс охлаждения воздуха и температурный график для одного из рассмотренных случаев представлены на рис.1 и рис.2. Излом температурного графика на рис.2 связан со скачкообразным изменением параметров влажного воздуха при изменении расчётной формулы (2) на (6) и размером шага расчётной сетки.

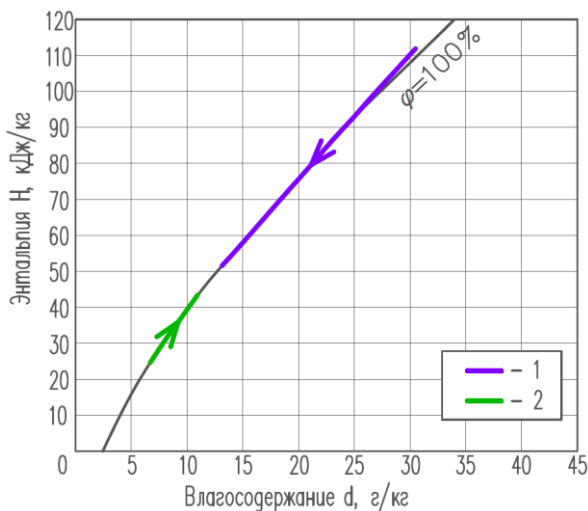


Рис. 1. Процесс охлаждения воздуха в водяном воздухоохладителе для V случая: 1 – влажный воздух; 2 – вода.

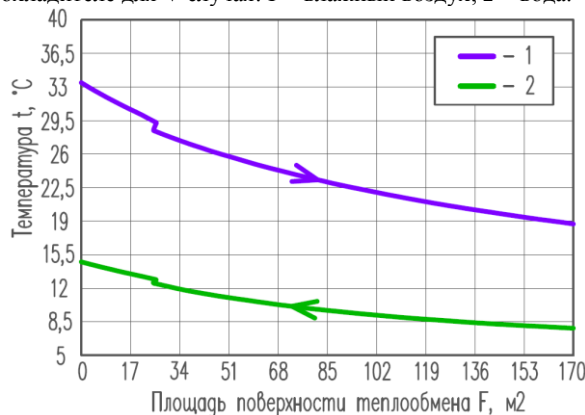


Рис. 2. Температурный график в водяном воздухоохладителе для V случая: 1 – влажный воздух; 2 – вода.

### 3.2. Сравнение результатов расчёта

Среднеинтегральные значения коэффициента влаговываждения и среднего температурного напора в теплообменнике-воздухоохладителе и их значения, определенные по входным и выходным параметрам теплоносителей по существующим инженерным методикам, отличаются. Эта разница зависит от:

1) Начальной влажности воздуха – чем меньше влажность, и чем меньше процесс идет вдоль линии  $\phi = 100\%$ , тем меньше ошибка при расчёте коэффициента влаговываждения. Во всех рассмотренных случаях разница между среднеинтегральным значением коэффициента влаговываждения и его значением, посчитанным по входным и выходным параметрам воздуха, не превысила 2% (случаи IV и I, V и III). Такое отклонение результатов с точки зрения инженерного расчёта можно считать незначительным, а значит, расчёт коэффициента влаговываждения не требует построения процесса изменения параметров влажного воздуха даже в том случае, когда процесс имеет изломы и происходит охлаждение насыщенного влажного воздуха. Различие значений среднего интегрального температурного напора и среднего логарифмического, определенного по входным и выходным параметрам теплоносителей в аппарате, тем больше, чем больше криволинейность процесса изменения параметров влажного воздуха в

аппарате. Максимальная разница в рассмотренных случаях составила почти 11%.

2) Разности входных температур – при её увеличении уменьшается ошибка вычисления среднего температурного напора, а ошибка при расчёте коэффициента влаговываждения, наоборот, увеличивается (случаи VI, V и IV; II и I). Средний температурный напор можно считать как средний логарифмический даже тогда, когда процесс изменения параметров влажного воздуха идёт по линии насыщения. Но при небольших температурных напорах, когда влажный воздух охлаждается до температуры холодного теплоносителя на выходе, ошибка возрастает. Для расчёта среднего температурного напора в этих случаях надо использовать поправку к среднему логарифмическому температурному напору, которая будет зависеть от соотношения расходных теплоёмкостей и входных температур теплоносителей. В рассмотренных случаях разница при расчёте температурного напора составила почти 11%.

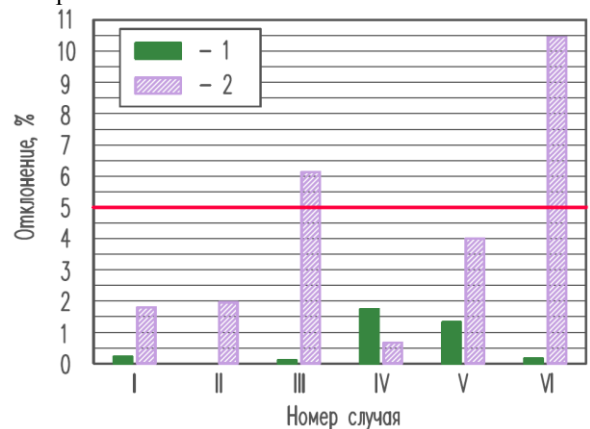


Рис. 3. График отклонений при вычислении коэффициента влаговываждения и среднего температурного напора для каждого случая: 1 – отклонение коэффициента влаговываждения; 2 – отклонение температурного напора.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коэффициент влаговываждения в рекуперативном теплообменнике с объёмным влаговываждением можно рассчитывать по входным и выходным параметрам влажного воздуха, т.к. его значение практически не отличается от среднеинтегральной его величины в действительном процессе. Для расчёта среднего логарифмического напора в некоторых случаях необходимо вводить специальную поправку, так как разница между среднеинтегральным значением температурного напора и его средним логарифмическим значением может превышать 10%. Эта поправка должна зависеть от соотношения расходных теплоёмкостей теплоносителей и разности их входных температур. Разработка номограммы для определения такой поправки имеет большой практический и научный интерес.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Q$  – тепловая мощность, Вт;  
 $t$  – температура воздуха, °C;  
 $H$  – энтальпия воздуха, кДж/кг;

$d$  – влагосодержание воздуха, г/кг;  
 $c_p$  – удельная изобарная теплоёмкость, кДж/(кг·К);  
 $\varphi$  – относительная влажность, %.  
Индексы:  
 $i$  — порядковый номер;  
 $w$  – параметр на стенке или параметры потока холодной воды;  
 $s$  – насыщенное состояние;  
' – параметр на входе;  
" – параметр на выходе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Расчет** трубчатых оребренных теплообменников: учебное пособие / О.Е. Прун, А.Б. Горяев, И.В. Яковлев – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 80 с.
2. **Промышленные** тепломассообменные процессы и установки : Учебник для вузов по специальности "Промышленная теплоэнергетика" / Ред. А. М. Бакластов . – М. : Энергоатомиздат, 1986 . – 328 с.
3. **Внутренние** санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / Б.В. Баркалов, Н.Н. Павлов, С.С. Амирджанов и др.; под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1992.



*А.В. Кульбякина<sup>1</sup>, Н.А. Озеров<sup>1</sup>, А.И. Савельева<sup>1</sup>, А.П. Мушин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

### АННОТАЦИЯ

Актуальной задачей стоящей перед предприятиями нефтеперерабатывающей отрасли, наряду с повышением глубины переработки исходного сырья, является задача снижения энергетической составляющей в конечной стоимости товарной продукции. Значительный потенциал повышения эффективности сосредоточен в энергетическом комплексе предприятий переработки нефти. В статье приведён анализ структуры энергетического комплекса во взаимосвязи с технологической системой. Авторами предложена энерго-ресурсоэффективная система генерации энергетических ресурсов, интегрированная в энергетический комплекс предприятия. Предложенные показатели эффективности позволяют сделать вывод об экономической целесообразности внедрения схемы, а комплексный подход к утилизации ВЭР и производственных отходов позволяет также снизить экологическое воздействие на окружающую среду.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные отечественные предприятия переработки нефти (НПЗ) развиваются в направлении повышения глубины переработки исходного углеводородного сырья и повышения качества товарной продукции до мировых стандартов [1, 2]. В то же время вышеперечисленные направления сопряжены со значительным увеличением абсолютного и удельного потребления энергетических ресурсов (ЭР). Однако для успешной реализации товарной продукции отечественных НПЗ на мировом рынке, кроме высокого качества конечной продукции обязательным условием выступает снижение удельной энергетической составляющей, которая в настоящее время превышает аналогичные показатели производств нефтеперерабатывающей отрасли США и Западной Европы. Большой потенциал повышения энергоэффективности и снижения энергетической составляющей в себестоимости товарной продукции сосредоточен в энергетическом комплексе (ЭК) НПЗ, который реализует процессы генерации, транспортировки и распределения всех видов ЭР, потребляемых на технологические и другие нужды.

### 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НПЗ

Предприятия нефтеперерабатывающей отрасли являются сложными энерготехнологическими системами, ЭК которых связан с технологической системой непрерывными процессами генерации и потребления ЭР [3]. Большая доля первичных ЭР для НПЗ приходится на углеводородное топливо - до 65%, на долю тепловой и электрической энергии 20% и 15% соответственно (усредненные показатели для отечественных предприятий отрасли). Наиболее крупными подсистемами ЭК НПЗ являются: топливная, система теплоснабжения, система электроснабжения.

#### 2.1. Топливная система НПЗ

Топливная система НПЗ характеризуется сложной, многофункциональной структурой, функционирование которой направлено на надежное обеспечение технологических потребителей топливом требуемых параметров. Структурная схема топливной системы НПЗ во взаимосвязи с ЭК и внешней системой энергообеспечения приведена на рис. 1.

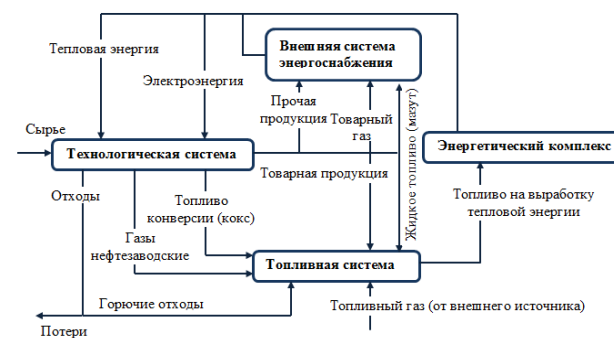


Рис. 1. Схема взаимосвязей топливной системы НПЗ с ЭК и внешней системой энергообеспечения

НПЗ характеризуются сложной структурой потребления углеводородного топлива, в состав которого входит газообразное топливо (собственной генерации и от внешних источников), жидкое топливо, твердое топливо. В табл.1 приведено распределение потребления различных видов топлив на действующем отечественном НПЗ топливного профиля [4, 5].

Таблица 1. Процентное соотношение потребления различных видов топлива производствами НПЗ

Технологические производства	Потребление топлива, %			
	Природный газ	Нефтезаводской газ	Жидкое топливо	Кокс
Первичная переработка	8,73	75,98	15,30	0,00
Термический крекинг	3,98	78,76	17,26	0,00
Каталитический крекинг	4,10	43,12	26,19	26,59
Каталитический риформинг	3,08	83,94	12,98	0,00
Изомеризация	6,46	93,54	0,00	0,00
Гидроочистка	0,12	98,97	0,92	0,00
Производство серной кислоты	0,00	100,00	0,00	0,00
Легкий гидрокрекинг	0,00	99,37	0,63	0,00
Факельное хозяйство	0,00	100,00	0,00	0,00

Приведенные в таблице данные получены на основании анализа информации доступной в открытой печати и согласно нормативным показателям энергопотребления технологических процессов переработки нефти [6, 7]. Таким образом, большая доля потребления топлива приходится преимущественно на нефтезаводские газы сложного углеводородного состава, и жидкое топливо. Данные топлива, как и кокс (топливо конверсии) относятся к собственным ЭР. Основными источниками собственного газа являются установки

первичной переработки нефти, каталитического риформинга, газодиффузионные установки (ГФУ), а также установки термического крекинга, каталитического крекинга. Мазут вырабатывается в установках первичной переработки и каталитического крекинга. Матричная модель (табл.2) отражает в определенной мере взаимосвязь топливных потоков и технологических производств НПЗ.

Таблица 2. Матричная модель взаимосвязи топливных потоков на производствах НПЗ

Технологические производства	Потребление топлива, %			
	Природный газ	Нефтезаводской газ	Жидкое топливо	Кокс
Первичная переработка	1	1/2	1/2	3
Термический крекинг	1	1/2	1/2	3
Каталитический крекинг	1	1/2	1	1/2
Каталитический риформинг	1	1/2	1	3
Гидроочистка	3	1	1	3
Изомеризация	1	1	3	3
Легкий гидрокрекинг	1	1	1	3
Производство серной кислоты	3	1	3	3
Факельное хозяйство	3	1	3	3
ГФУ	3	2	3	3

1 – потребление; 2 – генерация; 3 – не используется

Не смотря на относительно небольшую долю стороннего природного газа в общем топливопотреблении, этот показатель имеет большое значение в топливном балансе предприятия. Природный газ закачивается в топливную сеть для поддержания ее требуемого давления, кроме того количество его потребления многократно возрастает в период пусков установок, плановых ремонтов, когда выработка собственного топлива становится невозможной. Также наблюдается тенденция увеличения доли природного газа в общем топливопотреблении за последние несколько лет.

В свою очередь использование нефтезаводских газов в качестве основного топлива на НПЗ имеет определенные сложности, в первую очередь это связано с тем, что такие газы характеризуются не равномерной выработкой и переменным составом, динамично меняющимся в зависимости от состава перерабатываемого сырья, технологических режимов установок, климатических условий.

Переменный характер состава топливного газа, требует динамичного и своевременного регулирования

режимов работы топливопотребляющего оборудования – печей, испарителей, энергетического оборудования и др., в противном случае может наблюдаться не только превышение удельных показателей потребления топлива в сравнении с нормативными, но и нарушение технологического режима, выход из строя оборудования.

## 2.2. Теплоэнергетическая система НПЗ

Теплоэнергетическая система НПЗ обеспечивает бесперебойное снабжение основных технологических производств тепловой энергией, в качестве которой используется водяной пар различных параметров. Для подачи пара на предприятие существует сеть трубопроводов, обеспечивающих бесперебойное снабжение объектов паром от источников.

В зависимости от назначения использования водяного пара технологическими производствами потребляется пар различных параметров, характеристика которых приведена в таблице 3 [8].

Таблица 3. Параметры перегретого водяного пара, используемого различными потребителями НПЗ

Тепловая энергия	Источник	Потребители
Пар высокого давления t - 220 - 235 °С P - 2,0-4,0 МПа	ТЭЦ, котельная (производственная котельная) котлы-утилизаторы	- технологические цели; - нагрев нефтепродуктов выше 160 оС; - турбинный привод компрессоров.
Пар среднего давления t - 190 - 300 оС P - 1,0-1,6 МПа	ТЭЦ котельная (производственная котельная) котлы-утилизаторы расширители конденсата	- технологические цели; - нагрев нефтепродуктов выше 80 оС; - привод насосов вязких нефтепродуктов; - обогрев трубопроводов с высоковязкими нефтепродуктами; - паротушение.
Пар низкого давления t - 190 - 300 оС P - 1,0-1,6 МПа	ТЭЦ, котельная (производственная котельная) котлы-утилизаторы расширители конденсата, редуцированный пар среднего давления	- технологические цели; - горячее водоснабжение; - паротушение.

Пар высоких параметров используется для технологических нужд, в ребойлерах колонн и теплообменниках. Пар среднего давления может быть использован для снижения парциального давления нефтяных паров, для ведения процесса регенерации МЭА (метилэтаноламина), в паровых теплообменниках и ребойлерах, в форсунках печей для распыления жидкого топлива, поддержания в горячем состоянии систем паротушения и паровых завес печей, на реакторных блоках установок каталитического крекинга, на приводы паровых насосов. Также пар среднего давления используется на вспомогательные нужды для обогрева оборудования и трубопроводов, пропарки емкостей и резервуаров после освобождения от нефтепродуктов, при поведении работ, связанных с использованием пара. При необходимости внутри технологических установок пар среднего давления редуцируется в пар низкого давления.

Характерно, что доля собственной выработки тепловой энергии для НПЗ (за счет котлов утилизаторов и производственных котельных) достаточно высока. Так на действующем отечественном предприятии топливного профиля пар среднего давления вырабатывается на установках первичной переработки нефти, а именно в котлах-утилизаторах тепла дымовых газов печей установки ЭЛОУ-АВТ-6 (тепловая мощность 17 МВт); на установках каталитического крекинга (установка 43-102) за счет снятия тепла в змеевиках регенератора (тепловая мощность 10 МВт); в котлах-утилизаторах и парогенераторах установок «Мокрого катализа» (тепловая мощность 35 МВт). Однако, не смотря на значительную долю собственной генерации, до сих пор остается актуальным вопрос потребления тепловых ЭР со стороны. Очевидно, что собственная генерация пара является более целесообразной с точки зрения, как экономических показателей, так и надежности. При этом, полное покрытие потребности в тепловой энергии может быть обеспечено не только установкой дополнительного тепло-утилизационного оборудования или строительством котельных, но и устранение потерь, оптимизацией структуры теплоэнергетической системы.

### 2.3. Система электроснабжения

От режимов работы системы электроснабжения зависит эффективность и надежность эксплуатации основного и вспомогательного оборудования, автоматических систем управления, систем связи и сигнализации. Электроснабжение НПЗ осуществляется от внешней энергосистемы по нескольким воздушным линиям. Нефтеперерабатывающие заводы занимают большие производственные площади, в связи с этим одной из их характерных особенностей является высокая протяженность линий электроснабжения, с напряжением 35, 110, 220 кВ и разветвленной сетью 6 кВ, территориально разобщенных производств. Система электроснабжения соответствует категориям потребителей электроэнергии по бесперебойности. Производства НПЗ относятся к I категории потребителей, только незначительная часть их оборудования относится к II и III категории. Технологическое оборудование, такое как синхронные и асинхронные электродвигатели, преобразователи, магнитные пускатели, системы автоматического управления крайне чувствительны к перебоям электроснабжения. В частности перерыв питания систем управления не должен превышать 0,1 с, а у синхронных электродвигателей напряжением 6 кВ – 0.4 с. [9].

Таким образом, большое значение для развития ЭК НПЗ в настоящее время приобретают:

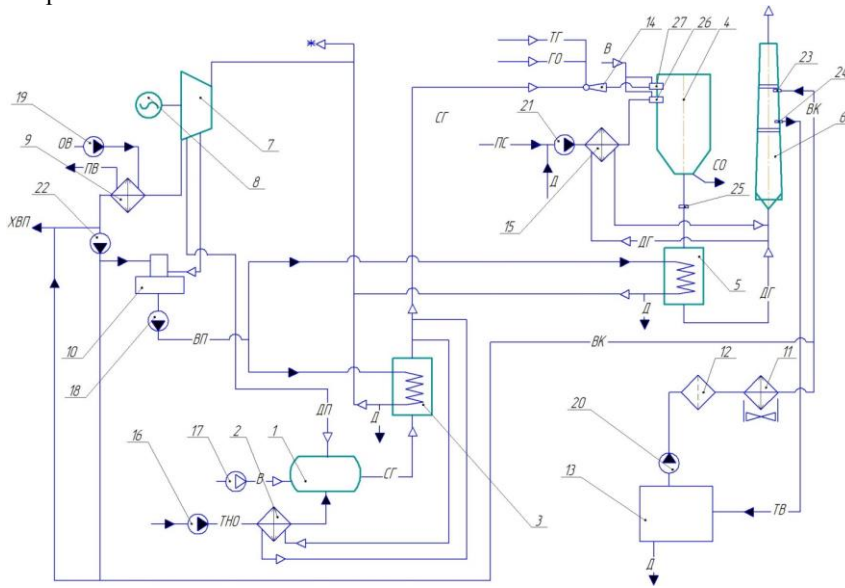
- вопросы оптимизации систем генерации, распределения, транспортировки и потребления ЭР;
- максимальное замещение сторонних ЭР за счет реализации неиспользуемого потенциала производственных ВЭР для генерации собственных ЭР.

### 3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НПЗ

Как показал анализ концепций развития предприятий отрасли, одним из наиболее перспективных направлений развития ЭК является создание собственных систем энергообеспечения интегрированных в структуру ЭК во взаимосвязи с внешними источниками энергообеспечения [10-13].

Для действующих и проектируемых НПЗ предложены собственные системы комплексной генерации ЭР [14, 15]. На рисунке 2 приведена запатентованная схема установки энергообеспечения с комплексной

утилизацией отходов предприятий нефтегазовой отрасли [15].



1 – газогенератор; 2 – подогреватель мазута; 3, 5 – котлы-утилизаторы; 4 – печь нейтрализации; 6 – дымовая труба; 7 – паровая турбина; 8 – электрогенератор; 8 – теплообменник конденсатора (подогреватель сетевой воды); 10 – деаэрактор; 11 – теплообменник охладитель водяного конденсата; 12 – фильтр водяного конденсата; 13 – емкость сбора конденсата; 14 – газовый эжектор; 15 – подогреватель производственных стоков; 16, 18, 19, 20, 21, 22 – насосы (мазута, питательный, сетевой, технической воды, производственных стоков, конденсата); 17 – компрессор; 23 – форсунка водяного конденсата; 24 – патрубок отвода конденсата; 25 – устройством ввода реагента; 26 – форсунка подачи жидких стоков; 27 – входной топливный патрубок.

ТНО – тяжелые нефтяные остатки (мазут, гудрон, тяжелый каталитический газойль) на газификацию; В – воздух в газификатор и на горение в печь нейтрализации; СГ – синтез-газ (газ газификации); ДГ – дымовые газы; ГО – горючие газообразные отходы; ПС – производственные стоки; ДП – дутьевой пар; Д – дренаж; ВП – вода питательная; ПВ – прямая теплофикационная вода; ОВ – обратная теплофикационная вода; ВК – водяной конденсат; ТВ – техническая вода.

Рис. 2. Схема установки энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов предприятий переработки нефти.

В блок газификации (в установленный там газогенератор 1) подаются тяжелые нефтяные остатки, сжатый воздух (кислород) и дутьевой пар, образующийся высокотемпературный синтез газ направляется в паровой котел утилизатор 3, где охлаждается, отдавая тепло на парообразование и перегрев водяного пара, после чего в качестве топливного газа подается блок нейтрализации (в печь нейтрализации 4). В блок нейтрализации для термической нейтрализации подаются предварительно нагретые жидкие отходы (стоки промышленные, хозяйственно-бытовые, дренажи), поступают также газообразные отходы (низкопотенциальные углеводородные газы), при необходимости может подаваться топливный газ. За счет высоких температур и технической конструкции блока нейтрализации происходит полное термическое обезвреживание вредных веществ содержащихся в отходах, получаемый сухой остаток относится к низкому классу опасности.

Поток дымовых газов после печи нейтрализации, содержащий в себе водяные пары обезвреженных стоков и от сжигания углеводородного топлива, поступает по газоходу в котел-утилизатор 5. Охлажденный поток дымовых газов направляется в дымовую трубу 6, предварительно для поглощения оксидов серы из потоков дымовых газов предусмотрено

устройство ввода реагента. С целью увлажнения и охлаждения дымовых газов и конденсации из них водяных паров в дымовой трубе размещена форсунка подачи охлажденного водяного конденсата. Сконденсированная вода подается в блок водообеспечения, где проходит необходимые стадии очистки и охлаждения, полученный таким образом водяной конденсат не содержит минеральных примесей и солей и без дополнительной очистки направляется на заполнение и подпитку водяного тракта котлов утилизаторов и сети теплоснабжения, кроме этого качество воды позволяет подавать ее на установку подготовки хозяйственно питьевой воды (ХВП).

Теплота потоков дымовых газов и синтез газа рекуперирована в котлах-утилизаторах, что позволяет вырабатывать перегретый водяной пар, который используется в теплофикационных турбинах блока ПТУ, часть пара используется на технологические нужды.

Предлагаемая установка позволяет повысить энергоэффективность и экологическую безопасность генерации тепловой, электрической энергии, водоснабжения и ЭК НПЗ и комбинирована с различными технологическими процессами.

Снижению удельного потребления топливного газа на процессы когенерации и утилизации отходов способствует использование в качестве топлива в блоке нейтрализации горючих газообразных и жидкофазных отходов, синтез-газа, вырабатываемого в блоке газификации. Повышение энергоэффективности схемы, обеспечивается также за счет рекуперации теплоты дымовых газов, и использования теплоты высокотемпературного потока синтез-газа.

Термическое обезвреживание газообразных отходов, промышленных стоков, воды промывки, дренажа (что исключает загрязнение литосферы и гидросферы при подземном хранении) обуславливает экологическую безопасность схемы. Также размещенное в дымоходе печи нейтрализации устройство ввода реагента позволяет практически полностью исключить загрязнения атмосферы оксидами серы при термическом обезвреживании газообразных отходов и промышленных и хозяйственно-бытовых стоков.

Увеличение надежности – ресурса непрерывной работы, предлагаемой схемы обеспечивается высоконадежными, независимыми источниками пароснабжения теплофикационных турбин двумя котлами-утилизаторами, потребляющими тепловую энергию от различных источников.

Такими образом, техническим результатом внедрения предлагаемой схемы является комбинирование технологических процессов термической утилизации производственных отходов (горючих газов, стоков) с процессами газификации и выработки энергоресурсов (электрической, тепловой энергии, синтез-газа, водоснабжения), снижение удельного потребления топливного газа на выработку энергоресурсов и утилизацию отходов, повышение экологической безопасности и надежности схемы.

#### 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ СОБСТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭР С ЭК НПЗ

Для оценки эффективности интеграции предлагаемой схемы с ЭК и технологической системой НПЗ разработана система критериев энергоэффективности, а именно технологические (степень конверсии сырья, производительность по выпускаемой продукции), энергетические (КПД отдельных аппаратов, удельное топливопотребление, эксергетические показатели и др.) и технико-экономические [16]. В работе представлены наиболее значимые критерии позволяющие оценить именно интеграционную составляющую собственных источников энергообеспечения в ЭК НПЗ.

Для оценки эффективности действующего ЭК НПЗ и внедрения собственных источников энергообеспечения использовался показатель энергоэффективности, позволяющий определить затраты энергии на единицу произведенной продукции:

$$E_{y\partial} = \frac{\sum E_{in}}{P} = \frac{E_{in,h} + E_{in,e} + E_{in,f}}{P} \quad (1)$$

где  $\sum E_{in}$  – сумма всех подведенных видов энергии;  $P$  – количество произведенной продукции;  $E_{in,h}$ ,  $E_{in,e}$ ,  $E_{in,f}$  – подведенные к процессу соответственно тепловая энергия, электроэнергия, топливо для производства продукции  $P$ .

С учетом того, что на собственные нужды НПЗ потребляют ЭР, как от сторонних источников, так и собственной выработки, формула (1) примет вид:

$$E_{y\partial} = \frac{((E_{in,h} + E_{in,e} + (E_{in,f} - E_{rec,f}))) - (E_{out,h} + E_{out,e} + E_{out,f})}{P_i} \quad (2)$$

где  $E_{in}$ ,  $E_{out}$  – исходящие и входящие соответственно потоки энергии;  $E_{rec,f}$  – топливо собственной выработки, используемое в технологическом процессе;  $P_i$  – количество продукции  $i$  вида.

Не менее важным показателем для оценки степени совершенства технологических процессов и определения степени влияния мер по повышению эффективности ЭК НПЗ является индекс энергоэффективности, позволяющий установить тенденцию изменения энергопотребления процесса или аппарата:

$$I_{ef} = \frac{E_{y\partial}^H}{E_{y\partial}^\Phi} \quad (3)$$

где  $E_{y\partial}^H$  – нормативный показатель энергоемкости рассматриваемого процесса или установки;  $E_{y\partial}^\Phi$  – фактический показатель энергоемкости.

Учитывая сложность рассматриваемого объекта, для решения задачи определения его энергоэффективности были использован декомпозиционно-агрегативный подход к анализу сложных систем, в таком случае зависимость для определения индекса энергоэффективности примет вид:

$$I_{ef} = \frac{\sum_{i=n} P_{i,j} \cdot E_{y\partial,j}^H}{\sum E_{y\partial}^\Phi} \quad (4)$$

где  $P_{i,j}$  – выпуск продукции вида  $j$  технологическим производством  $i$  за выбранный период;  $E_{y\partial,j}^H$  – нормативное энергопотребление для вида продукции  $j$ . В качестве основного критерия экономической эффективности для проектируемых и реконструируемых объектов был принят *чистый дисконтированный доход* (интегральный эффект) определяемый как сумма текущих эффектов за анализируемый период, приведенных к начальному шагу

$$ЧДД = \mathcal{E}_\Sigma = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot \alpha_t, \quad (5)$$

где  $R_t$  – результаты, достигаемые на  $t$ -м шаге расчета;  $Z_t$  – затраты, осуществляемые на этом же шаге;  $\alpha_t$  – коэффициент дисконтирования, определяемый для постоянной нормы дисконта.

С помощью формул (3), (4) рассчитан индекс энергоэффективности в базовом варианте (числитель) и после внедрения предлагаемой схемы (знаменатель) для установки первичной переработки, установки термического крекинга, каталитического крекинга соответственно:

$$I_f = \frac{0.65 - 0.75}{0.89 - 0.91} \quad (5)$$

$$I_f = \frac{0.8 - 0.9}{0.98 - 1.1} \quad (6)$$

$$I_f = \frac{0.75 - 0.85}{0.83 - 0.98} \quad (7)$$

В качестве примера приведены технико-экономические показатели собственного источника энергообеспечения интегрированного с ЭК для действующего отечественного предприятия переработки нефти производительностью 8 млн. т в год топливного профиля (табл.4).

Таблица 4. Технико-экономические показатели

Мощность	
- электрическая	28 МВт
- тепловая	31,4 Гкал/час
Индекс энергоэффективности (по использованию отдельных видов ЭР)	
- энергопотребления	1,21
- водопотребления	1,102
- водоотведения	1,02
Интегральный эффект (за 10 лет)	51,2 млн. долларов
Срок окупаемости	4,8 лет

Предложенные показатели эффективности позволили оценить существующий уровень и эффективность энергопотребления, а также дать оценку эффективности внедрения собственного источника энергообеспечения (рис.2). Приведенные данные позволяют утверждать, что предлагаемая схема является экономически целесообразной. Кроме экономического эффекта, необходимо отметить снижение вредного воздействия на окружающую среду, за счет комплексной утилизации ВЭР и производственных отходов, а также организации практически замкнутой системы водообеспечения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные отечественные предприятия переработки нефти являются крупными потребителями ЭР на собственные нужды, с тенденцией увеличения уровня энергопотребления за счет внедрения энергоемких вторичных процессов;
2. Значительный потенциал энергосбережения сосредоточен в ЭК НПЗ, который связан с технологической системой предприятия и внешней системой энергообеспечения через непрерывные процессы генерации и потребления ЭР;
3. Интеграция эффективного источника генерации ЭР в ЭК НПЗ оценена с помощью предложенной системы показателей эффективности. Приведенные

данные позволяют сделать вывод об эффективности предлагаемой схемы в структуре ЭК НПЗ.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

НПЗ — нефтеперерабатывающий завод;  
 ЭР — энергетические ресурсы  
 ЭК — энергетический комплекс;  
 ВЭР — вторичные энергетические ресурсы

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Архипенко А.Д.** Современное состояние и проблемы развития нефтеперерабатывающего комплекса в России // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. 2016. № 25. С. 126-130.
2. **Современное состояние и перспективы развития технологий ресурсосбережения** ПАО «Газпром» Гадельшина А.Р., Китаев С.В., Галикеев А.Р. // **Территория Нефтегаз**. 2016. № 5. С. 88-91.
3. **A.V. Kulbjakina and I.V. Dolotowsky**, Methodological aspects of fuel performance system analysis at raw hydrocarbon processing plants. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 944 (2017) 012068
4. Официальный сайт «Роснефть». Годовой отчет -2017. URL: [https://www.rosneft.ru/upload/site1/document\\_file/a\\_report\\_2019.pdf](https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2019.pdf) (дата обращения: 05.12.2020)
5. Официальный сайт «Газпром нефть» URL: <http://ir.gazprom-neft.ru/novosti-i-otchety/godovye-otchety/> (дата обращения: 05.12.2020)
6. **Справочник нефтепереработчика**: Справочник / Под ред. Г.А. Ластовкина, Е.Д. Радченко и М.Г. Рудина. – Л.: Химия, 1986. - 648 с.
7. **Ларин Е.А., Долотовский И.В., Долотовская Н.В.** Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 440 с.
8. **Кульбякина А.В., Озеров Н.А., Батраков П.А., Савельева А.И.** Анализ эффективности теплоэнергетической системы предприятий переработки нефти В сборнике: Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Редколлегия: В.А. Лихолобов [и др.]. Омск, 2022. С. 36-37.
9. **Кожевникова Е.С. Кубарьков Ю.П., Синельникова С.Н., Челпанов В.В.** Повышение надежности систем электроснабжения нефтеперерабатывающего предприятия // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-shemy-elektrosnabzheniya-neftepererabatyvayuschego-predpriyatiya> (дата обращения: 05.12.2021).
10. **Batenin V.M., Maslennikov V.M., Shterenberg V.Y., Gordin K.A.** The concept of an energy-technological complex for using natural gas in the production of electric power, heat, and synthetic liquid fuel with partial sequestering of carbon dioxide emissions into the atmosphere. Thermal Engineering. 2020. Т.

67. № 5. С. 290-295.
11. **Seijo Fernández, S.** Computational intelligence techniques for maximum energy efficiency of an internal combustion engine and a steam turbine of a cogeneration process / S. Seijo Fernández, I. del Campo, J. Echanobe, J. García-Sedano, E. Suso, E. Arbizu // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. – 2014. Т. 5. No. 2-3. Pp. 1-10.
12. **Леушева, Е.Л.** Система комплексного энергообеспечения нефтегазопромыслов с использованием нефтяного газа в качестве энергоносителя / Е.Л. Леушева, В.А. Моренов // *Нефтяное хозяйство*. – 2015. – № 4. – С. 96-100.
13. **Кульбякина А.В., Озеров Н.А., Савельева А.И., Батраков П.А.** Анализ эффективности внутренних источников энергообеспечения объектов нефтегазовой отрасли // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2019. Т. 19. № 12. С. 49-54.
14. **Пат. №134993 РФ, МПК F01K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения** / Долотовский И.В., Ленкова А.В., Долотовская Н.В. – № 2013130457/06; заявл. 02.07.2013; опубл. 27.11.2013, Бюл. №33
15. **Пат. №2713936 РФ, Патент об изобретении. Установка энергообеспечения с комплексной утилизацией отходов предприятий нефтегазового сектора** / Кульбякина А.В., Озеров Н.А.; заявл. 06.12.2018; опубликован 11.02.2020.
16. **A V Kulbyakina, N A Ozerov, P A Batrakov.** Efficiency Evaluation of Oil and Gas Processing Plants Internal Power Supply Sources // *AIP Conference Proceedings 2019* (Scopus <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5122066>).



## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ НАСЫПНЫХ САДОК В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

### АННОТАЦИЯ

Поиск оптимальных режимов нагрева на промышленных предприятиях сопряжен с высокими затратами времени на экспериментальные исследования. В отличие от эксперимента, математическое моделирование сокращает время исследовательских работ и в целом является менее ресурсоемким. Для решения задач энергосбережения при работе термических и нагревательных печей предложена математическая модель, учитывающая порозность садки.

Численная реализация модели осуществлена методом конечных разностей и зональным методом расчета сложного теплообмена. Разработанная математическая модель теплообмена в термической печи реализована в виде компьютерной программы и предназначена для поиска новых энергосберегающих режимов работы печи.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газовые нагревательные печи широко используют на металлургических и машиностроительных заводах для нагрева металла и последующей обработки давлением (прокатка, прошивка, ковка, штамповка и т.д.) и для термообработки изделий с целью придания изделиям необходимых механических свойств. Потребление топлива нагревательными печами на этих предприятиях составляет значительную долю в энергетическом балансе, которая зависит, в том числе, и от эффективной тепловой работы нагревательной печи. Под эффективностью тепловой работы нагревательной печи понимают такой режим нагрева металла, при котором заданное качество металла достигают за минимальное время нагрева и, соответственно, при минимальном расходе топлива, либо при фиксированном расходе топлива и времени нагрева добиваются максимальной производительности печи и тем самым повышают ее удельные показатели.

Разработку новых рациональных режимов тепловой работы печей можно осуществить экспериментально на действующих печах или экспериментальных огневых стендах и применяя теоретические методы – методы математического моделирования. У экспериментальных и теоретических методов исследования режимов нагрева и термообработки есть свои положительные и отрицательные стороны [1]. Однако теоретические методы, во-первых, менее затратные (речь не идет о затратах времени ученого-разработчика), а, во-вторых, более гибкие, так как позволяют исследовать режимы работы печи, которые не всегда можно осуществить на практике из-за технологических особенностей процесса нагрева. Главное требование к математической модели – это

ее способность адекватно (достоверно) воспроизводить поведение объекта моделирования, в нашем случае, нагревательной газовой печи. Адекватность математической модели проверяют путем сравнения результатов расчета и эксперимента.

### 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Газовая камерная нагревательная печь схематично показана на рис. 1. Насыпная садка помещена в несколько контейнеров – 1 (на рис. 1 показаны три контейнера), которые установлены на поду печи – 2. Газообразное топливо сжигают в горелках, установленных в подподовом пространстве – 3, а дымовые газы поступают в рабочее пространство печи – 4. Изменяя расход топлива и массу садки во времени можно организовать разные режимы нагрева и выдержки насыпных изделий, помещенных в контейнеры.

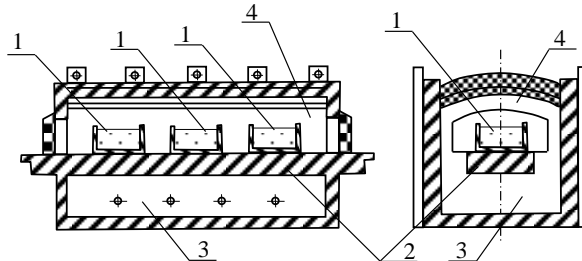


Рис. 1. Схема топливной садочной печи: 1 – садка; 2 – под; 3 – подподовое пространство; 4 – рабочая зона печи.

Математическая модель тепловой работы печи состоит из трех расчетных блоков:

- решения задачи внешнего теплообмена;
- решения задачи внутреннего теплообмена;
- решения задачи сопряженного теплообмена.

Внешняя задача теплообмена в рабочей зоне печи решена зональным методом расчета в резольвентной постановке [1]:

$$\sum_{k=0}^n A_{ki} T_k^4 + \sum_{k=0}^n g_{ki} T_k^4 + g_i = 0. \quad (1)$$

Поток результирующего излучения для  $i$ -ой поверхностной зоны рассчитывают по формуле:

$$Q_i^P = \sum_{k=0}^n A_{ki} T_k^4. \quad (2)$$

Внутренний теплообмен моделируется трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности с эффективными теплофизическими свойствами:

$$c_s \rho_s \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (3)$$

Эффективные теплофизические свойства насыпных садов в зависимости от пористости определены экспериментально в работе [2]. Влияние фильтрации дымовых газов на величину коэффициента эффективной теплопроводности учтено при настройке математической модели печи.

Нелинейное дифференциальное уравнение теплопроводности с заданными условиями однозначности решено численно методом сеток по чисто неявной разностной схеме [1]. Зависимость теплофизических свойств садки от температуры учитывалась итерационным путем. Трехмерная задача теплопроводности решена методом расщепления по локально-одномерной схеме [3].

Температурное поле в ограждениях печи найдено решением одномерного дифференциального уравнения теплопроводности для неограниченной пластины методом сеток, используя чисто неявную разностную схему решения. Внешний теплообмен для внутренней поверхности обмуровки печи также решен резольвентно-зональным методом расчета по уравнениям аналогичным уравнениям (1) и (2). Тепловые потери от внешней поверхности обмуровки в окружающую среду рассчитаны с учетом конвективной и лучистой составляющих теплообмена.

Сопряжение температурных полей и тепловых потоков в рабочем пространстве печи и в садке производили их согласованием на поверхности садки и внутренней поверхности обмуровки на каждом расчетном шаге по времени.

Перед началом расчета температурного поля садки выполняется расчет разогрева пустой печи в системе печная атмосфера – обмуровка печи.

Математическая модель дополнена блоками расчета горения топлива и расчета угловых коэффициентов излучения в рассматриваемой системе теплообмена.

Адекватность разработанной математической модели тепловой работы камерной нагревательной печи проверена по результатам промышленного эксперимента Колибабы О.Б. (Крыловой О.Б.) [4].

### 3. КОМПЬЮТЕРНЫЙ КОД «RNP»

Численная математическая модель нагревательной печи реализована в виде компьютерного кода «RNP», разработанного в среде Turbo Delphi 2006 с удобным для пользователя интерфейсом ввода исходных данных и наглядным представлением результатов расчета в виде таблиц и графиков.

### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Расчет выполнен для горизонтальной термической садочной печи с подподовой топкой, установленной на машиностроительном предприятии г. Санкт-Петербург и предназначенной для нагрева и выдержки насыпных изделий с целью термообработки. Размеры рабочего пространства печи составляют 4.2×2.1×0.7 м. Футеровка печи толщиной 0.35 м выполнена из шамотного кирпича. Садка из стали 25X1МФ с температурой 20 °С, массой 2500 кг и пористостью  $f = 0.6$  загружалась в предварительно разогретую печь в трех одинаковых контейнерах прямоугольной формы, размеры которых равны 1.0×1.18×0.17 м. Контейнеры изготовлены из чугуна и имеют перфорированное дно. В результате сканирования вариантов был выбран режим нагрева садки, который при расходе природного газа 150 м<sup>3</sup>/ч позволил достичь заданного качества садки в конце нагрева ( $T_w = 880$  °С и  $\Delta T \leq 10$  °С) с экономией в денежном выражении 188 рублей на тонну продукции (в ценах на природный газ 2017 года).

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана компьютерная модель для расчета основных параметров тепловой работы камерной газовой печи, которая позволяет выполнять вычислительные эксперименты с целью поиска режимов нагрева с минимальными затратами энергии при условии выполнения заданных параметров качества металла.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$A$  — коэффициент радиационного обмена;  
 $g$  — коэффициент конвективного обмена;  
 $T$  — температура, °С;  
 $c_s$  — удельная теплоемкость насыпной садки, кДж/(кг·К);  
 $\rho_s$  — плотность насыпной садки, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda_c$  — коэффициент теплопроводности насыпной садки, Вт/(м·К).  
 Индексы:  
 $i, k$  — порядковые номера поверхностной зоны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
2. Сулейманов М.Г., Бухмиров В.В. Исследование влияния пористости и типа контейнера на температурное поле нагреваемых садов // Вестник ИГЭУ: Журнал. Иваново: ООО "ПресСто". 2017. №5. С.5–10.
3. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск, «Наука и техника», 1976. 144 с.
4. Крылова О.Б. Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садов: дис... канд. техн. наук. Ленинград, 1988. 185 с.

*М.С. Пурдин, Тукбаев Н.Э., Герасимов И.А.*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККУМУЛЯЦИИ ТВЕРДОГО ИЗОЛИРОВАННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе обоснована актуальность исследования коэффициента аккумуляции твердого изолированного цилиндрического аккумулятора теплоты. Представлена постановка задачи и методика численного решения. Проведены расчеты и анализ зависимостей коэффициента аккумуляции твердого изолированного цилиндрического аккумулятора теплоты от частоты колебаний и его относительного внутреннего радиуса.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В 2016 году вступило в силу Парижское соглашение [1], которое подписали 185 стран, включая Россию. Участники Парижского соглашения берут на себя обязательства по борьбе с изменением климата. В 2026 году будет введен трансграничный налог на содержание углерода в топливе. Он будет способствовать снижению объемов торговли углеродосодержащим топливом, уменьшению выбросов парниковых газов и улучшению экологической ситуации в мире в целом.

Повышение энергетической эффективности позволяет снизить уровень выбросов парниковых газов за счет уменьшения количества потребляемого топлива. Одним из подходов в повышении энергетической эффективности является выравнивание суточных и годовых графиков потребления тепловой и электрической энергии. Это позволяет снизить пиковые нагрузки энергетической системы и режимы малой нагрузки. Устранение пиковых нагрузок позволяет снизить установленную мощность энергетического оборудования, что повышает рентабельность энергосистемы в целом. Режимы малой нагрузки часто сопровождается уменьшением КПД энергетической установки, так как издержки на поддержание работы системы слабо изменяются и увеличиваются относительно уменьшенной выработанной полезной мощности. Помимо этих двух эффектов стабилизация мощности приводит к уменьшению негативного влияния переходных процессов и увеличивает эксплуатационный ресурс энергоустановок. Еще одним преимуществом стабилизации системы энергоснабжения – отсутствие необходимости ввода маневренных мощностей, которые имеют большую скорость регулирования, как правило, за

счет малой эффективности. Все это указывает на то, что стабилизация суточных и годовых графиков потребления энергии – важный этап развития энергосистем, переводящий ее на качественно новый уровень.

В первую очередь необходимо отметить, что нестабильность мощности системы энергоснабжения является особенностью потребителей, которые имеют особый график активности. Часто он связан с естественными периодами деятельности человека, но может быть связан с другими причинами. Эта особенность системы потребителя энергии является следствием локальной оптимизации его процессов. Стабилизации суточных и годовых графиков мощности можно достичь разными путями. Попытки изменить режим работы потребителя могут привести к смещению от оптимального положения по его целевой функции, снижению рентабельности или другим нарушениям, например, избыточной усталости персонала. Уже применяется экономическое стимулирование потребителей электроэнергии за потребление в периоды времени с малой нагрузкой, например, ночью. Это искусственная экономическая мера, которая может приводить к описанным выше проблемам, хотя и является в некоторой степени эффективной.

Наиболее рациональным и устойчивым методом является стабилизация на уровне энергосистемы, то есть на месте возникновения проблемы. Таким образом последствия от принятых мер будут минимальны. Стабилизации мощности энергосистемы можно добиваться на уровнях генерации, транспортировки и потребления. Однако все эти части энергосистемы содержат оборудование, подверженное негативным явлениям от пиковых и малонагруженных режимов, а колебания мощности от потребителя распространяются по всей системе вплоть до генерирующего оборудования. Установка системы стабилизации мощности у потребителя позволяет стабилизировать энергосистему в целом. Для этого можно применять как электрические аккумуляторные станции, так и тепловые аккумуляторы.

Наиболее перспективными являются фазопереходные, жидкие и твердые теплоаккумулирующие материалы (ТАМ). Фазопереходные аккумуляторы

являются наиболее перспективными, так как вмещают большое количество теплоты в малом объеме, однако их создание затратно, так как требует применения специально подобранных химических веществ, заключенных в специальный теплообменный аппарат. Гораздо более рентабельными являются твердые аккумуляторы на основе легкодоступных материалов, например, грунта. Они не требуют создания корпуса и организации движения аккумулирующего агента для улучшения теплообмена, а теплота распространяется за счет эффективной теплопроводности.

Проектирование грунтовых аккумуляторов затруднено, так как нет общей методологии по расчету их свойств, таких как: геометрические размеры, коэффициент аккумуляции, тепловые потери, мощностные характеристики и т.д.

Решение задачи о естественной аккумуляции теплоты в грунте при сезонном промерзании представлено в [2] и показано, что теплообмен в грунте, может быть описан уравнением теплопередачи без конвективных членов для диффундирующей воды. Существуют некоторые аналитические решения, позволяющие описать теплообмен в грунте [3]. В работе [4] показана методика численного расчета теплообмена в теплоизолированном твердом аккумуляторе теплоты в среде MathCAD.

Известно, что решение линейного параболического уравнения теплопередачи при граничном условии, изменяющемся во времени по сложному закону, может быть представлено как сумма решений для простых законов изменения граничного условия. Работа любого аккумулятора теплоты имеет периодический характер. Разложением в гармонический ряд Фурье можно описать любой периодический закон изменения температуры во времени. Поэтому наибольший интерес представляет исследование задачи о простейших колебаниях температуры на поверхности твердого тела. В настоящей работе проведено исследование коэффициента аккумуляции в твердом изолированном аккумуляторе теплоты при колеблющемся граничном условии первого рода.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Примем допущение о том, что цилиндрический аккумулятор теплоты имеет длину вдоль оси симметрии на порядок больше, чем радиус. В таком случае теплообмен в нем описывается уравнением теплопередачи [5] вида

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;  $t$  – время, с;  $x$  – координата, м;  $c_p$  – теплоемкость ТАМ, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – теплопроводность ТАМ, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность ТАМ, кг/м<sup>3</sup>. Для большей общности и снижения числа параметров приведем уравнение теплопередачи к безразмерному виду

$$\frac{\partial g}{\partial t_\omega} = \text{Fo} \left( \frac{1}{X} \frac{\partial g}{\partial X} + \frac{\partial^2 g}{\partial X^2} \right), \quad (2)$$

где  $\text{Fo} = \frac{a\tau}{2\pi l^2}$  – периодическое число Фурье,

$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  – температуропроводность ТАМ, м<sup>2</sup>/с;

$t_\omega = t\omega$  – безразмерное время;  $X = x/l$  – безразмерная координата;  $l$  – радиус аккумулятора теплоты, м;

$g = \frac{T - T_{\text{cp}}}{A_0}$  – безразмерная температура,  $A_0$  – ам-

плитуда колебания температуры на поверхности, К;  $T_{\text{cp}}$  – осредненная во времени температура аккумулятора теплоты, К;  $\tau = 2\pi/\omega$  – период колебаний, с, соответствующий круговой частоте  $\omega$ , с<sup>-1</sup>.

Так как сопротивление теплоотдаче теплоносителя и внутренней стенки (при наличии) аккумулятора малы по сравнению с сопротивлением теплопередачи самого аккумулятора, что необходимо для запасаания теплоты на достаточно продолжительное время, то на внутренней границе аккумулятора условия близки к граничному условию первого рода. В рамках задачи о простейшем колебании на границе аккумулятора справедливо записать периодический закон  $g_{x=L_0} = \cos(t_\omega)$ , где  $L_0$  – безразмерная координата внутренней границы аккумулятора теплоты (относительный внутренний радиус).

Как правило аккумуляторы теплоты находятся в массиве симметрично или размещены отдельно в единичном виде с нанесенной теплоизоляцией, сопротивление которой значительно больше сопротивления аккумулятора теплоты, поэтому на наружной поверхности ставится адиабатическое граничное условие второго рода  $\left( \frac{\partial g}{\partial X} \right)_{X=1} = 0$ .

Решение задачи зависит от числа Фурье  $\text{Fo} \in (0, \infty)$  и относительного внутреннего радиуса  $L_0 \in (0, 1)$ .

## 3. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Такая постановка представляет собой одномерную нестационарную задачу без начальных условий и ограниченную по координате в цилиндрической системе координат. Ее аналитическое решение методом разделения переменных приводит к типу задач Штурма-Лиувилля [6], что в цилиндрической системе координат означает результат в виде рядов с функциями Бесселя. Это дает довольно сложную зависимость, а точность подхода не высока. Однако такая постановка является достаточно простой для решения численными методами, что позволяет сколь угодно точно представить результат.

В среде MathCAD написана программа на основе функции Pdsolve. Она не предусматривает решения задачи без начальных условий, а только переходных задач, поэтому для получения решения задачи установившегося колебательного процесса проводится

несколько итераций, в которых распределение температуры по координате в конце итерации используется как начальное условие для последующей. Расчетным путем удалось определить, что оптимальным является 7 итераций. В таком случае на седьмой итерации максимальная разница температуры между началом и концом периода составляет не более 1% в любом режиме, а нестационарный процесс можно считать установившимся. Число разбиений расчетной сетки составляет 720 во времени и 256 по координате, что дает погрешность по правилу Рунге на несколько порядков меньше, чем погрешность от итерационного решения.

В результате расчетов получено распределение безразмерной температуры во времени и по координате, а затем определено количество аккумулированной теплоты в зависимости от времени по формуле

$$Q_{ACC}(t_{\omega}) = \frac{\int_{L_0}^L 2X \vartheta(X, t_{\omega}) dX}{(L^2 - L_0^2)}.$$

Коэффициент аккумуляции – это максимальное в периоде количество теплоты, воспринятой аккумулятором, отнесенное к количеству теплоты, которое тело может содержать при равномерном по радиусу нагреве до максимальной температуры граничного условия. Коэффициент аккумуляции определяется по формуле

$$Acc = \max(Q_{ACC}(t_{\omega})).$$

Коэффициент аккумуляции характеризует инерционность аккумулятора теплоты. Если этот коэффициент мал, то аккумулятор не успевает глубоко прогреться с той частотой, которую имеет источник, а если близок к 1, то теплота воспринимается объемом хорошо. Аккумуляторы теплоты с малыми коэффициентами аккумуляции могут применяться для стабилизации температуры теплоносителя, так как поглощенная теплота будет отведена в глубь аккумулятора и граница приобретет температуру близкую к средней, при этом возникают большие градиенты температуры на теплообменной поверхности, что говорит о большом потоке теплоты. Аккумуляторы с высоким коэффициентом аккумуляции могут применяться для запасаения теплоты, так как аккумулятор быстро нагреется по всему относительно малому объему и повышает свой потенциальный уровень, чтобы в дальнейшем его отдать. Идеальный аккумулятор теплоты имеет коэффициент аккумуляции равный единице. Аккумулятор теплоты с коэффициентом равным 0 может быть назван идеальным стабилизатором температуры.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 1. представлены зависимости коэффициента аккумуляции теплоты от числа Фурье для различных относительных внутренних радиусов. При увеличении числа Фурье продолжительность периодов зарядки и разрядки увеличивается, а аккумулятор успевает прогреться на большую глубину, поэтому коэффициент увеличивается, а эффективная

тепловая емкость ТАМ тоже увеличивается. При уменьшении числа Фурье период колебаний уменьшается, аккумулятор не прогревается на значительную глубину и коэффициент аккумуляции уменьшается, а эффективная тепловая емкость ТАМ тоже уменьшается.

При уменьшении относительного внутреннего радиуса аккумулятора коэффициент аккумуляции уменьшается, так как площадь теплообмена с теплоносителем уменьшается и плотность теплового потока при удалении от внутренней стенки аккумулятора снижается. Поэтому для увеличения коэффициента аккумуляции теплоты необходимо увеличивать относительный внутренний радиус.

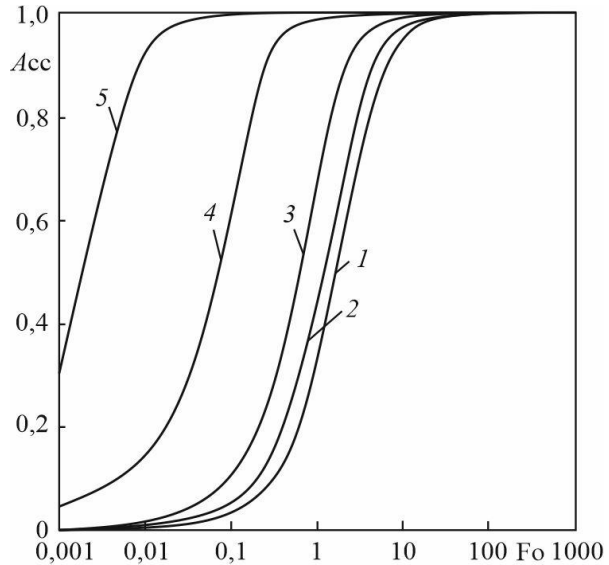


Рис. 1. Зависимость коэффициента аккумуляции от числа Фурье. 1 –  $L_0 = 0,001$ , 2 –  $0,008$ , 3 –  $0,064$ , 4 –  $0,512$ , 5 –  $0,9$ .

Так как часть аккумулятора теплоты отведена под канал, в котором протекает теплоноситель, то полезный объем аккумулятора теплоты уменьшается на эту величину. На рис. 2 представлено изменение коэффициента объемной эффективной тепловой емкости аккумулятора теплоты. Он показывает изменение зависимости произведения коэффициента аккумуляции теплоты и доли полезного объема аккумулятора  $V$ . С увеличением относительного внутреннего радиуса полезный объем аккумулятора резко снижается. При  $L_0 = 0,512$  максимальное значение объемной эффективной тепловой емкости аккумулятора составляет 0,738. Это довольно маленькое значение. Для минимизации объема аккумулятора теплоты, работающего с заданными периодом заряда-разряда и свойствами ТАМ, необходимо подбирать относительный внутренний радиус таким, чтобы обеспечить максимальное значение объемной эффективной тепловой емкости аккумулятора. Его значительное уменьшение наблюдается при относительном внутреннем радиусе  $L_0 > 0,1$ .

Для проектирования стабилизаторов температуры важно, чтобы значение объемной эффективной тепловой емкости аккумулятора было минимально. Так как при увеличении относительного внутрен-

него радиуса кривые смещаются влево, то при фиксированном значении числа Фурье коэффициент аккумуляции возрастает. Поэтому при проектировании стабилизаторов температуры важно уменьшать относительный внутренний радиус, но он должен быть достаточным, чтобы обеспечить необходимый тепловой поток.

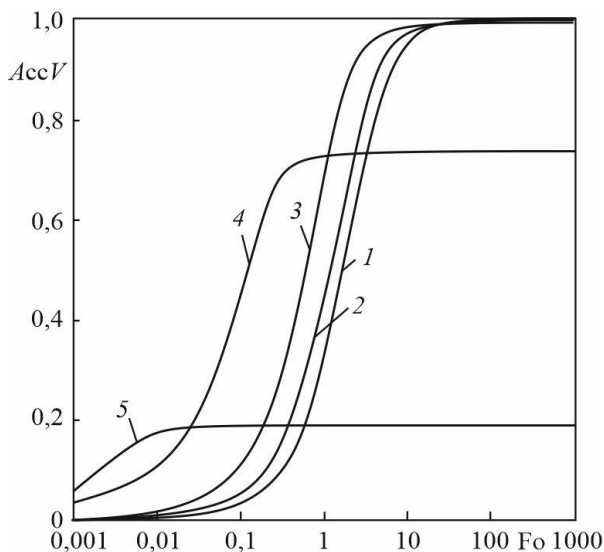


Рис. 2. Изменение произведения коэффициента аккумуляции теплоты и доли полезного объема аккумулятора теплоты в зависимости от числа Фурье. 1 –  $L_0 = 0,001$ , 2 – 0,008, 3 – 0,064, 4 – 0,512, 5 – 0,9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты коэффициента аккумуляции твердого изолированного цилиндрического аккумулятора теплоты. Проведен анализ зависимостей коэффициента аккумуляции от числа Фурье и относительного внутреннего радиуса. При увеличении числа Фурье эффективная тепловая емкость ТАМ

увеличивается. При уменьшении относительного внутреннего радиуса аккумулятора коэффициент аккумуляции уменьшается.

С увеличением относительного внутреннего радиуса полезный объем аккумулятора резко снижается. Его значительное уменьшение наблюдается при относительном внутреннем радиусе  $L_0 > 0,1$ .

Показано, что наиболее эффективные аккумуляторы теплоты получаются при  $L_0 < 0,1$  и  $Fo > 10$ , а наиболее эффективные стабилизаторы температуры получаются при  $L_0 < 0,1$  и  $Fo < 0,01$ .

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, грант № МК-1456.2022.4.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Paris Agreement** // United Nations. 2015.
2. **Пурдин М.С., Гаряев А.Б.** Численное моделирование естественной аккумуляции теплоты в грунте при сезонном промерзании // Промышленная энергетика, 2021, № 7, с. 34–42.
3. **Пурдин М.С., Гончарова Е.П., Тукбаев Н.Э.** Аналитическое решение задачи о теплообмене в верхних слоях грунта без фазовых переходов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать восьмая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (17–19 марта 2022 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2022. с. 526.
4. **Пурдин М.С., Павлова Е.А., Николаева А.Н., Муртазин Р.Э.** Моделирование установившегося теплообмена в цилиндрическом однофазном аккумуляторе теплоты при колеблющемся граничном условии первого рода // сб. докл. десятой международной школы-семинара молодых ученых и специалистов "Энергосбережение — теория и практика" — Курск: Издательство ЗАО «Университетская книга», 2020, с. 82-87.
5. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности // М.: Из-во «Высшая школа», 1967, 600 с.
6. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики // 1999. М.: Издательство МГУ. 799 с.

## РАСЧЕТ ПЛОСКОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

### АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен рабочий цикл и расчет плоской тепловой трубы для отвода тепла от электронной аппаратуры, также выполнен обзор элементов, из которых она состоит. Приведена целесообразность использования плоской тепловой трубы с точки зрения энергосбережения и надежности в системах обеспечения температурных режимов и в заключении дан краткий анализ полученных результатов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При завершении проработки функциональных узлов, когда определен характер связей между функциональными блоками, процесс проектирования переходит к стадии поиска рационального расположения компонентов, при этом необходимо учитывать тепловой режим работы установки.

С изменениями температуры могут меняться различные параметры и коэффициенты системы, переменчивы номиналы резисторов и конденсаторов, снижаются технические характеристики приборов. Проблема охлаждения приборов электроники очень серьезна, поэтому отказаться от нее нельзя. Очень важен правильный, оптимальный выбор системы охлаждения. Системы охлаждения, предназначенные для отвода тепла от аппаратуры, являются одними из основных элементов преобразовательного устройства, во многом определяющими его надежность и долговечность. В связи с этим встает вопрос о выборе системы с наименьшим потреблением энергии. В настоящее время циркуляционные активные системы охлаждения, потребляющие большое количество энергии на работу нагнетателей, заменяются пассивными двухфазными системами – тепловыми трубами различных типов и конфигураций. Преимуществами их работы является полное отсутствие потребления электрической энергии на привод, высокая надежность за счет отсутствия движущихся частей, гибкость, удобство монтажа и эксплуатации, долговечность.

Плоские ТТ (ПТТ) являются эффективными устройствами и могут передавать тепловые потоки на большие расстояния как в поле массовых сил, так и в невесомости, и обеспечивают возможности их регулирования. Данный вид тепловых труб нашел

применение в области космической техники, авиации, автотранспорта, электроники и многих других областях техники. Для ПТТ проводилось много разных исследований, было создано множество аналитических и математических моделей, но исследования продолжают до сих пор.

Целью данной работы является расчет и анализ энергоэффективной системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с использованием плоской тепловой трубы.

### 2. ПЛОСКАЯ ТЕПЛОВАЯ ТРУБА

#### 2.1. Описание плоской тепловой трубы

Плоская тепловая труба является очень эффективным устройством, которое может обеспечить распределение теплового потока от миниатюрного нагревателя на большую площадь с малым градиентом температуры.

Плоская тепловая труба является развитием идеи классической тепловой трубы и работает по такому же принципу.

Плоская тепловая труба в отличие от традиционных трубок с круглым сечением имеет наиболее сложную конструкцию (рис. 1).

Корпус представляет собой тонкую плоскую панель с капиллярной структурой (фитилем) и паровыми каналами. При этом внутренняя структура фитиля и каналов такова, что теплоноситель способен передвигаться в любом направлении в плоскости всей конструкции.

Поэтому плоская тепловая труба способна гарантировать практически постоянную температуру всей поверхности.

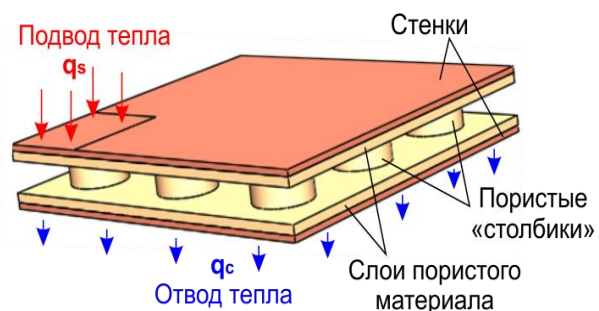


Рис. 1. Внутренняя структура плоской тепловой трубы.



## 2.2. Конструкция и использование ПТТ для отвода тепла от электронной аппаратуры

В статье [1] Нестеров представляет схему отвода тепла с помощью Т-образных плоских тепловых трубок для охлаждения электронных блоков (см. рис. 2). Электронный блок представляет собой алюминиевый каркас, на котором с двух сторон расположены печатные платы с электронными компонентами. Каркас устанавливается нижней частью на основание радиатора. В алюминиевый каркас встроены плоские Т-образные тепловые трубки. Основания (ножки) тепловых трубок входят в углубления в основаниях рамы. По бокам плоских тепловых трубок расположены теплоотводящие компоненты. Нижняя поверхность тепловых трубок прижата к основанию радиатора.

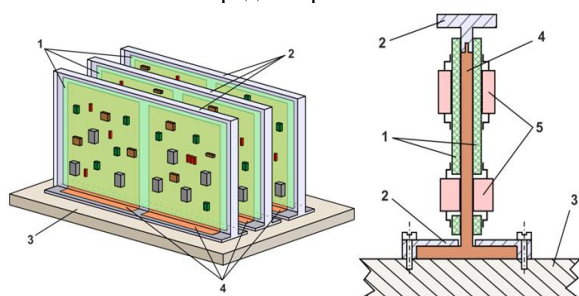


Рис. 2. Схема отвода тепла от электронных блоков с помощью Т-образных плоских тепловых трубок: 1 – печатные платы, 2 – алюминиевые рамки, 3 – основание радиатора, 4 – Т-образные плоские тепловые трубки, 5 – электронные компоненты.

Использование Т-образных плоских тепловых трубок позволяет значительно повысить эффективность отвода тепла от печатных плат с электронными компонентами к основанию радиатора, на котором установлено электронное устройство.

На рис. 3 показан внешний вид и внутреннее устройство плоских тепловых трубок. Между плоскими тонкими металлическими стенками расположена гофрированная перфорированная пластина. Процесс изготовления тепловых трубок включает покрытие всех внутренних поверхностей деталей тепловых труб металлическим порошком и его спекание. Затем детали прессуют под давлением 3-6 тс / см<sup>2</sup> и спекаются друг с другом. Спекание проводят в вакууме при температуре 800-900 °С.

Гофрированная перфорированная пластина образует паровые каналы и обеспечивает прочность конструкции. Все поверхности внутри тепловой трубы покрыты спеченным металлическим порошком, который представляет собой фитиль. Фитиль и паровые каналы обеспечивают эффективную транспортировку рабочей жидкости по направлению к основанию Т-образной плоской тепловой трубы и обратно (вертикальное направление на рисунке 3).

Рабочая жидкость также может двигаться в поперечном направлении) из-за наличия перфораций во внутренней пластине и поперечных коллекторах

на краях тепловой трубы. Нижняя сторона на основании тепловой трубки - это область рассеивания тепла, которая прижимается к основанию радиатора.

## 3. ГЕРМЕТИЧНЫЙ БЛОК

### 3.1. Конструкция герметичного блока

Наглядный пример одноблочного прибора (рис. 4) в общем виде с вертикальными модулями открытого типа (3), которые можно вытаскивать из конструкции, с электрорадиоэлементами (5) и модулями закрытого типа (4) показан на рис. 12. Модули комбинируются в кожухе (1) при помощи направляющих (7), на боковых сторонах которого может располагаться радиатор (2). В общем случае крайние (6) модули прибора касаются стенок прибора. Верхняя поверхность кожуха может быть оснащена гофрированной поверхностью (8).

Тепловая энергия, которая выделяется внутри герметичного блока, рассеивается конвекцией и излучением с ребренных, гофрированных и плоских поверхностей корпуса. Воздух внутри прибора движется из-за разности температур в верхние и нижние устройства. Воздух из нижней части прибора переходит в верхнюю по каналам между модулями.

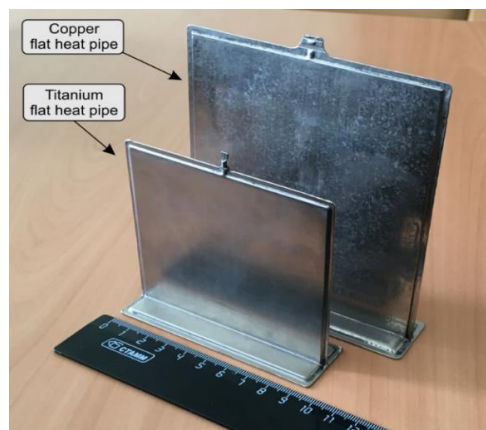


Рис. 3. Внешний вид Т-образных плоских тепловых трубок.

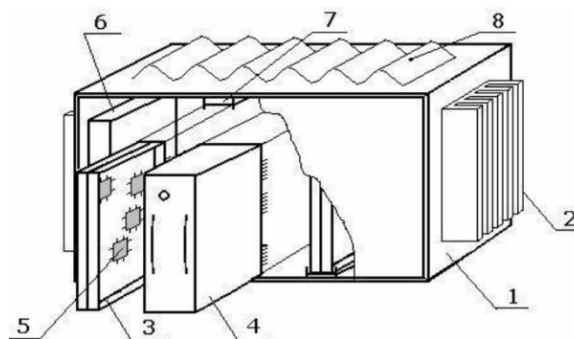


Рис. 4. Обобщенный чертеж одноблочного прибора.

### 3.2 Расчет плоской тепловой трубы

Рассмотрим возможность охлаждения блока с использованием плоской тепловой трубы (без использования других способов охлаждения), отводящая тепло от электронной аппаратуры, запишем тепловой баланс и определим основные рабочие характеристики.

С учетом особенностей конструкции тепловой трубы составляем тепловой баланс.

Для определения рабочих характеристик плоской тепловой трубы или ряда плоских тепловых труб, помещенных в определённые внешние условия, необходимо решить систему уравнений в программе Mathcad:

$$Q = q \cdot 2 \cdot a \cdot b; \quad (1)$$

$$Q = 2 \cdot a \cdot b \cdot \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} \cdot (t_1 - t_2); \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_{эф}}{\lambda_{эф}}} \cdot F_{ист} \cdot (t_2 - t_s); \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_{эф}}{\lambda_{эф}}} \cdot F_{конд} \cdot (t_s - t_3); \quad (4)$$

$$Q = \lambda_{ст} \cdot F_{конд} \cdot (t_3 - t_4); \quad (5)$$

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \eta \cdot F_{вн.конд} \cdot t_4^4; \quad (6)$$

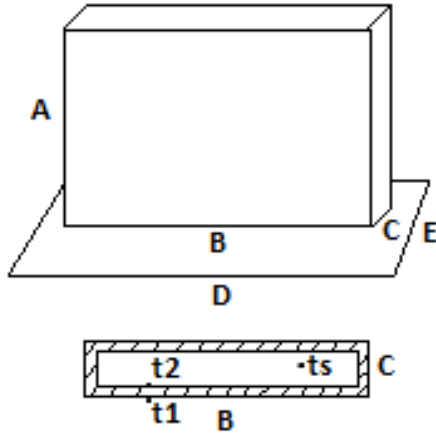


Рис. 5. Геометрические характеристики и распределение температур на ПТТ.

Уравнения характеризуют следующие процессы:

- (1) – тепловая нагрузка на поверхности испарителя;
- (2) – теплопередача через стенку испарителя ПТТ;
- (3) – теплоотдача от внутренней стенки пористой структуры испарителя ПТТ к промежуточному теплоносителю;
- (4) – теплоотдача при конденсации пара промежуточного теплоносителя к внутренней стенке ПТТ;
- (5) – теплопередача через стенку конденсатора ПТТ;
- (6) – излучение от внешней стенки конденсатора;

где:

- $t_s = 370$  – температура насыщения, К;
- $t_1 = 363,15$  – температура наружной стенки испарителя, К;
- $t_2$  – температура внутренней стенки испарителя, К;
- $t_3$  – температура внутренней стенки конденсатора, К;
- $t_4$  – температура наружной стенки конденсатора, К;
- $q$  – удельный тепловой поток,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ;

$$\lambda_{ст} = 238 - \text{коэффициент теплопроводности, } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{эф} = \lambda_{ст} \cdot (1 - \varepsilon_n) = 238 \cdot (1 - 0,5) = 119 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \quad (7)$$

$\delta_{ст} = 0,023$  – толщина стенки, м;

$$\delta_{эф} = \frac{c - 2 \cdot \lambda_{ст}}{2}, \text{ м};$$

Площадь поверхности испарителя находится по формуле:

$$F_{ист} = 2 \cdot a \cdot b, \text{ м}; \quad (8)$$

Площадь поверхности конденсатора находится по формуле:

$$F_{конд} = b \cdot c, \text{ м}; \quad (9)$$

Площадь радиационного теплообмена находится по формуле:

$$F_{вн.конд} = d \cdot e, \text{ м}; \quad (10)$$

Коэффициенты теплоотдачи для испарительной и конденсаторной зон:

$$\alpha_i = 42 \cdot (1 + 0,007 \cdot t_s) \cdot (q)^{0,7} = 16489, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (11)$$

$$\alpha_k = C \cdot \left( \frac{r \cdot \rho_k^2 \cdot \lambda_k^3 \cdot g}{\mu_k \cdot l \cdot \Delta t_k} \right)^{0,25}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \quad (12)$$

$Q = 40$  – тепловая нагрузка, Вт;

$\eta = 0,98$  – эффективность оребрения;

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} - \text{постоянная Стефана-Больцмана, } \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4};$$

$b = 0,11$  – ширина конденсатора, м;

$d = 0,14$  – внешняя сторона конденсатора, м;

$e = 0,01$  – внешняя сторона конденсатора, м.

Теплофизические свойства:

Свойства аммиака для жидкости:

$\lambda = 0,2931$  – коэффициент теплопроводности аммиака

при  $t_s$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;

$\mu = 6,549 \cdot 10^{-5}$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$\nu = 1,408 \cdot 10^{-7}$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;

$\sigma_{ж} = 0,0054$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ;

$\rho = 465,29$  – плотность аммиака,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$r = 743904,11$  – теплота конденсации пара при заданном давлении,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

Система уравнений решается в программе Mathcad.

Были получены значения:

$a = 0,075$  – длина испарителя, м;

$c = 0,009$  – ширина конденсатора, м;

$t_2 = 379,94$  – температура внутренней стенки испарителя, К;

$t_3 = 361,89$  – температура наружной стенки конденсатора, К;

$t_4 = 357,48$  – температура внутренней стенки конденсатора, К;

$q = 2424$  – удельный тепловой поток,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена расчету и анализу энергоэффективной системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с использованием плоской тепловой трубы. Тепловые трубы являются пассивными устройствами, позволяющими существенно снизить потребление электроэнергии на работу систем охлаждения и терморегулирования аппаратуры, а в некоторых случаях обходится без потребления вообще, при этом повышая надежность системы в целом. ПТТ находят применение в медицине, криогенной технике, авиации, промышленной энергетике и многих других областях, поэтому результаты, полученные в данной работе, являются актуальными и их можно использовать применительно к другим областям.

В настоящей работе был показан краткий обзор ПТТ, и приведены условия, которые должны быть обеспечены для её нормального функционирования. Рассмотрен принцип действия плоской тепловой трубы и свойства, которыми она обладает. Описаны процессы, происходящие на всех её участках. Сделана оценка современного состояния ПТТ, отличия и сравнение с классическими тепловыми трубами.

Выявлено, что плоская тепловая труба является очень эффективным устройством теплоотвода, и данное направление является наиболее перспективным в современном мире.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПТТ — плоская тепловая труба;

$t_s$  — температура насыщения, К;

$t_1$  — температура наружной стенки испарителя, К;

$t_2$  — температура внутренней стенки испарителя, К;

$t_3$  — температура внутренней стенки конденсатора, К;

$t_4$  — температура наружной стенки конденсатора, К;

$q$  — удельный тепловой поток,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ ;

$\lambda_{\text{ст}}$  — коэффициент теплопроводности,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$\delta_{\text{ст}}$  — толщина стенки, м;

$F_{\text{ист}}$  — площадь поверхности испарителя, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{конд}}$  — площадь поверхности конденсатора, м<sup>2</sup>;

$F_{\text{вн.конд}}$  — площадь радиационного теплообмена, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{и}}$  — коэффициент теплоотдачи для испарительной зоны,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$\alpha_{\text{к}}$  — коэффициент теплоотдачи для конденсаторной зоны,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$Q$  — тепловая нагрузка, Вт;

$\eta$  — эффективность ребрения;

$\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ ;

$b$  — ширина конденсатора, м;

$d$  — внешняя сторона конденсатора, м;

$e$  — внешняя сторона конденсатора, м;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности аммиака при  $t_s$ ,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ;

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости, Па · с;

$\nu$  — коэффициент кинематической вязкости,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ ;

$\sigma_{\text{ж}}$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ;

$\rho$  — плотность аммиака,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$g$  — тепло конденсации пара при заданном давлении,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;

$a$  — длина испарителя, м;

$c$  — ширина конденсатора, м;

$t_2$  — температура внутренней стенки испарителя, К;

$t_3$  — температура наружной стенки конденсатора, К;

$t_4$  — температура внутренней стенки конденсатора, К;

$q$  — удельный тепловой поток,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. A. Nesterov, V A Derevyanko and S B Sunstov. Development of T-shaped flat heat pipes for cooling electronic equipment, 2021.
2. Maydanik, Y. Loop heat pipes. Applied Thermal Engineering, 25:635–657, 2005.
3. Soler, P. Experimentation et modelisation thermohydraulique des LHP. PhD thesis, Universit'e de Provence, 2009.
4. Heat Pipe Fluid – Envelope – Wick Compatibility [Электронный ресурс] // Thermal management technologies and solutions. URL: <https://www.1-act.com/fluidenvelopewickcompatibility/>
5. Novopashina N., Puring S. The use of energy saving technology as the basis for the state program implementation. В сборнике: MATEC Web of Conferences Сер. "International Science Conference SPbWOSCE-2016 "SMART City"" 2017. С. 06023.
6. Тепловые трубы: теория и практика / С. Чи; пер. с англ. В.Я. Сидорова. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
7. Шелгинский А.Я., Тепловые трубы в системах теплоснабжения и утилизации ВЭР: Учебное пособие/Под. ред. Л.Н. Говорухина. – М.: Издательство МЭИ, 2005.– с. 52
8. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: Учебник для вузов по спец. «Конструир. и произв. радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1984. 247 с., ил.
9. Лукс А.Л., Матвеев А.Г., Лукс А.А. Исследование тепловых труб и двухфазных термосифонов как перспективных базовых элементов систем теплоснабжения и вентиляции в ЖКХ и промышленности // Повышение энергоэффективности зданий и сооружений: межвузовский сборник научных трудов / СГАСУ. Самара, 2006. С. 111-119.
10. Лукс А.Л., Матвеев А.Г. Исследование высокоэффективных аммиачных тепловых труб энергосберегающих систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия. 2007. № 6(56). С. 401-418.

А.А. Воробьев<sup>1</sup>, Я.А. Кирюхин<sup>1</sup>, Е.М. Горячева<sup>1</sup>, М.В. Горелов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗДАНИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПИКОВЫХ РАСХОДОВ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Работа посвящена изучению теплоаккумулирующей способности здания для покрытия пиковых расходов теплоты в системе горячего водоснабжения. Представлены результаты анализа литературы, посвященной теплоаккумулирующей способности здания, расчета времени остывания помещений и экономия ТЭР за счет работы системы отопления в режиме недогрева, т.е. когда подача теплоты на отопление меньше тепловых потерь здания.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современный жилой многоквартирный дом (МКД) – это потребитель топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), основной вид потребляемого ТЭР – это теплота. Теплота в многоквартирном жилом доме расходуется на нужды отопления, горячего водоснабжения и вентиляции.

До недавнего времени в МКД системы приточной и вытяжной вентиляции с механическим побуждением были устроены только для нежилых помещений, которые располагались на этажах ниже уровня земли (подземные автостоянки) и в помещениях без конкретной технологии (БКТ) на первых этажах. Сегодня же все чаще встречаются МКД с системами приточной и вытяжной вентиляции для жилых помещений, т.е. квартир. Естественно подача приточного воздуха в помещения МКД в отопительный период года происходит после его подогрева в калорифере.

Система ГВС современного МКД работает с минимально возможным перерывом на профилактические работы. До 2011 года перерыв в подаче горячей воды в системе ГВС составлял 21 сутки, после 2011 года – 14 суток, на 2022 год перерыв в подаче сокращен до 10 суток, т.е. всего до 240 часов [1].

Система отопления МКД можно охарактеризовать как нагрузку, которая зависит только от продолжительности отопительного периода и средней температуры наружного воздуха за этот период. Однако необходимо отметить, что расчетные параметры наружного воздуха для проектирования системы отопления для части регионов, например г. Москвы, были изменены в меньшую сторону и представлены в новой редакции СНиП «Строительная климатология» [2].

Вышеизложенные факты о системах потребления теплоты в МКД позволяет сделать вывод о том, что

условия пребывания жителей в помещениях улучшились, а период комфортного пребывания увеличился. Все перечисленные факты говорят о том, что текущее потребление теплоты в МКД увеличилось.

В [3] представлена информация о структуре энергопотребления гражданина, населяющего жилой МКД. Эта структура представлена на рис. 1.

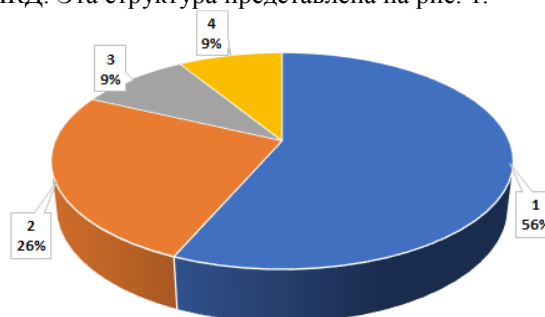


Рис. 1. Структура энергопотребления гражданина, населяющего жилой МКД (1 – теплота на отопление и вентиляцию, 2 – вода горячая, 3 – электроэнергия, 4 – газ).

Данные рис. 1. позволяют однозначно говорить о том, что энергосберегающие мероприятия целесообразно реализовывать в системах отопления, вентиляции и ГВС.

## 2. ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗДАНИЯ

### 2.1. Состав ограждающих конструкций МКД

Теплоаккумулирующая способность здания – способность накапливать теплоту внутри ограждающих конструкций, мебели и других объектов, находящихся внутри помещения, за счет процессов теплообмена. Количество теплоты и скорость накопления теплоты определяется в первую очередь плотностью и теплоёмкостью вещества.

Наружные ограждающие конструкции МКД в настоящее время возводятся многослойными, это объясняется требованиями тепловой защиты зданий. Большинство наружных ограждающих конструкций МКД состоят из основного материала (железобетон, газобетон, кирпич), теплоизоляционного слоя (минеральная вата, пенопласт, экструдированный пенополистирол), декоративной наружной облицовки (лицевой кирпич, мокрая штукатурка, вентилируемый

фасад). В некоторых случаях слой основного материала выполняет функции несущей конструкции. Материалы с большой плотностью (железобетон, кирпич, натуральный камень) способны аккумулировать большое количество теплоты, хотя и имеют высокие численные значения коэффициента теплопроводности. Теплоизоляционные материалы не способны аккумулировать большое количество теплоты, т.к. обладают малой плотностью. Однако теплоизоляционные материалы обладают низкими значениями коэффициента теплопроводности, что положительно сказывается на расходе теплоты на нужды отопления в режимах близких к стационарным.

Внутренние ограждающие конструкции МКД часто выполняют функции несущих стен и сооружаются из железобетона.

## 2.2. Коэффициент тепловой аккумуляции здания

Для оценки теплоаккумулирующей способности здания в [4] предложено использовать термин «коэффициент тепловой аккумуляции здания». Физический смысл данного термина – период времени, в течение которого при выключенном отоплении, разность между внутренней температурой в здании и наружной температурой изменяется в 2,72 раза.

Формула для расчета коэффициента тепловой аккумуляции:

$$\beta = \frac{F \cdot s \cdot \rho \cdot C_p}{2 \cdot q_0 V}, \quad (1)$$

где  $F$  – сплошная поверхность наружной стены (за исключением окон и дверей,  $m^2$ );  $s$  – толщина стены,  $m$ ;  $\rho$  – плотность материала стены,  $kg/m^3$ ;  $C_p$  – теплоемкость материала стены,  $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $q_0 V$  – тепловые потери здания за единицу времени при разности температур  $(t_b - t_n) = 1^\circ C$ .

Для каждого здания коэффициент аккумуляции теплоты  $\beta$  – это постоянная величина.

Коэффициент тепловой аккумуляции здания  $\beta$  тем больше, чем больше масса наружных ограждающих конструкций здания и их теплоемкость ( $F s \rho C_p$ ) и чем меньше тепловые потери ( $q_0 V$ ).

В [5] представлены результаты расчетов численных значений коэффициентов тепловой аккумуляции различных помещений МКД типовой серии П-44Т, также представлен анализ ранее возводимых типовых серий. В [6] представлены результаты экспериментального определения коэффициента тепловой аккумуляции здания библиотеки. Численные значения коэффициентов тепловой аккумуляции из [5, 6] представлены в таблице 1.

Анализ данных, представленных в таблице 1, позволяет сделать вывод о том, что коэффициент тепловой аккумуляции у современных зданий выше коэффициента тепловой аккумуляции зданий старых типовых серий, экспериментальное значение коэффициента тепловой аккумуляции выше теоретического значения. Расхождение

экспериментального и теоретического значений коэффициента тепловой аккумуляции объясняется наличием внутреннего наполнения помещений, которое также накапливает теплоту при отоплении помещений.

Для определения изменения внутренней температуры отапливаемого здания (помещения) за конечный период времени, при заданных расходах теплоты на отопление  $Q_0$ , с учетом аккумулирующей способности зданий можно использовать формулу [4]:

$$\int_0^z dz = \beta \int_{t_b^H}^{t_b^K} \frac{dt_b}{t_b - t_n - \frac{Q_0}{q_0 V}}, \quad (2)$$

где  $t_b^H$  и  $t_b^K$  – начальная и конечная внутренние температуры,  $^\circ C$ .

Интегрирование и последующие преобразования формулы (2) позволяет получить выражением для расчета температуры внутреннего воздуха после изменения количество подаваемой теплоты на отопление здания (помещения):

$$t_b = t_n + \frac{Q_0}{q_0 V} + \frac{t_b^H - t_n - \frac{Q_0}{q_0 V}}{e^{z/\beta}}, \quad (3)$$

На основании формулы (3), теплофизических свойств и геометрических характеристик здания (помещения) можно спрогнозировать изменение температуры внутреннего воздуха при снижении количества теплоты, подаваемой на отопление, или полного отключения системы отопления. Необходимо отметить, что данное значение является теоретическим, в действительности характер изменения температуры будет иной по причинам, обозначенным выше.

## 3. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ В МКД

Возможность использования теплоаккумулирующей способности здания для покрытия пиковых расходов теплоты в системах ГВС была апробирована еще в XX веке [7]. Однако схемные решения, которые были реализованы в то время, в современных МКД не используются. Результаты работы [7] были апробированы в ЦТП, в котором было реализовано зависимое подключение систем отопления через элеватор и двухступенчатое подключение ГВС.

В современных МКД системы ГВС подключаются по закрытым независимым схемам. Согласно п. 3.14 [8], присоединение водоподогревателей горячего водоснабжения в закрытых системах теплоснабжения выбирается в зависимости от соотношения максимального потока теплоты на горячее водоснабжение и максимального потока теплоты на отопление. При  $0,2 \leq \frac{Q_{ГВСmax}}{Q_{0max}} \geq 1$  применяется одноступенчатая схема, а при  $0,2 < \frac{Q_{ГВСmax}}{Q_{0max}} < 1$  – двухступенчатая схема.

Когда нагрузка на систему ГВС значительно превышает нагрузку на систему отопления, теплообменники системы ГВС подключают по одноступенчатой параллельной схеме, при которой

Таблица 1. Значения коэффициентов тепловой аккумуляции помещений различных зданий

№	Характеристика зданий	Помещения	Коэффициент аккумуляции $\beta, ч$	
1	Крупнопанельный дом серии 1-605 А	среднего этажа	угловое	46
			среднее	77
		верхнего этажа	угловое	42
			среднее	77
2	Крупнопанельный жилой дом серии К-7 (конструкции инженера Лагутенко)	среднего этажа	угловое	40
			среднее	51
		верхнего этажа	угловое	32
			среднее	51
3	Панельное здание П-44Т	среднего этажа	угловое	121
			среднее	148
		верхнего этажа	угловое	105
			среднее	130
4	Библиотека	теоретическое значение по зданию	63	
		экспериментальное значение по зданию	800	

водоподогреватели системы ГВС подключаются к тепловой сети параллельно системе отопления.

Постоянство температуры горячей воды достигается работой регуляторов температуры. Одноступенчатая параллельная схема ГВС представлена на рис. 2.

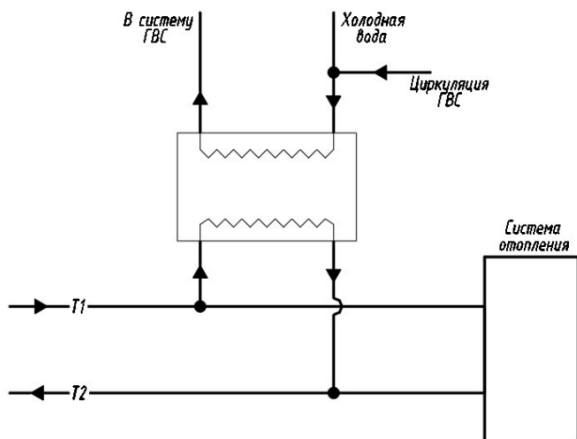


Рис. 2. Одноступенчатая параллельная схема ГВС.

В смешанной двухступенчатой схеме теплообменник ГВС первой ступени подключается последовательно с системой отопления на обратном трубопроводе тепловой сети. Теплообменник ГВС второй ступени присоединен к тепловой сети параллельно системе отопления. Вода после системы отопления смешивается с водой после теплообменника второй ступени и поступает в теплообменник ГВС первой ступени, где происходит предварительный подогрев водопроводной воды. Нагрев воды во второй ступени осуществляется сетевой водой. Такая схема способствует уменьшению тепловой нагрузки второй ступени и уменьшает общий расход сетевой воды на ГВС. Смешанная двухступенчатая схема представлена на рис. 3.

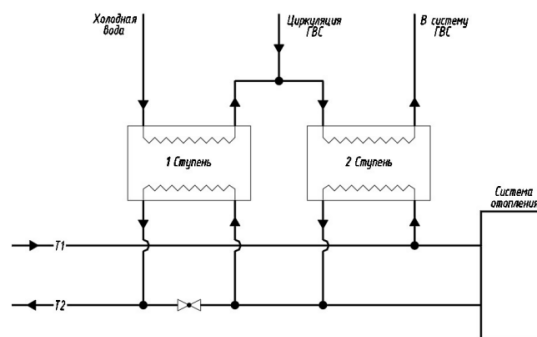


Рис. 3. Двухступенчатая смешанная схема ГВС.

В двухступенчатой последовательной схеме теплообменники ГВС каждой ступени подключаются последовательно с системой отопления: первая ступень присоединяется после системы отопления, вторая ступень – до системы отопления. Двухступенчатая последовательная схема представлена на рис. 4.

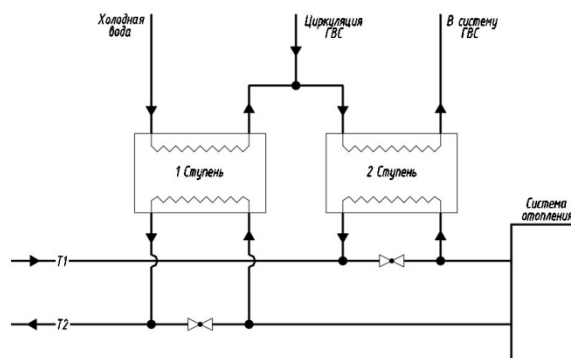


Рис. 4. Двухступенчатая последовательная схема ГВС.

#### 4. ПОКРЫТИЕ ПИКОВЫХ РАСХОДОВ ТЕПЛОТЫ СИСТЕМЫ ГВС

##### 4.1. Часы максимального потребления системы ГВС

Режим потребления горячей воды в системе ГВС имеет четко выраженный периодический характер. Пики потребления тепловой энергии приходятся с 7



до 9 часов утра и с 18 до 21 часа вечера. Эти промежутки времени соответствуют максимальному расходу тепловой энергии на горячее водоснабжение.

Современные тепловые пункты являются полностью автоматизированными, которые работают без участия человека, регулирование мощности систем теплоснабжения, параметров и количества теплоносителя осуществляется автоматически по заранее установленному алгоритму. Данный факт позволяет также легко реализовать отпуск теплоносителя в зависимости от ёмкости здания аккумулялировать внутри теплоту. Для каждого типа здания возможно определить теплоаккумулирующую способность и на основании расчета по формуле (3) определить допустимый недогрев здания, т.е. снизить потребление теплоты в системе отопления на время пиковых нагрузок в системе ГВС.

#### 4.2. Оценка возможной экономии энергии

Для оценки возможной экономии энергии при реализации мероприятия по регулированию подачи теплоты в систему отопления в пиковые часы потребления системы ГВС на основе теплоаккумулирующей способности необходимо знать: теплофизические свойства ограждающих конструкций, геометрические характеристики здания, расчетные параметры наружного и внутреннего воздуха, расчетные мощности систем отопления и ГВС.

В качестве объекта для определения возможной экономии энергии был выбран жилой дом типовой серии П-44Т. Расчет коэффициентов тепловой аккумуляции для различных помещений представлен в [5]. Результаты расчета представлены в таблице 1.

На основании формулы (3) были определены температуры внутреннего воздуха через три часа после изменения количества теплоты, подаваемого на отопление. Необходимо отметить, что при расчетах было принято допущение – мощность системы отопления равна расчетным тепловым потерям. Расчетные тепловые потери определялись как сумма трансмиссионных тепловых потерь и потерь за счет инфильтрации наружного воздуха.

На рис. 5 – 8 представлены изменения температур внутреннего воздуха в течение трех часов с момента начала режима недогрева помещений.

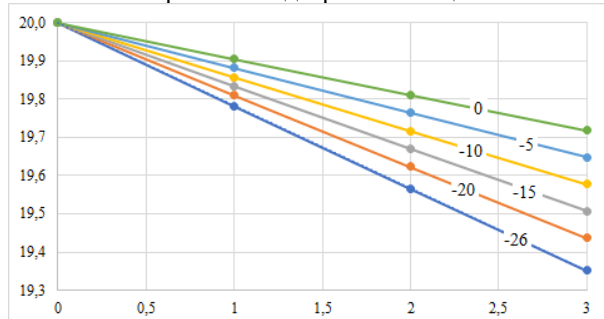


Рис. 5. Изменение температуры внутреннего воздуха при различных наружных температурах в угловом помещении верхнего этажа ( $\beta=105$  ч)

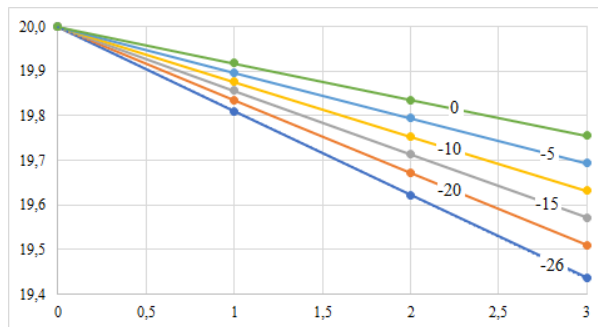


Рис. 6. Изменение температуры внутреннего воздуха при различных наружных температурах в угловом помещении среднего этажа ( $\beta=121$  ч)

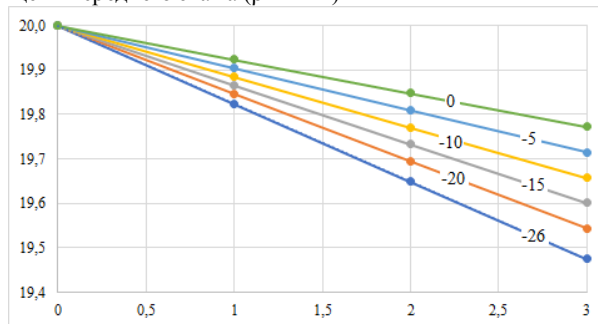


Рис. 7. Изменение температуры внутреннего воздуха при различных наружных температурах в рядовом помещении верхнего этажа ( $\beta=130$  ч)

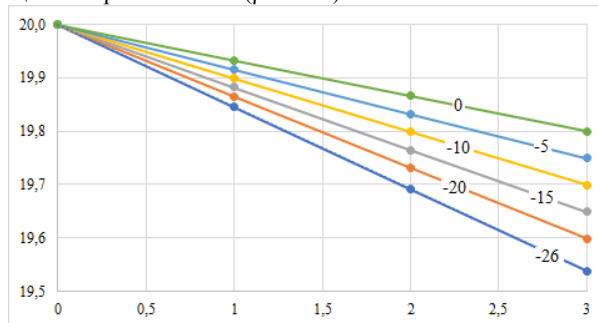


Рис. 8. Изменение температуры внутреннего воздуха при различных наружных температурах в рядовом помещении среднего этажа ( $\beta=148$  ч)

Как видно из рис. 5-8 наибольшее снижение температуры внутреннего воздуха наблюдается при расчетной температуре наружного воздуха в помещении с наименьшим коэффициентом тепловой аккумуляции. Однако даже при самых критичных условиях снижение температуры внутреннего воздуха не превышает  $0,7$  °C, т.е. температура внутри помещения составляет  $19,3$  °C.

Необходимо отметить, что в расчетах количество теплоты, подаваемой на отопление в задние, составляло 50 % от тепловых потерь.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности наружных ограждающих и несущих конструкции современных МКД позволяет накапливать значительное количество теплоты при отоплении здания. Кратковременное снижение подачи количества теплоты на отопление не приводит к резкому падению температуры внутреннего воздуха, условия пребывания жильцов остаются комфортными. Описанное условие позволяет снизить общее



потребление теплоты в здании в часы пиковых нагрузок систем ГВС без ущерба для здания и снижения условий пребывания человека в жилых помещениях.

Повсеместная автоматизация тепловых пунктов и распространение регулирования подачи теплоты в здание делает возможным реализовать указанное на практике на большинстве тепловых пунктов с любой схемой подключения теплообменников системы ГВС с минимальными изменениями.

Мероприятие по снижению общей тепловой нагрузки здания в пики потребления теплоты на нужды ГВС рекомендуется реализовывать уже на этапе проектирования тепловой энергоустановки.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$t_{в}$  – температура внутреннего воздуха помещения, °С;  
 $t_{н}$  – температура наружного воздуха, °С  
 $Q_{о}$  – количество теплоты, подводимый извне на отопление, Вт  
 $z$  – период времени, ч;  
 $Q_{ГВСmax}$  – максимальная мощность системы ГВС, Вт;  
 $Q_{отmax}$  – максимальная мощность системы отопления, Вт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **График отключения горячей воды в 2022 году в Москве.** [https://www.mos.ru/otvet-dom-i-dvor/grafik-](https://www.mos.ru/otvet-dom-i-dvor/grafik-otklucheniya-goryachei-vodi/?ysclid=15iq7onizq19028351)

[otklucheniya-goryachei-vodi/?ysclid=15iq7onizq19028351](https://www.mos.ru/otvet-dom-i-dvor/grafik-otklucheniya-goryachei-vodi/?ysclid=15iq7onizq19028351) – дата обращения 15.06.2022.

2. **СП 131.13330.2020** «СНиП 23-01-99\* Строительная климатология». М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2020. 146 с.
3. **Методическое пособие.** Методические рекомендации по расчету тепловых потребностей эксплуатируемых жилых зданий. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. 97 с.
4. **Соколов Е. Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – 9-е изд. стереот. / Е.Я. Соколов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 472 с.
5. **Горелов М.В.,** Горячева Е.М., Юркина М.Ю. Сравнение коэффициентов тепловой аккумуляции многоэтажных зданий// Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. - № 3. – с. 16 – 20.
6. **Горелов М. В.,** Гужов С. В., Горячева Е. М., Юркина М. Ю. Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения// Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. - № 4. – с. 11 – 15.
7. **Мирам А.О.** Расширение области использования теплоаккумулирующей способности здания для покрытия пиковых расходов теплоты в системах горячего водоснабжения. Автореферат кандидатск. диссертации. – Москва, 1983.
8. **СП 41-101-95.** Проектирование тепловых пунктов. – М., 2022. – 84 с.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКСИАЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ

### АННОТАЦИЯ

Изучено влияние аксиальной теплопроводности стенки на эффективность теплообменных аппаратов с параллельным движением теплоносителей для случаев, когда торцы стенки не являются теплоизолированными от окружающей их среды. Получено аналитическое решение задачи для прямого тока при равенстве отношения тепловых эквивалентов теплоносителей  $\beta$  отношению коэффициентов теплоотдачи с их сторон  $\alpha$  и для противотока при  $\beta = \alpha = 1$ . Показано, что при больших числах Био благодаря влиянию аксиальной теплопроводности стенки можно повысить эффективность использования одного из теплоносителей, при этом температура другого теплоносителя при его движении в теплообменном аппарате изменяется незначительно.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В [1] исследовано влияние аксиальной теплопроводности стенки на распределение температур по длине теплообменного аппарата с параллельным движением теплоносителей и на его эффективность. Задача решена на основе системы одномерных (осредненных по сечению) уравнений энергии для двух теплоносителей и уравнения теплопроводности для стенки. Торцы стенки полагались теплоизолированными. Для решения использовался метод конечных разностей. В некоторых случаях указанная система решена аналитическим путем. Найден параметр, определяющий влияние аксиальной теплопроводности стенки на эффективность теплообменника, и значение данного параметра, при котором этим влиянием можно пренебречь. Этот безразмерный параметр пропорционален коэффициенту теплопередачи, термическому сопротивлению стенки и квадрату отношения длины теплообменного аппарата к толщине стенки трубы. Кроме параметра, учитывающего влияние аксиальной теплопроводности, решение зависит от числа тепловых единиц переноса, отношений тепловых эквивалентов теплоносителей и коэффициентов теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей. Наиболее оптимальным для прямого тока движения теплоносителей является значение указанных двух отношений, равное единице. При этом эффективность теплообменного аппарата не изменяется по сравнению со случаем отсутствия влияния аксиальной теплопроводности стенки. Для противоточного теплообменника наименьшее влияние аксиальной теплопроводности, уменьшающей эффективность, достигается при равных значениях отношений тепловых эквивалентов теплоносителей и коэффициентов теплоотдачи со стороны каждого из теплоносителей. На основа-

нии проведенных расчетов сделаны оценки, которые показывают, что для микроканального теплообвода влияние аксиальной теплопроводности стенки может привести к заметному снижению его эффективности.

В данной работе рассматривается случай, когда на торцах стенки выполняются граничные условия третьего рода. При этом решение указанной выше системы уравнений зависит еще и от четырех режимных параметров – чисел Био на торцах стенки и безразмерных температур среды, окружающей торцы. Получено аналитическое решение задачи для прямого движения теплоносителей при условии равенства коэффициентов теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей  $\alpha = \alpha_1 / \alpha_2$  и отношения их тепловых эквивалентов  $\beta = W_1 / W_2$ :  $\alpha = \beta$ . Для противоточного движения решение получено для  $\alpha = \beta = 1$ .

В [1] проведен подробный обзор выполненных ранее исследований по рассматриваемой тематике. В дополнении к нему укажем еще несколько работ, выполненных применительно к теплообменным аппаратам, применяемым в криогенной технике. В [2 – 4] изучалось влияние аксиальной теплопроводности на эффективность противоточного теплообменного аппарата для так называемого сбалансированного течения ( $\beta = 1$ ). Торцы стенки, разделяющей теплоносители, в [2], [3] полагались теплоизолированными, а в [4] учтен отвод тепла от холодного торца. Во всех перечисленных работах, как и во многих других, где рассчитывается эффективность теплообменных аппаратов, моделью течения является плоскопараллельное течение в теплообменнике «труба в трубе». Такого типа теплообменные аппараты являются не только удобными для моделирования в приближении плоского течения, но также часто используются в химической промышленности, в криогенной технике, в охлаждающих микроканальных системах [5]. Внешняя стенка, обтекаемая горячим теплоносителем, не всегда может быть полностью теплоизолированной, и при расчете эффективности теплообменного аппарата необходимо учитывать возможный подвод тепла от внешней стенки, что сделано в [4]. В этой работе учитывается также и аксиальная теплопроводность, но только внешней стенки.

Известно, что эффективность теплообменного аппарата  $\mathcal{E}$  зависит от  $Ntu$  – числа тепловых единиц переноса. В [2 – 4] предложено при расчете  $\mathcal{E}$  в стан-

дартных зависимостях  $\varepsilon(Ntu)$  использовать величину  $Ntu_{eff}$ , в которую вносятся поправки на аксиальную теплопроводность стенок, а также на подвод тепла от внешней стенки. Авторы [6] модифицировали соотношения для  $Ntu_{eff}$  из [2], [3], в котором учли отличие значения параметра  $\beta$  от единицы, аксиальную теплопроводность внешней и внутренней стенки. Торцы стенок полагались теплоизолированными. В уравнение теплопроводности для внешней стенки введено отношение теплого потока от внутренней поверхности этой стенки, обтекаемой горячим теплоносителем, к тепловому потоку к внешней поверхности (от окружающей среды). Это отношение принято постоянным. Система уравнений, описывающая данную задачу, решалась также численным методом, сведения о котором авторы не привели. Утверждается, что зависимости  $Ntu_{eff}(Ntu)$ , предложенные в работе, практически совпадают с зависимостями, полученными на основе результатов численного решения.

В работе [7] рассмотрено плоскопараллельное противоточное движение теплоносителей, разделенных стенкой, в которой учитывается аксиальная теплопроводность. К горячему и холодному теплоносителю из окружающей среды подводятся тепловые потоки с заданными постоянными плотностями. Решалась система трех дифференциальных уравнений – осредненных по сечению канала уравнений энергии для двух теплоносителей и уравнения теплопроводности в стенке. Аналитическое решение этой системы проведено для трех случаев условий на торцах стенки: оба торца теплоизолированы; теплоизолирован только горячий торец, а температура холодного торца равна температуре холодного теплоносителя; температуры горячего и холодного торцов равны температурам горячего и холодного теплоносителя соответственно. Заметим, что неясно, как на практике можно удовлетворить условия в последнем случае. Задача решена также численно, методом конечных разностей. Результаты аналитического и численного решения практически совпадают. Изучено влияние режимных параметров на параметр, названный авторами относительными тепловыми потерями, обусловленными отличием значения эффективности от единицы и наличием теплового потока на холодном торце стенки. Значение этого параметра минимально при отсутствии влияния аксиальной теплопроводности стенки и при  $\beta < 1$ .

Авторы работы [8] рассмотрели влияние взаимодействия с окружающей средой на выходные характеристики теплообменного аппарата. Использовалась так называемая модель «черного ящика». Температуры на выходе из теплообменного аппарата рассчитываются по некоторым, полученным по результатам экспериментов, зависимостям от температур на входе и тепловых эквивалентов. Заметим, что указанные зависимости, хотя и имеют некото-

рое теоретическое обоснование, являются чисто эмпирическими и пригодны лишь для условий проведения экспериментов.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 2.1. Основные уравнения

Решаются системы осредненных по сечению канала уравнений энергии для двух теплоносителей и уравнения теплопроводности в стенке. Запишем эти уравнения в безразмерном виде.

$$\frac{dT_1}{dX} - Ntu \frac{1+\alpha}{1+\beta} (T_c - T_1) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dT_2}{dX} \mp Ntu \frac{\beta(1+\alpha)}{\alpha(1+\beta)} (T_c - T_2) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2T_c}{dX^2} + C_A(1+\alpha) \left[ (T_1 - T_c) + \frac{1}{\alpha}(T_2 - T_c) \right] = 0. \quad (3)$$

Здесь  $Ntu = \frac{kS(W_1 + W_2)}{W_1 \cdot W_2}$  – число тепловых единиц

переноса,  $k = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$  – коэффициент теплопере-

дачи,  $S = \Pi$  – поверхность теплообмена;  $\beta = W_1 / W_2$ ;  $\alpha = \alpha_1 / \alpha_2$ ;  $C_A = kL^2 R_c$ ,  $L = l / \delta$  – относительная длина трубы,  $R_c = \delta / \lambda_c$  – термическое сопротивление стенки.

В уравнении (2) верхний знак «-» соответствует прямооточному движению теплоносителей, нижний знак «+» – противоточному движению.

Граничные условия для уравнений (1) – (3) имеют следующий вид:

при  $X = 0$   $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 0$  – для прямотока; для противотока при  $X = 1$   $T_2 = 0$ ; при  $X = 0$

$$T_c = T_{\infty 0} + \frac{1}{Bi_0} \frac{dT_c}{dX}, \quad X = 1 \quad T_c = T_{\infty 0} - \frac{1}{Bi_1} \frac{dT_c}{dX}.$$

Поскольку безразмерная температура первого теплоносителя всегда выше температуры второго, условно будем называть первый теплоноситель горячим, а второй – холодным.

Решение задачи зависит от четырех безразмерных параметров:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $Ntu$ ,  $C_A$ . Последний параметр учитывает влияние аксиальной теплопроводности стенки на распределение температур по ходу движения теплоносителей и эффективность теплообменного аппарата:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_1}{\Delta t' \cdot W_{\min}}, \quad \varepsilon_2 = \frac{Q_2}{\Delta t' \cdot W_{\min}},$$

где  $Q_1 = W_1 |t_{10} - t_1''|$ ,  $Q_2 = W_2 |t_{20} - t_2''|$  – тепловые мощности, отдаваемая горячим теплоносителем и получаемая холодным теплоносителем соответственно,  $\Delta t' = |t_{10} - t_{20}|$  – разница температур теплоносителей на их входе в теплообменный аппарат,  $t_1''$  и  $t_2''$  – температуры теплоносителей на выходе.

Равенство  $Q_1 = Q_2$  осуществляется только если торцы стенок теплообменника теплоизолированы. В противном случае решение будет зависеть еще от четырех параметров – чисел Био и температур среды, окружающей торцы стенки.

Решив уравнения (1) – (3), получим величину эффективности теплообменного аппарата  $\varepsilon_1 = [1 - T_1(1)] \cdot \max\{1, \beta\}$ ,  $\varepsilon_2 = T_2(X_l) \cdot \max\{1, 1/\beta\}$ , где  $X_l = 1$  для прямотока,  $X_l = 0$  для противотока.

При  $C_A \rightarrow \infty$  влияние теплопроводности стенки пренебрежимо мало. Тогда система уравнений (1), (2) имеет известное решение, которое зависит только от параметров  $\beta$  и  $Ntu$ .

### 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

#### 3.1. Решение для прямотока.

Система уравнений (1) – (3) допускает аналитическое решение только в определенных случаях; для прямотока при  $\alpha = \beta$ . Получены следующие соотношения для температур горячего и холодного теплоносителей:

$$T_{1,2} = A_{1,2} \exp(\lambda_1 X) + B_{1,2} \exp(\lambda_2 X) + C_{1,2} X + D_{1,2}.$$

Здесь  $A_1 = -c_1 d_1 / 2$ ,  $A_2 = \alpha A_1$ ,  $B_1 = -c_2 d_2 / 2$ ,  $B_2 = \alpha B_1$ ,  $C_1 = C_0 / \alpha$ ,  $C_2 = -C_0$ ,  
 $D_1 = C_0 + (c_1 d_1 + c_2 d_2) / 2$ ,  
 $D_2 = C_0 + \alpha(c_1 d_1 + c_2 d_2) / 2$ ;  $C_0 = \alpha / (1 + \alpha)$ ,  
 $d_1 = d / \lambda_1$ ,  $d_2 = d / \lambda_2$ ,  $d = 2C_0 Ntu$ .

Температура стенки изменяется по следующей зависимости:

$$T_c = A_c \exp(\lambda_1 X) + B_c \exp(\lambda_2 X) + D_c,$$

где  $A_c = -c_1 C_0 (1 + d_1)$ ,  $B_c = -c_2 C_0 (1 + d_2)$ ,  
 $D_c = C_0 (1 + c_1 d_1 + c_2 d_2)$ .

Для констант  $c_1, c_2$  получены следующие выражения:

$$c_1 = (b_{11} b_{20} - b_{10} b_2) / b, c_2 = (-b_{11} b_{10} + b_{10} b_1) / b;$$

$$b_{10} = T_{\infty 0} / C_0 - 1, b_{11} = T_{\infty 0} / C_0 - 1,$$

$$b_{10} = 1 - (d + \lambda_1) / Bi_0, b_{20} = 1 - (d + \lambda_2) / Bi_0,$$

$$b_1 = [(d + \lambda_1) / Bi_1 + d_2 + 1] \exp \lambda_2,$$

$$b_2 = [(d + \lambda_2) / Bi_1 + d_2 + 1] \exp \lambda_2,$$

$$b = b_{20} b_1 - b_{21} b_2.$$

В предельном случае  $Bi_0 = Bi_1 \rightarrow 0$  (теплоизолированные торцы стенки)  $c_1 = c_2 = 0$ , что соответствует отсутствию влияния аксиальной теплопроводности стенки; распределение температур по длине и зависимость  $\varepsilon(Ntu, \beta)$  описывается известными формулами. Такой же вывод сделан в [1].

Из приведенных выше выражений следует, что равенство  $c_1 = c_2 = 0$  также выполняется при  $C_A \gg 1$ , т.е. влияние аксиальной теплопроводности стано-

вится пренебрежимо малым. Ее максимальное влияние наблюдается при  $C_A \ll 1$ , если числа Био конечны; для  $C_A \ll Ntu^2$   $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_2 = -Ntu$ . Однако, как показали результаты численного решения [1], когда  $\alpha \neq \beta$  при  $Bi_0 = Bi_1 \rightarrow 0$  эффективность теплообменного аппарата  $\varepsilon \rightarrow 0,5$  при  $Ntu \rightarrow \infty$  независимо от значений  $\beta$ .

#### 3.1. Решение для противотока.

Для противотока решение системы уравнений (1) – (3) можно провести для  $\alpha = \beta = 1$ . В результате получены следующие соотношения для температур горячего и холодного теплоносителей:

$$T_{1,2} = A_{1,2} \exp(\lambda X) + B_{1,2} \exp(-\lambda X) + C_{1,2} X + D_{1,2}.$$

Здесь  $A_1 = c_1 d_1$ ,  $A_2 = c_1 d_2$ ,  $B_1 = c_2 d_1$ ,  $B_2 = c_2 d_1$ ,  
 $C_1 = C_2 = -c_3 Ntu / 2 = C$ ,  
 $D_1 = 1 - A_1 - B_1$ ,  $D_2 = -[C + A_2 \exp(\lambda) + B_2 \exp(-\lambda)]$ ;  
 $d_1 = \frac{Ntu}{2\lambda} \left( \frac{Ntu}{\lambda} - 1 \right)$ ,  $d_2 = \frac{Ntu}{2\lambda} \left( \frac{Ntu}{\lambda} + 1 \right)$ ;  
 $c_3 = 2\{1 + c_1[d_1 \exp(\lambda) - d_2] +$   
 $+ c_2[d_2 \exp(-\lambda) - d_1]\} / (2 + Ntu)$ .

Температура стенки изменяется по следующей зависимости:

$$T_c = A_c \exp(\lambda X) + B_c \exp(-\lambda X) + C_c X + D_c,$$

где  $A_c = (A_1 + A_2 - c_1) / 2$ ,  $B_c = (B_1 + B_2 - c_2) / 2$ ,  
 $C_c = C_1 = C_2 = C$ ,  $D_c = (D_1 + D_2) / 2$ .

Константы  $c_1, c_2$  найдем, решая систему двух алгебраических уравнений, полученных из граничных условий на торцах стенки.

$$a_{11} c_1 + a_{12} c_2 = b_1, a_{21} c_1 + a_{22} c_2 = b_2.$$

Для коэффициентов этой системы получены следующие выражения:

$$a_{11} = -1 + g_1 d_1 + d_2 [1 - g_2 \exp(\lambda)] -$$

$$- \{\lambda g_0 + 2g_1 [d_2 \exp(\lambda) - d_1]\} / Bi_0,$$

$$a_{12} = -1 + g_1 d_2 + d_1 [1 - g_2 \exp(-\lambda)] +$$

$$+ \{\lambda g_0 - 2g_1 [d_1 \exp(-\lambda) - d_2]\} / Bi_0,$$

$$a_{21} = \exp(\lambda) (-1 + d_1 - g_1 d_2) - 2d_1 g_3 +$$

$$+ \{\lambda \exp(\lambda) g_0 + 2g_1 [d_2 \exp(\lambda) - d_1]\} / Bi_1,$$

$$a_{22} = \exp(-\lambda) (-1 + d_2 - g_1 d_1) - 2d_2 g_3 -$$

$$- \{\lambda \exp(-\lambda) g_0 - 2g_1 [d_1 \exp(-\lambda) - d_2]\} / Bi_1,$$

$$b_1 = 2(T_{\infty 0} - g_3) + 2g_1 / Bi_0,$$

$$b_2 = 2T_{\infty 1} - g_2 - 2g_1 / Bi_1.$$

Здесь  $g_0 = (Ntu / \lambda)^2 - 1$ ,  $g_1 = -Ntu / (2 + Ntu)$ ,  
 $g_2 = 2 / (2 + Ntu)$ ,  $g_3 = (1 + Ntu) / (2 + Ntu)$ .

Из приведенных выше выражений следует, что при  $C_A \gg 1$   $\lambda \rightarrow \infty$  и для любых чисел Био

$$A_1 = A_2 = A_c = B_1 = B_2 = B_c = 0, C = -Ntu / (2 + Ntu),$$

$$D_1 = 1, D_2 = -C, D_c = (1 + Ntu) / (2 + Ntu).$$

Влияние аксиальной теплопроводности стенки в этом случае пренебрежимо мало. В соответствии с имеющимися зависимостями, температуры линейно уменьшаются вдоль канала. Эффективность теплообменного аппарата  $\varepsilon \rightarrow 1$  при  $Ntu \rightarrow \infty$ .

Максимальное влияние аксиальной теплопроводности наблюдается при  $C_A \ll 1$ ,  $\lambda = Ntu$ . Из приведенных выше соотношений следует, что тогда  $A_1 = A_c = B_2 = B_c = 0$ ,  $A_2 = c_1$ ,  $B_1 = c_2$ ,  $C = -Ntu[1 + c_1 \exp(\lambda) - c_2] / (2 + Ntu)$ ,  $D_1 = 1 - c_2$ ,  $D_2 = -[C + c_1 \exp(\lambda)]$ . Если при этом положить  $Bi_0 = Bi_1 \rightarrow 0$ , то значения констант будут равны  $c_1 = -\exp(-\lambda) / 2$ ,  $c_2 = 0,5$ . Тогда получим  $C = 0$ ,  $D_c = 0,5$ , т.е. температура стенки не меняется вдоль канала  $T_c = 0,5$ . При больших  $Ntu$   $T_1(X=1) \rightarrow 0,5$ ,  $T_2(X=0) \rightarrow 0,5$ . Эффективность теплообменного аппарата  $\varepsilon \rightarrow 0,5$  при  $Ntu \rightarrow \infty$ , что соответствует результатам, полученным в [1].

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проведены для теплообменника, схема движения теплоносителей в котором показана на рис. 1. Полагается, что один из теплоносителей поступает в канал из входной камеры, а выходит – из выходной камеры. В этих камерах теплоноситель контактирует с торцами стенки.

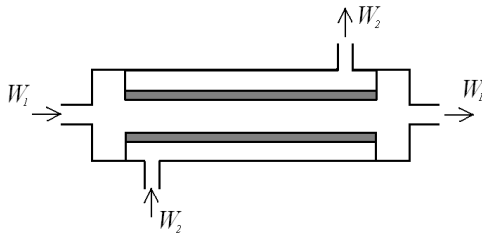


Рис. 1. Схема движения теплоносителей для прямого течения в случае I.

Таким образом, температуры окружающей торцы среды можно принять равными температурам на входе и выходе этого теплоносителя. Рассмотрены два случая: I –  $T_{\infty 0} = T_1(X=0) = 1$ ,  $T_{\infty 1} = T_1(X=1)$ ; II – для прямого течения  $T_{\infty 0} = T_2(X=0) = 0$ ,  $T_{\infty 1} = T_2(X=1)$ , для противотока  $T_{\infty 0} = T_2(X=0)$ ,  $T_{\infty 1} = T_2(X=1) = 0$ . В случае I температуры окружающей среды принимаются равными температурам на входе и выходе горячего теплоносителя, в случае II – холодного теплоносителя. Температуры теплоносителей на их выходе из теплообменника заранее неизвестны; их удобно вычислять итерационным путем. Расчеты проведены для  $Bi_0 = Bi_1 = Bi$ .

Расчеты показали, что наибольшее влияние аксиальной теплопроводности стенки на температурный режим и эффективность теплообменного аппарата наблюдается при больших числах Био. На рис. 2 – 4 приведены результаты расчета для прямого течения.

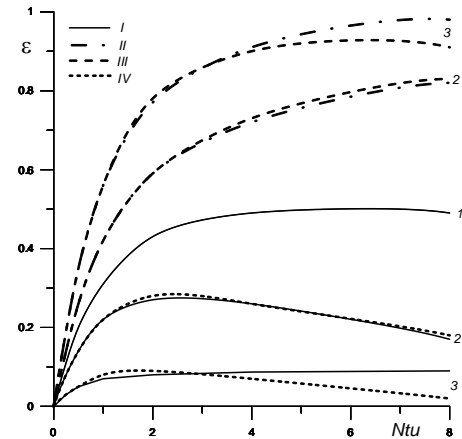


Рис. 2. Зависимость эффективности прямого теплообменника от числа тепловых единиц переноса для  $\beta = \alpha = 1$ ,  $C_A = 1$ . 1 –  $Bi = 0,01$ ; 2 –  $Bi = 1$ ; 3 –  $Bi = 100$ . I, II –  $\varepsilon_1$ ; III, IV –  $\varepsilon_2$ ; I, III – для случая I; II, IV – для случая II.

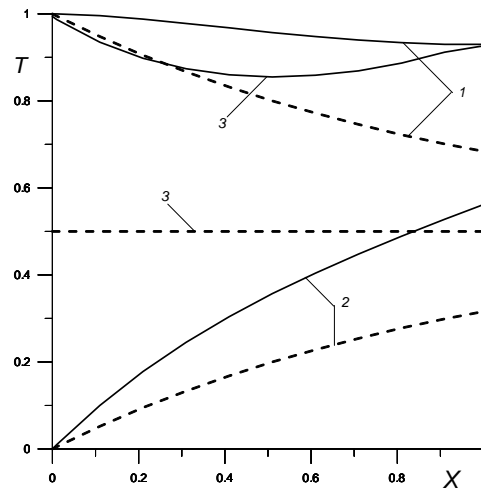


Рис. 3. Изменение температур вдоль канала прямого теплообменника для случая I;  $\beta = \alpha = 1$ ,  $C_A = 1$ ,  $Ntu = 1$ . 1 –  $T_1$ , 2 –  $T_2$ , 3 –  $T_c$ . Пунктирная линия – без влияния аксиальной теплопроводности стенки.

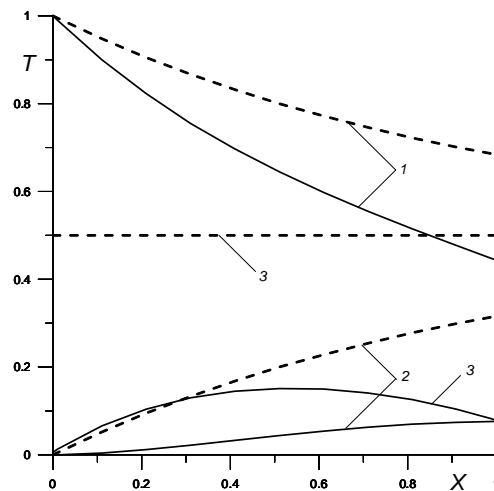


Рис. 4. Изменение температур вдоль канала прямого теплообменника для случая II. Обозначения см. на рис. 3.

На рис. 2 показано, что в случае *I* эффективность использования горячего теплоносителя  $\varepsilon_1$  значительно ниже  $\varepsilon_0$  – эффективности теплообменника при отсутствии влияния аксиальной теплопроводности стенки. Однако эффективность использования холодного теплоносителя  $\varepsilon_2$  при  $Bi = 100$  почти в два раза превышает  $\varepsilon_0$ . В случае *II* наблюдается обратный эффект. Распределение температур по длине канала показано на рис. 3. 4. В случае *I* практически не меняется по длине канала температура горячего теплоносителя, а в случае *II* – холодного теплоносителя. Установлено, что эффективность использования одного или другого теплоносителя возрастает с увеличением значения  $\beta$ . Результаты расчета для протокотока аналогичны описанным выше результатам.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем организации движения теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата можно значительно повысить эффективность использования одного или другого теплоносителя. Для этого требуется выполнение следующих условий. Во-первых, влияние аксиальной теплопроводности стенки должно быть значительным. Это вполне осуществимо для микроканальных теплообменников, как показали оценки, проведенные в [1]. Кроме того, для снижения значений параметра  $C_A$ , характеризующего влияние аксиальной теплопроводности, можно увеличить толщину стенки. Во-вторых, необходимо, чтобы число Био было достаточно велико, т.е. должен быть высоким коэффициент теплоотдачи с торцов стенки. Например, для микроканального теплообменника с параметрами  $\ell = 0,4$  м,  $\alpha = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $\lambda_c = 20$  Вт/(м · К),  $Bi = 100$ . Если целью использования теплообменного аппарата является охлаждение горячего теплоносителя, то во входную и выходную камеры должен поступать холодный теплоноситель. Горячий теплоноситель будет дополнительно охлаждаться за счет отвода тепла в окружающую среду от торцов стенки благодаря ее аксиальной теплопроводности. При этом температура холодного теплоносителя практически не изменится, и его можно будет использовать в дальнейших процессах охлаждения. Если целью является нагрев холодного теплоносителя, то во входную и выходную камеры должен поступать горячий теплоноситель; практически не изменится температура холодного теплоносителя. Тепловая энергия, необходимая для нагрева холодного теплоносителя, благодаря теплопроводности стенки поступает из окружающей торцы стенки среды.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Bi = \alpha \ell / \lambda_c$  – число Био,  
 $G$  – массовый расход,  
 $\ell$  – длина канала,  
 $c_p$  – изобарная теплоемкость,  
 $T_{1,2,c} = (t_{1,2,c} - t_{20}) / (t_{10} - t_{20})$  – безразмерная температура,  
 $T_\infty$  – температура окружающей среды,  
 $W = Gc_p$  – тепловой эквивалент,  
 $x$  – направление движения горячего теплоносителя,  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  
 $\delta$  – толщина стенки,  
 $\lambda_c$  – теплопроводность стенки,  
 $\Pi$  – периметр теплообмена.

## Индексы

0 – условия на входе или на горячем торце стенки,  
1 – для горячего теплоносителя или на холодном торце стенки,  
2 – для холодного теплоносителя,  
с – для стенки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валуева Е.П., Зюкин В.С.** Влияние теплопроводности вдоль оси канала на температурный режим и эффективность теплообменных аппаратов с параллельным движением теплоносителей // Теплоэнергетика. 2019. № 9. С. 60-70.
2. **Kroeger P.G.** Performance deterioration in high effectiveness heat exchangers due to axial heat conduction effects // Advances in Cryogenic Engineering. 1967. Vol. 12. P. 363 – 372.
3. **Venkatathnam G., Pradeep Narayanan S.** Performance of a counter flow heat exchanger with longitudinal heat conduction through the wall separating the fluid streams from the environment // Cryogenics. 1999. Vol. 39. P. 811 – 819.
4. **Pradeep Narayanan S., Venkatathnam G.** Performance of a counterflow heat exchanger with heat loss through the wall at the cold end // Cryogenics. 1999. Vol. 39. P. 43 – 52.
5. **Mathew B., Hegab H.** Application of effectiveness-NTU relationship to parallel flow microchannel heat exchangers subjected to external heat transfer // Int. J. of Thermal Sciences. 2010. V. 49. P. 76 – 85.
6. **Raju L.R., Nandi T.K.** Effective NTU of a counterflow heat exchanger with unbalanced flow and longitudinal heat conduction through fluid separating and outer walls // Applied Thermal Engineering. 2016. V. 16. P. 37 – 46.
7. **Aminuddin M., Zubair S.M.** Analytical solutions to counter-flow heat exchanger subjected to external heat flux and axial conduction // Int. J. of Refrigeration. 2017. V. 74. P. 22 – 37.
8. **Geczi G., Kicsiny R., Korzenszky P.** Modified effectiveness and linear regression based models for heat exchangers under heat gain/loss to the environment // Heat and Mass Transfer. 2019. V. 55. P. 1167 – 1179.

## ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

### АННОТАЦИЯ

Проведена классификация имеющихся методов решения задачи о фазовом переходе (задача Стефана). На основе аналитического автомодельного метода выполнены расчеты толщины слоя теплоизоляции стен из двух фазоизменяемых материалов (ФИМ), применяемых для снижения суточных колебаний температуры в помещениях. Найдена оптимальная толщина этого слоя, при которой наиболее эффективно используется теплота фазового перехода.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи о фазовом переходе (задачи Стефана) является важным для многих отраслей промышленности и техники, о чем свидетельствуют многочисленные научные работы, посвященные данной тематике. Укажем основные практические приложения, где используются результаты моделирования процессов, связанных с фазовым переходом.

- Искусственное замораживание грунтов для укрепления оснований сооружений, построенных на вечной мерзлоте и контроль состояния замороженных грунтов;
- искусственное замораживание грунтов при строительстве подземных туннелей;
- образование газовых гидратов, которые могут быть использованы для транспортировки газа;
- металлургия (интенсификация затвердевания отливок для предупреждения возникновения термических напряжений, приводящих к дефекту продукции);
- тепловые аккумуляторы энергии на основе фазоизменяемых материалов (ФИМ), применяемые в строительстве для снижения температурных колебаний в помещениях, в солнечной и ветровой энергетике, в системах тепловой защиты элементов электронной техники;
- химические технологии (сушка, кристаллизация, сублимация).

Кроме того, результаты моделирования процессов, связанных с фазовым переходом, используются в сельском хозяйстве (расчет поля температуры в почве при ее протаивании весной), в геологии (моделирование затвердевания изверженной лавы), в геофизике (решение задачи об образовании и толщине полярных льдов, которая впервые решена Стефаном в 1891 г.).

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приведем уравнения, описывающие простейшую задачу Стефана в одномерной постановке. Рассматриваются нестационарные уравнения теплопроводности для вещества, которое может находиться в одном из двух физических состояний – фазе 1 или фазе 2. Переход от фазы 1 к фазе 2 (или обратный переход) осуществляется, когда в некоторой точке  $x_s$  температура становится равной температуре фазового перехода  $T_s$ .

$$\frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} = a_{1,2} \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Начальные и граничные условия для определенности запишем при фазовом переходе 2 → 1. В случае обратного перехода приведенные ниже неравенства меняются на противоположные.

$$t = 0, 0 \leq x < \infty: T_2 = T_0 \geq T_s;$$

$$t > 0, x = 0: T_1 = T^0 \leq T_s.$$

Условие сопряжения в точке фазового перехода:

$$x = x_s: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = r \rho_2 \frac{dx_s}{dt}. \quad (2)$$

Опишем имеющиеся методы решения задачи о фазовом переходе.

**Автомодельный метод**, рассмотренный ниже, был использован Стефаном [1]; с этим методом можно ознакомиться в монографии [2]. Более общее решение задачи ранее, в 1860 г было представлено в лекциях Неймана (см. [3]). Заметим, что автомодельные решения имеются и для других условий при  $t > 0, x = 0$  (второго, третьего рода), а также для задач в цилиндрических и сферических координатах [4].

В отличие от аналитического автомодельного метода, все остальные методы являются численными. Метод «ловли фронта в узел сетки» предложен в работах известных советских математиков Ф.П. Васильева [5], Б.М. Будака [6]. Предполагается следить за изменением во времени положения точки, в которой температура становится равной температуре фазового перехода, т.е. выполняются условия сопряжения. С учетом этого условия записывается разностный аналог нестационарного уравнения теплопроводности. Применение данного метода затруднительно при решении двумерных и, особенно, трехмерных задач.



В других описанных ниже методах решается одно уравнение (для простоты записано в одномерном приближении)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

В этом уравнении физические свойства зависят от положения температуры относительно температуры фазового перехода.

Данные методы называют энтальпийными, поскольку для построения зависимости теплоемкости от температуры на границе (или в области) фазового перехода используется связь энтальпии и температуры  $dh = c_p dT$ .

**Метод сквозного счета (эффективной теплоемкости)** основан на построении на границе фазового перехода при  $T = T_s$   $S$ -подобной функции, учитывающее скачкообразное изменение энтальпии на величину  $r$ . Это может быть сделано разными способами; два из них почти одновременно в 1964 г. предложены Б.М. Будаком (см. [7]) и А.А. Самарским (см. [8]). Кроме того, если плотность и теплопроводность двух фаз сильно отличаются друг от друга, зависимость этих свойств от температуры в области фазового перехода аппроксимируется некоторыми сглаживающими функциями. Данный метод достаточно широко используется; в качестве примера приведем лишь несколько сравнительно недавних работ [9], [10].

**3-х зонный метод** основан на выделении между областями первой и второй фазы промежуточной зоны, в которой физические свойства вещества рассчитываются как свойства двухкомпонентной смеси, зависящей от концентраций ее компонентов (фаз 1, 2). Предполагается, что фазовый переход происходит не при одной фиксированной температуре, а в некотором интервале температур. Эффективная теплоемкость вычисляется по соотношению, учитывающему теплоту фазового перехода. Несмотря на то, что данный метод опирается, в основном, на эмпирические сведения об интервале температур фазового перехода и о зависимости концентрации фаз от температуры, он часто применяется в настоящее время. Например, в работе [11] исследована степень снижения амплитуды колебаний температуры внутренней поверхности стен помещений, вызванных суточными колебаниями температуры внешней поверхности, при использовании различных ФИМ с разными концентрациями в качестве присадки к материалу стены. Как отмечено в [12], применение ФИМ в строительстве может привести к существенному снижению потребления энергии и уменьшению негативного влияния промышленных предприятий на окружающую среду. Авторами [13], [14] рассмотрены процессы, протекающие при искусственном замораживании грунтов. Отмечено, что необходим постоянный контроль их состояния. Обеспечить такой контроль возможно путем использования результатов решения обратной задачи

Стефана. Заметим, что решению этой задачи посвящено, начиная с конца прошлого века (см., например [15]), достаточно много работ.

В заключение краткого обзора существующих методов решения задач с фазовым переходом следует отметить, что в настоящее время используются, в основном, два последних из описанных методов. Имеются примеры решения сложных задач – трехмерных, с участием трех компонентов, при наличии конвективного движения среды, при влиянии свободной конвекции, при движении в пористой среде.

Преимущество аналитического автомодельного метода состоит в том, что его применение позволяет достаточно легко оценить влияние входных параметров задачи на представляющие интерес выходные величины. Безусловно, эта оценка будет приближенной, но в дальнейшем ее можно уточнить, используя более точные методы. Заметим, что в [13] автомодельный метод применительно к задаче, записанной в цилиндрических координатах, используется для решения обратной задачи Стефана. Ее решение позволяет по температурам, измеренным в зависимости от времени на некотором расстоянии от центра колонны замороженного грунта, уточнить значения физических свойств фаз, в первую очередь теплопроводности. Таким образом, появляется возможность более точного моделирования процесса искусственного замораживания грунта.

### 3. АВТОМОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

Введем безразмерные температуры  $\vartheta = \frac{T_{1,2} - T^0}{T_s - T^0}$

и независимые автомодельные переменные

$$\eta_{1,2} = \frac{x}{2\sqrt{a_{1,2}t}}.$$

Последние связаны между собой соотношением

$$\eta_2 = \eta_1 \sqrt{a_1/a_2}. \quad (3)$$

Уравнения (1) примут следующий вид:

$$\frac{d^2 \vartheta_{1,2}}{d\eta_{1,2}^2} + 2\eta_{1,2} \frac{d\vartheta_{1,2}}{d\eta_{1,2}} = 0. \quad (4)$$

Для определенности положим, что фазовый переход осуществляется от фазы 2 к фазе 1. Тогда начальные и граничные условия для уравнения (3) записываются следующим образом:

$$\eta = 0 \quad (x = 0) \quad \vartheta_1 = 0, \quad \eta \rightarrow \infty \quad (t = 0) \quad \vartheta_2 = 1 + \Delta \vartheta_s;$$

$$\Delta \vartheta_s = (T_0 - T_s)/(T_s - T^0).$$

Параметр  $\Delta \vartheta_s$  учитывает отличие начальной температуры фазы 2 от температуры фазового перехода.

Решением уравнений (4) является интеграл ошибок, значения которого приведены в таблицах специальных функций

$$\text{erf}(\eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta \exp(-k^2) dk.$$

Для этого интеграла справедливы следующие соотношения, которые будут использованы для получения частного решения уравнений (4):

$$\operatorname{erf}(\infty) = 1, \quad \frac{d\operatorname{erf}}{d\eta} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-\kappa^2).$$

Общее решение уравнений (4) имеет следующий вид:

$$\mathcal{G}_{1,2} = c_1 + c_2 \operatorname{erf}(\eta_{1,2}).$$

Для  $\mathcal{G}_1$  из условия при  $\eta = 0$  константа  $c_1 = 0$ .

Пусть при некотором значении  $\eta_{s1}$  температура фазы 1 достигает температуры фазового перехода, т.е.  $\mathcal{G}_1 = 1$ . Тогда  $c_2 = 1/\operatorname{erf}(\eta_{s1})$ .

Значения констант для  $\mathcal{G}_2$  получим из условия при  $\eta \rightarrow \infty$  и равенства  $\mathcal{G}_2 = \mathcal{G}_1 = 1$  при  $\eta = \eta_{s2}$ :

$$c_1 = \frac{1 - \operatorname{erf}(\eta_{s2})(1 + \Delta\mathcal{G}_s)}{1 - \operatorname{erf}(\eta_{s2})}, \quad c_2 = \frac{\Delta\mathcal{G}_s}{1 - \operatorname{erf}(\eta_{s2})}.$$

В итоге для безразмерных температур получим  $\mathcal{G}_1 = \frac{\operatorname{erf}(\eta_1)}{\operatorname{erf}(\eta_{s1})}$ ,  $\mathcal{G}_2 = 1 + \frac{[\operatorname{erf}(\eta_2) - \operatorname{erf}(\eta_{s2})]\Delta\mathcal{G}_s}{1 - \operatorname{erf}(\eta_{s2})}$ .

Значения параметра  $\eta_{s1}$  найдем из условия сопряжения (2), используя связь (3)  $\eta_{s2}$  с  $\eta_{s1}$ .

Для  $\eta_{s1}$  получим уравнение

$$R\eta_{s1} = \frac{\exp(-\eta_{s1}^2) - \Delta\mathcal{G}_s \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \exp\left(-\eta_{s1}^2 \frac{a_1}{a_2}\right)}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\eta_{s1}) - \Delta\mathcal{G}_s \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \operatorname{erf}\left(\eta_{s1} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right)}. \quad (5)$$

Здесь  $R = \frac{ra_1\rho_2}{\lambda_1(T_s - T^0)}$  – безразмерный параметр,

от которого зависит решение задачи. Значение  $R$  при переходе от фазы 1 к фазе 2 из-за различий физических свойств фаз может несколько отличаться от значений при рассматриваемом переходе. Если  $\Delta\mathcal{G}_s \neq 0$ , решение зависит от  $\Delta\mathcal{G}_s$ , а также от параметров  $\lambda_1/\lambda_2$ ,  $a_1/a_2$ .

Уравнение (5) в общем случае можно решить имеющимися способами (например, методом бисекции или методом Ньютона). Однако, как показывают расчеты,  $\eta_{s1} < 1$ ; при  $\Delta\mathcal{G}_s = 0$  используя первые два члена разложения интеграла ошибок и экспоненты в ряд Тейлора, получим следующее выражение:

$$\eta_{s1} = 1/\sqrt{2(2R-1)}$$

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проведены для двух ФИМ, применяемых в строительстве: ФИМ-I – один из парафинов, ФИМ-II – соль фосфид калия. Каждый из этих материалов обладает некоторыми недостатками. ФИМ-I имеет относительно высокую стоимость, ФИМ-II может вызвать коррозию конструкций. Физические свойства ФИМ-I, ФИМ-II приведены в таблице.

	ФИМ I	ФИМ II	
Наименование свойства	Значение		Единицы измерения
Температура фазового перехода	25,2	18,5	°C
Удельная теплота фазового перехода	212	231	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Изобарная теплоемкость	2,10	1,83	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Плотность твердой фазы	890	1750	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Плотность жидкой фазы	734	1455	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Теплопроводность	0,21	0,60	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Температуропроводность твердой фазы	11,2	18,7	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
Температуропроводность жидкой фазы	13,6	22,5	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$

Из нее следует, что различаются только плотности материалов в жидком и твердом состоянии, поэтому будут разными температуропроводности фаз и значение параметра  $R$  при переходе от фазы 2 к фазе 1 и обратном переходе. Рассчитывалось изменение температуры в слое ФИМ в течение суток. Средние интегральные максимальная и минимальная суточные температуры выбраны из [11]:  $T_{\max} = 25,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $T_{\min} = 18,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\Delta\mathcal{G}_s = 0$ .

Результаты расчетов представлены на рис. 1 – 4.

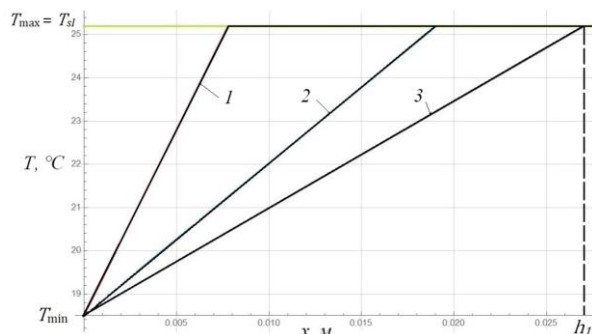


Рис. 1. Определение толщины слоя ФИМ-I при затвердевании. 1 –  $t = 1$  час, 2 –  $t = 6$  часов, 3 –  $t = 12$  часов.

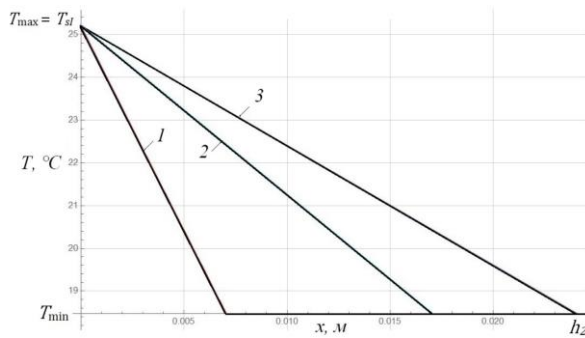


Рис. 2. Определение толщины слоя ФИМ-I при плавлении. 1 –  $t = 1$  час, 2 –  $t = 6$  часов, 3 –  $t = 12$  часов.

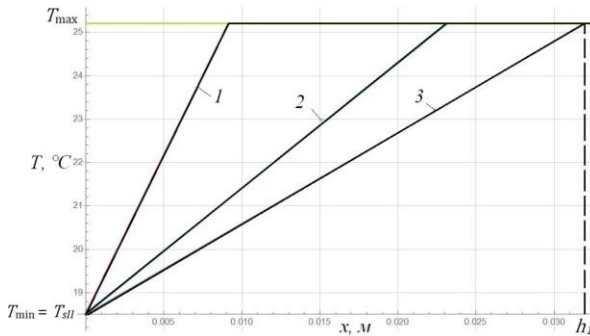


Рис. 3. Определение толщины слоя ФИМ – II при затвердевании. 1 –  $t = 1$  час, 2 –  $t = 6$  часов, 3 –  $t = 12$  часов.

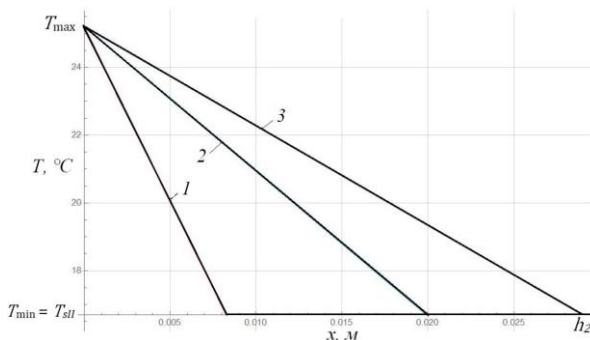


Рис. 4. Определение толщины слоя ФИМ – II при плавлении. 1 –  $t = 1$  час, 2 –  $t = 6$  часов, 3 –  $t = 12$  часов.

Изменение температуры по толщине слоя фим благодаря малым значениям  $\eta_{s1}$ ,  $\eta_{s2}$  является практически линейным с изломом в точке фазового перехода; наклон линий на рисунках обратно пропорционален  $\sqrt{R}$ . На рис. 1 показано изменение температуры при затвердевании парафина в течение половины суток; значение параметра  $R = 13,1$ ;  $\eta_{s1} = 0,192$ ;  $\eta_{s2} = 0,179$ . В начальный момент времени  $T_0 = T_{sl}$ . За половину суток температура меняется от  $T^0 = T_{min}$  до  $T_{sl}$  на толщине слоя ФИМ  $h = h_1 = 27$  мм. Второй конец слоя теплоизолирован, поэтому, как отмечено выше, за короткое время распределение температуры по толщине слоя становится равномерным:  $T = T_{min}$ . Это значение температуры является начальным для обратного процесса – плавления, результаты расчета которого представлены на рис. 2. В этом случае  $R = 19,3$ ;  $\eta_{s1} = 0,157$ ;

$\eta_{s2} = 0,172$ . За половину суток температура меняется от  $T^0 = T_{sl}$  до  $T_{min}$  на толщине слоя ФИМ  $h = h_2 = 24$  мм, причем в течение короткого времени устанавливается равномерное распределение температуры по толщине слоя  $T = T_{sl}$ ; эта температура является начальной для процесса затвердевания. Поскольку значение параметра  $R$  для плавления выше, чем для затвердевания,  $h_2 < h_1$ . Оптимальное значение толщины слоя ФИМ можно выбрать равным  $h_{opt} = (h_1 + h_2) / 2 = 25,5$  мм.

Аналогичным образом протекают процессы затвердевания и плавления ФИМ-II, результаты расчета которых показаны на рис. 3, 4. Укажем параметры этих процессов. Для затвердевания  $T_0 = T_{max}$ ,  $T^0 = T_{sl}$ ,  $R = 15,7$ ,  $\eta_{s1} = 0,177$ ,  $\eta_{s2} = 0,161$ ,  $h_1 = 32$  мм; для плавления  $T_0 = T_{sl}$ ,  $T^0 = T_{max}$ ,  $R = 22,7$ ,  $\eta_{s1} = 0,145$ ,  $\eta_{s2} = 0,159$ ,  $h_2 = 29$  мм,  $h_{opt} = (h_1 + h_2) / 2 = 30,5$  мм.

Поскольку  $h_{1,2} \sim \sqrt{a/R}$ , а  $R \sim r/c_p$ , величина  $h_{opt}$  приблизительно пропорциональна параметру  $\sqrt{ac_p/r}$ . Значение этого параметра для ФИМ-II выше, чем ФИМ-I, поэтому полученное в расчетах значение  $h_{opt}$  для ФИМ-II несколько выше, чем для ФИМ-I. Отсюда следует вывод, что большая степень теплоизоляции стен помещений может быть достигнута при использовании парафинов.

Следует отметить, что полученные значения оптимальных толщин изоляции являются достаточно малыми, что обусловлено принятой в расчетах сравнительно небольшой разницей максимальной и минимальной температур наружной поверхности стен помещений. Кроме того, на практике ФИМ используется не в чистом виде, а в качестве добавки в композитном материале теплоизолирующих панелей стен [11]. В расчетах, проведенных в [11], толщина слоя композитного материала выбрана на порядок выше.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены расчеты изменения температуры по толщине слоя ФИМ в зависимости от времени в течение суток. Применен аналитический автоматизированный метод. Выбраны два часто используемых в строительстве материала: ФИМ-I – парафин, ФИМ-II – соль фосфид калия.

Для ФИМ-I температура фазового перехода равна максимальной температуре наружной поверхности стены помещения, для ФИМ-II – минимальной температуре.

Найдены оптимальные значения слоя ФИМ, при которых за половину суток заканчиваются процессы фазового перехода (затвердевания и плавления).

Для ФИМ-I это значение ниже, чем для ФИМ-II, поэтому выбор парафинов в качестве ФИМ для повышения качества теплоизоляции может оказаться экономически более выгодным по сравнению с другими материалами.

Для веществ, обладающих, сравнительно низкими теплоемкостью и температуропроводностью, и большой теплотой фазового перехода, использование этой теплоты является наиболее эффективным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stefan J.** Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung in Polarmeere // Ann. Phys. u. Chem. 1891. P. 269–286.
2. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики // М.: Изд-во МГУ. 1999. С. 259-264.
3. **Франк Ф., Мизес Р.** Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики // ОНТИ. 1937.
4. **Карслоу Г., Егер Д.** Теплопроводность твердых тел // М.: Наука. 1964. С. 488.
5. **Васильев Ф.П.** Разностный метод решения задачи типа Стефана для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами // ДАН СССР. 1964. Т.157. № 3. С. 1280–1283.
6. **Будак Б.М., Васильев Ф.П., Успенский А.Б.** Разностные методы решения некоторых краевых задач типа Стефана // Численные методы в газовой динамике. М.: Изд-во МГУ, 1964. Вып. IV. С. 139-183.
7. **Будак Б.М., Соловьёва Е.Н., Успенский А.Б.** Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана // Журнал вычислительная математика и математической физики. 1965. Т. 5. № 5. С. 828–840.
8. **Самарский А.А.**, Теория разностных схем // М.: Изд-во «Наука», 1977. 657 с.
9. **Panteleev I. et al.** Intellectual monitoring of artificial ground freezing in the fluid saturated rock mass // Proc. 2nd Int. Conf. on Integrity, 2017. P. 492-499.
10. **Васильев Е.Н., Дервянко В.А.** Динамика фазовых превращений в тепловом аккумуляторе системы терморегулирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Теплофизика и аэромеханика. 2018. № 3. С. 481-488.
11. **Sharifi N.P., Shaikh A.A.N., Sakulich A.R.** Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals // Energy Build. 2017. P. 455–467.
12. **Григорьев И.С., Дедов А.В., Елецкий А.В.** Фазоизменяемые материалы и энергетика // Теплоэнергетика. 2021. № 4. С. 3-17.
13. **Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В.** Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // Инженерно-физический журнал. 2018. № 3. С. 655-663.
14. **Семин М.А., Зайцев А.В., Левин Л.Ю.** Численное решение обратной задачи Стефана при анализе искусственного замораживания породного массива // Математическое моделирование, 2021 год. Т. 33. № 2. С. 93-108.
15. **Voller V. R.**, Enthalpy method for inverse Stefan problems // Numer: Heat Transf. Part B: Fundamentals, 1992. V. 21. № 1. P. 41–55.

*О.Д. Матухнова, Д.А. Ефимов, А.Б. Гаряев*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ОРОШЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе проведен анализ влияния давления, создаваемого пароструйным эжектором в оросительной камере пароконпрессионной опреснительной установки на площадь поверхности теплообмена. Также рассмотрен вопрос о проблеме отложений солей жесткости на ее теплообменной поверхности. Проведен тепловой расчет оросительной камеры и выявлены зависимости расчетных значений площади поверхности теплообмена оросительной камеры от режимных параметров.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время часть систем жизнеобеспечения, поддерживающих и обеспечивающих рост населения, испытывают серьезные проблемы с обеспечением водой питьевого качества. Причиной увеличения мирового спроса на воду помимо роста населения является повышение уровня жизни, увеличение площадей сельского хозяйства и неэффективность использования воды. Недостаточное водоснабжение также может быть вызвано изменением климата, в том числе засухами и наводнениями, вырубкой лесов, повышенным загрязнением воды. Земная поверхность на 70% покрыта водой, однако эта вода содержится в морях и океанах и не пригодна для питья и производства из-за содержания в ней солей.

Для решения глобальной проблемы нехватки водных ресурсов перед человеком стала задача о необходимости разработки и распространения автономных технологий опреснения морской воды для населенных пунктов, не имеющих доступа к централизованному энерго-, тепло- и водоснабжению. Вышеуказанный процесс должен быть реализован в рамках одной установки для упрощения и экономичности.

Получение пресной воды является энергозатратным процессом, который может использовать как электрическую, так и тепловую энергию. В целях достижения наибольшей эффективности работы системы и оптимизации потребления топливных ресурсов, целесообразно совместить выработку электроэнергии и производство пресной воды. Реальным путем повышения эффективности энергетического производства является развитие локальных автономных источников комбинированного производства электроэнергии и тепловой энергии на базе газопоршневых установок. При использовании газопоршневых установок за счёт преобразования

тепловой энергии уходящих газов, остаточная теплота может использоваться для получения пресной воды.

### **2. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ**

Существует несколько вариантов когенерационных установок на основе газопоршневого агрегата.

На сегодняшний день наиболее распространённым методом получения пресной воды является обратный осмос. При этом, часть стран с большим количеством энергоресурсов, например, ОАЭ, питьевую воду получают путем термической дистилляции.

Метод обратного осмоса является главным конкурентом метода термической дистилляции и требует большей предварительной обработки морской воды и большего обслуживания, а также энергии в виде работы насоса, в отличие от более дешевого низкопотенциального отработанного тепла [1].

Один из методов термической дистилляции заключается в использовании пароконпрессионной установки. Он подразумевает подвод тепловой энергии для подогрева морской воды и электрической энергии для работы компрессора. Паровой эжектор способен заменить компрессор минимизировав потребление электричества и одновременно увеличив КПД установки, используя больше низкопотенциальной энергии дымовых газов.

Основным элементом установки выступает газопоршневой агрегат. На него подается природный газ и воздух для его сжигания. Дымовые газы полученные в процессе горения уходят в котел утилизатор для подогрева пара перед пароконпрессионной установкой. Вода из бака аккумулятора поступает в котел утилизатор, где нагревается и превращается в пар. Водяной пар после котла утилизатора, проходя через эжектор, поступает в пароконпрессионную установку, где конденсируется в небольших трубках, на выходе конденсат возвращается в бак аккумулятор. Морская вода выкачивается из моря и используется для охлаждения газопоршневого агрегата, в процессе она нагревается до температуры кипения при пониженном давлении и распыливается на трубы в опреснителе пароконпрессионной установки (рис. 1), в котором поддерживается пониженное давление с помощью эжектора. Морская вода, попадая на трубы, начинает испаряться, одновременно конденсируя пар внутри труб. Полученный пар высасывается эжектором, смешивается с паром,

использующимся для выпаривания, и паровая смесь возвращается в установки в качестве греющего пара, после конденсируется и поступает в бак аккумулятора. Неиспарившаяся морская вода по трубам стекает вниз. Соляной раствор внизу установки выкачивается насосом обратно в море, однако более целесообразным будет решение использовать его для получения дополнительного количества пресной воды и соли путем повторного выпаривания.

Важной частью разработки схемы парокompрессионной дистилляционной установки является подбор пароструйного эжектора, который поддерживает пониженное давление для снижения температуры парообразования. В расчете принято, что эжектор поддерживает давление в 0,1 атм., а на вход подается пар с параметрами 6 атм. На выходе смесь будет иметь давление 1,5 атм. [2]

### 3. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ОРОШЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ НА ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

Снижение давления в оросительной камере приводит к увеличению разности температур пара и морской воды. Помимо этого, изменение температуры приведет к изменению физических свойств теплоносителя, что может сказаться на процессе теплообмена как в лучшую, так и в худшую сторону. В первую очередь это связано с изменениями плотности паровой фазы.

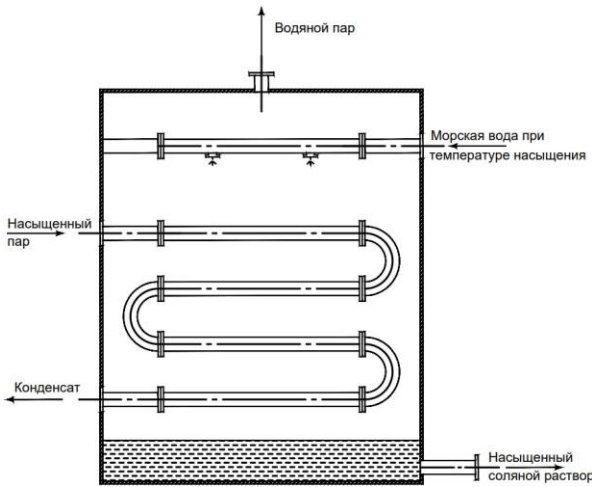


Рис. 1. Упрощенная схема оросительной камеры для выпаривания морской соли

Расчет теплоотдачи орошаемой поверхности выполнен по результатам анализов экспериментальных исследований процесса теплообмена на пакете горизонтальных труб. Зависимость (2) удовлетворительно описывает результаты опытов по теплообмену при кипении различных жидкостей в условиях свободной конвекции на стенках из различных материалов и различной шероховатости [3].

$$Nu = \frac{a_2}{\lambda_{2w}} \cdot \left( \frac{v_{2w}^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$Nu = 0,01 \cdot Re_*^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot Kt \cdot \left( \frac{\lambda_{2w} \cdot C_{2w} \cdot \rho_{2w}}{\lambda_c \cdot C_c \cdot \rho_c} \right)^{-0,2} \cdot \overline{Rz}^{0,2} \quad (2)$$

В исследованиях процесса теплообмена при кипении в пленке принято различать два числа Рейнольдса: одно из которых определяется по средней скорости пленки  $Re_{2qp}$ , а другое по скорости парообразования  $Re_{2ww}$ . При малых значениях плотности теплового потока  $q$ , процессы испарения и начальной стадии кипения, теплообмен в основном определяется плотностью орошения, т.е. числом  $Re_{2qp}$ . При развитом кипении интенсивность теплообмена в основном зависит от скорости парообразования, то есть от  $Re_{2ww}$ .

$$Re_{2ww} = \frac{q \cdot l_{\sigma}}{r_2 \cdot \rho_{2p} \cdot v_{2p}} \quad (3)$$

$$Re_{2qp} = \frac{\Gamma}{2 \cdot \mu_{2w}} \quad (4)$$

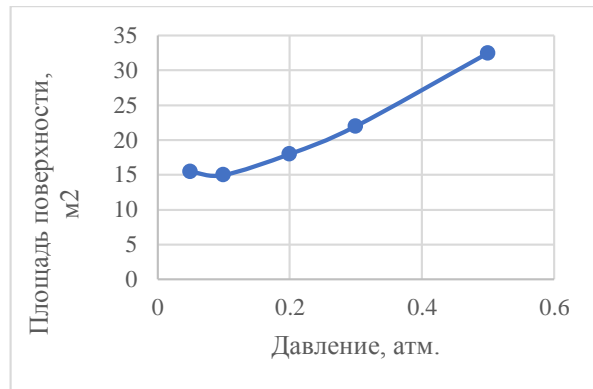


Рис. 2. Зависимость площади поверхности теплообмена от давления в камере орошения

Результаты расчета зависимости площади поверхности теплообмена от давления в камере орошения представлены на рис 2. Согласно расчетам, оптимальным давлением внутри теплообменного аппарата является 0,1 атм., при котором достигается минимальная расчетная площадь поверхности теплообмена.

Основным фактором, влияющим на теплообмен и, следовательно, на расчетную величину площади теплообменного аппарата являются отложения соли на стенках труб. В процессе выпаривания воды, раствор соли становится более концентрированным и происходит процесс осаждения солей на стенках опреснителя в виде накипи, состоящей, из хлоридов и карбонатов кальция и магния ( $CaCO_3$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCO_3$ ,  $MgCl_2$ ), что способствует ухудшению коэффициента теплопередачи через стенку и приводит к разрушению труб в процессе коррозии. Образование отложений, приводящее к увеличению коэффициента термического сопротивления, способно ухудшить коэффициент теплопередачи в несколько раз. Помимо этого, процесс теплообмена будет ухудшаться косвенно, так как отложения соли будут менять геометрию труб, тем самым создавая пустые пятна и еще сильнее ухудшая теплопроводящие



свойства. В целях обеспечения требуемых параметров производительности установки следует учесть сопротивление возможного образования отложений соли на внутренних поверхностях оборудования на этапе конструирования.

Исходя из таблицы термических сопротивлений загрязнений 3.44 [4], термическое сопротивление отложений соли морской воды на стенках труб принимают равным  $R_0 = 0,00018$ .

Стоит заметить, что данные возможно применять в случае нахождения трубы в среде, а не взаимодействии с ней.

Цель оросительного теплообменника состоит в испарении части морской воды, что повышает концентрацию соли в оставшемся растворе. Поэтому стоит принимать вдвое большее значение термического сопротивления морской воды.

Коэффициент теплопередачи будет состоять из теплоотдачи внутреннего теплоносителя (насыщенного пара) к внутренней части трубы, термического сопротивления трубы, термического сопротивления загрязнений (отложений соли) и коэффициента теплоотдачи от внешней стенки ко второму теплоносителю (морская вода):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_c} + \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{d_1}{a_2 \cdot d_2} + R_0} \quad (5)$$

Зависимость коэффициента теплопередачи от термического сопротивления загрязнения представлена на рис.2.

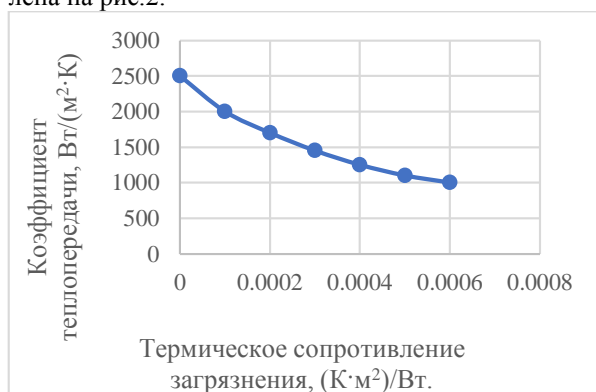


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от термического сопротивления загрязнения

Отложение солей приводит к существенному уменьшению коэффициента теплопередачи и росту необходимой площади поверхности теплообмена для осуществления процесса (рис.4.). Таким образом требуется периодическая очистка теплообменной поверхности и разработка мер по уменьшению отложений.

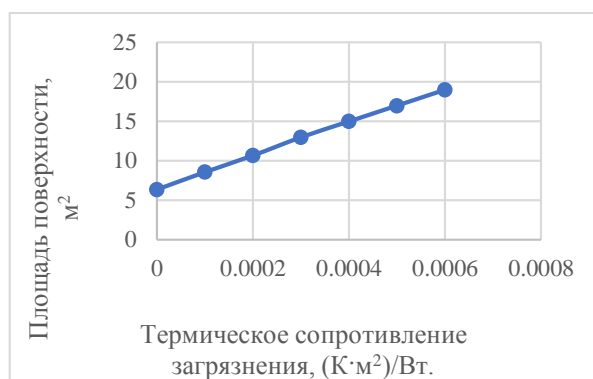


Рис. 4. Зависимость площади поверхности теплообмена от термического сопротивления загрязнения

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа получены зависимости влияния режимных параметров на габаритные размеры оросительной камеры парокомпрессионной опреснительной установки.

Согласно расчетам, оптимальным давлением внутри теплообменного аппарата является 0,1 атм., при котором достигается минимальная расчетная площадь поверхности теплообмена.

Отложение солей приводит к существенному уменьшению коэффициента теплопередачи и требует периодической очистки теплообменной поверхности.

Полученные результаты исследования можно использовать при конструировании когенерационных опреснительных установок в целях совершенствования их теплотехнических характеристик.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преимущества и недостатки промышленных способов очистки воды. [https://vagner-ural.ru/o\\_kompanii/stati-po-vodochistke/opresnitel-morskoy-vody-preimuschestva-i-nedostatki/](https://vagner-ural.ru/o_kompanii/stati-po-vodochistke/opresnitel-morskoy-vody-preimuschestva-i-nedostatki/). Дата последнего обращения: 02.04.2022
2. В.А. Коновалова Анализ и сравнение различных методов расчета эжекторов / В.А. Коновалова, А.Е. Кишалов - Уфимский государственный авиационный технический университет
3. Гогонин, И. И. Теплообмен при испарении и кипении пленки, орошающей пакет горизонтальных труб / Гогонин, И. И. - Теоретические основы химической технологии том 48 № 1 2014/
4. Justin K. Mechell, Bruce Lesikar, Desalination Methods for Producing Drinking Water / E-249 04-10
5. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017);
6. Абдуллин Ю.Р., Габдрахимов А.Т., Смородова О.В. Влияние загрязнения поверхностей теплообмена на работу аппаратов // «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки». 2018. № 8.



Г.П. Власенко<sup>1</sup>, А.В. Антипов<sup>1</sup>, М.О Морозов<sup>1</sup>, М.А. Балакин<sup>1</sup>, К.О. Плешков<sup>1</sup>,  
А.Р. Аляутдинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТНУ

### АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен изучению процесса сублимационной сушки при атмосферном давлении (АСС). Предложен способ модернизации существующей установки на кафедре ТМПУ НИУ «МЭИ» путём использования теплоты сбива перегрева и конденсации для подогрева воздуха, с дальнейшей подачей его в сублимационный бункер и камеру досушки. Выполнен численный эксперимент и исследована зависимость времени сушки от толщины высушиваемого продукта.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы расширяется сфера использования сублимационной сушки и возрастает популярность этого метода консервирования, который имеет и положительные, и отрицательные стороны. К достоинствам относится высокое качество получаемых продуктов, которые по своим питательным и вкусовым свойствам сопоставимы только с натуральными свежемороженными. Сюда же следует отнести и возможность длительного хранения. Недостатками такого способа сушки считаются высокая стоимость сублимационного обезвоживания и недостаточная изученность процесса сублимационной сушки при атмосферном давлении [1].

### 2. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА АТМОСФЕРНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ

#### 2.1. Способ сублимационной сушки при атмосферном давлении

Сублимационную сушку можно осуществлять без вакуума при атмосферном давлении. Под действием регулируемого теплоподвода начинается сублимация льда с поверхности продукта. Отрывающиеся от кристаллов частицы влаги в виде пара диффундируют сквозь воздушную среду, направляясь к конденсатору, где осаждаются в виде твердой фазы (льда). В отличие от вакуумной сушки эти частицы проходят сквозь слой холодного воздуха и охлаждаются. Окончание процесса при АСС определяется методом отбора проб. Процесс сублимации считается законченным после удаления всей вымо-

роженной влаги. Остаточная влажность исследуемых объектов при этом составляет 15–20%. Для достижения заданной конечной влажности (5%) производится досушивание продуктов при положительных температурах в сушильном шкафу.

Способ АСС включает сортировку и предварительную обработку сырья, замораживание, удаление влаги методом сублимации, холодную и тепловую досушку сырья, фасование и упаковывание. Используемая схема технологического процесса АСС представлена на рисунке 1.

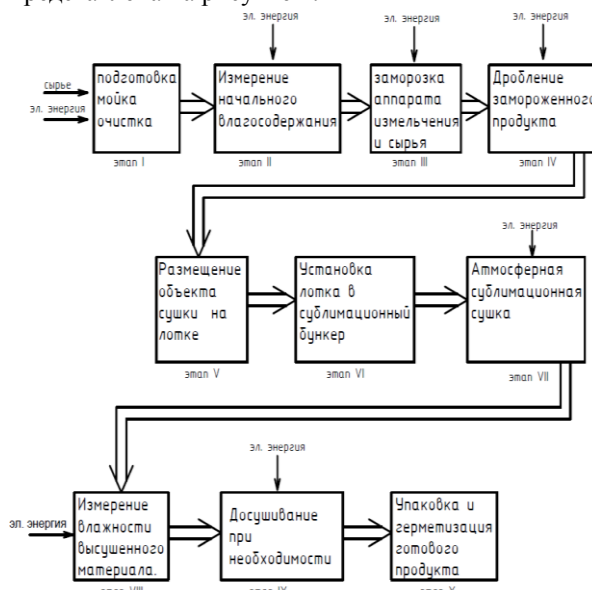


Рисунок 1. Схема технологического процесса

#### 2.2. Описание лабораторного стенда атмосферной сублимационной сушки

Первоначально схема лабораторного стенда до модернизации состояла из двух контуров: цикл холодильной машины и процесс сублимационной сушки, схема стенда представлена на рисунке 2. Хладагент кипит в испарителе 4. Пары холодильного агента под низким давлением откачиваются компрессором 1. В компрессоре хладагент сжимается, нагревается и нагнетается в конденсатор 2, где горячий газ под давлением конденсации охлаждается окружающим воздухом до температуры кон-

денсации и конденсируется. Жидкий хладагент после конденсатора направляется в ТРВ 3, где хладагент дросселируется с уменьшением давления и температуры, при этом теряется часть жидкого хладагента (до 30% переходит в пар). После ТРВ 3 жидкость идет в испаритель 4, где оставшиеся 70% жидкости испаряется, и отбирает теплоту от проходящего через испаритель воздуха и сконденсировавшейся влаги, пары хладагента откачиваются компрессором 1, где пар сжимается, повышается его температура и цикл начинается заново.

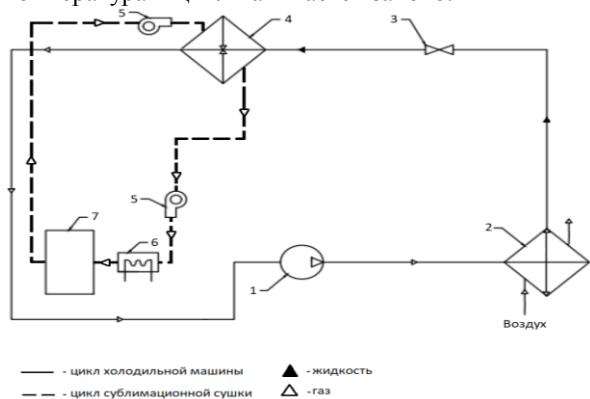


Рисунок 2. Схема первоначального лабораторного стенда атмосферной сублимационной сушки

1 – компрессор, 2 – конденсатор холодильной машины, 3– терморегулирующий вентиль, 4 – испаритель холодильной машины, 5 – вентилятор холодильной машины, 6 – электрический нагреватель, 7 – сублимационный бункер

Проходя через испаритель 4, увлажненный воздух охлаждается, влага из воздуха оседает на его поверхности в виде инея. Абсолютная влажность воздуха понижается. Относительная влажность воздуха в то же время повышается почти до 100%. По мере накопления инея автоматически срабатывает оттайка. Затем воздух с помощью вентилятора 6 подается в сублимационный бункер 8. Перед подачей в сублимационный бункер воздух нагревается электрическим нагревателем 7.

При достижении в продукте примерно 20 % влаги его отправляют на стадию инфракрасной досушки, где влажность достигает требуемого значения (5 %). При небольшой конечной влажности продукта возможно его длительное хранение в условиях нерегулируемых температур.

### 2.3. Модернизированная схема существующего лабораторного стенда

Для исследования конструктивно-режимных параметров был использован стенд АСС на кафедре ТМПУ.

При изучении холодильной машины, с помощью которой поддерживается отрицательная температура в низкотемпературной камере, было замечено, что вся теплота, выделяющаяся с конденсатора холодильной машины, выбрасывается в окружающую среду как отработанный продукт.

Таким образом, можно использовать эту теплоту как полезную. Часть теплоты конденсации, примерно 10–20 %, снимается теплообменником сбива

перегрева и направляется в низкотемпературную камеру для нагрева воздуха перед сублимационным бункером, оставшаяся теплота направляется в камеру досушивания для досушки продукта после сублимации с целью получения заданной конечной влажности примерно 5–8 %.

На рисунке 3 представлена принципиальная схема модернизированного стенда АСС.

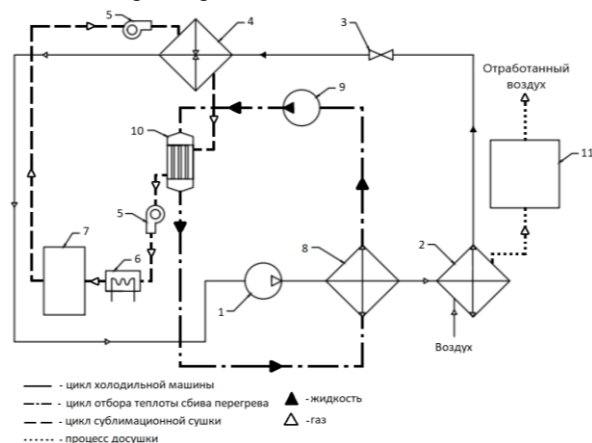


Рисунок 3. Функциональная схема модернизированного стенда АСС

1 – компрессор, 2 – конденсатор холодильной машины, 3– терморегулирующий вентиль, 4 – испаритель холодильной машины, 5 – вентилятор холодильной машины, 6 – электрический нагреватель, 7 – сублимационный бункер, 8 - теплообменный аппарат сбива перегрева, 9 - насос, 10 - теплообменный аппарат для нагрева воздуха в низкотемпературной камере, 11 - камера досушивания.

## 3. РАСЧЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ УСТАНОВКИ

### 3.1 Расчет холодильного цикла

Для получения искусственного холода наибольшее применение получили паровые компрессионные холодильные установки, состоящие из испарителя, компрессора, конденсатора и регулирующего вентиля, соединенных между собой последовательно трубопроводами, образующими замкнутую систему [4].

Данные по результатам расчета параметров хладагента представлены в таблице 1.

Теплота сбива перегрева, забираемая с теплообменного аппарата для нагрева воздуха внутри низкотемпературной камеры:

$$Q_{\text{сбива}} = G_x \cdot (h_{2д} - h_2), \quad (1)$$

где:  $G_x$  – расход холодильного агента в цикле;

Теплота конденсации:

$$Q_k = Q_T - Q_{\text{сбива}} \quad (2)$$

где:  $Q_k$  - теплота конденсации, кВт;

$Q_T$  – теплопроизводительность холодильной установки, кВт;

$Q_{\text{сбива}}$  -теплота сбива перегрева, кВт;

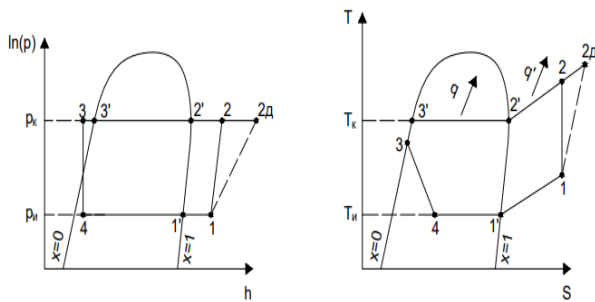


Рисунок 4. ln(p)-h и T-S диаграммы цикла холодильной машины

1-2: сжатие в компрессоре в идеальном процессе; 1-2д: сжатие в компрессоре в реальном процессе; 2(2д)-2': рекуперация тепла (снятие перегрева); 2'-3': конденсация насыщенного пара в насыщенную жидкость; 3'-3: переохлаждение жидкости; 3-4: дросселирование; 4-1': кипение; 1'-1: небольшой перегрев; q – теплота, отводимая от конденсатора, на досушку; q' – 10 % теплоты, отводимые от теплообменного аппарата сбива перегрева для нагрева воздуха внутри низкотемпературной камеры.

Таблица 1. Параметры в точках цикла

Точки	t, °C	p, бар	h, кДж/кг	S, кДж/кг·К	v, м <sup>3</sup> /кг
Г`	-26	2,4	353	1,63	0,081
1	-20	2,4	357,8	1,65	0,084
2д	71	26,4	407,5	1,65	0,007
2	56	21,5	398	1,63	0,009
2`	47	21,5	385,85	1,6	0,008
3`	47	21,5	276,4	1,25	0,001
3	45	21,5	273,3	1,24	0,001
4	-26	2,4	273,3	1,306	0,047

### 3.2. Расчет теплообменного аппарата сбива перегрева и воздушного подогревателя холодильной камеры

Теплообменный аппарат типа труба в трубе можно использовать в широком диапазоне температур, давлений и для любых теплоносителей [4]. Был выполнен конструктивный расчет теплообменного аппарата сбива перегрева. Тепловая нагрузка составляет 0,24 кВт. Скорость движения нагреваемого теплоносителя составляет 0,008 м/с. Определена площадь поверхности теплообмена и количество секций. Эффективность теплообменного аппарата – это отношение теплового потока, передаваемого в реальном теплообменном аппарате, к потоку в идеальном ТА.

$$\varepsilon = \frac{Q_p}{Q_{in}} = \frac{W_1 \cdot (t_1 - t''_1)}{W_{min} \cdot (t_1 - t_2)} = \frac{W_2 \cdot (t''_2 - t_2)}{W_{min} \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (3)$$

Результаты проведенных расчетов являются параметрами теплообменного аппарата представлены в таблице 2. Кожухотрубный теплообменный выполняет функцию передачи теплоты от горячего теплоносителя к холодному [2]. Для обеспечения тепловой нагрузки, необходимой для нагрева воздуха внутри низкотемпературной камеры путём передачи теплоты горячим теплоносителем (пропиленгликолем), выбран вертикальный кожухотрубный теплообменный аппарат, состоящий из неоребрённых медных трубок.

Вертикальный кожухотрубный теплообменник позволяет уменьшить использование производственной площади, что необходимо для реализации модернизированного лабораторного стенда атмосферной сублимационной суши. Результатом произведенных расчётов являются параметры теплообменных аппаратов представленные в таблице 2.

Определение тепловой нагрузки:

$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t'_1 - t''_1) \quad (4)$$

где:  $c_{p1}$  – изобарная теплоёмкость,  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$ ,

$G_2$  – расход нагреваемого теплоносителя:  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;

В дальнейшем будет выполнено уточнение расчёта тепловых аппаратов с учетом критериев оптимальности.

Таблица 2. Параметры теплообменного аппарата

Параметр	ТМА СП	ВП
Тепловая нагрузка, кВт	0,24	0,24
Среднелогарифмическая разность температур, °C	11,5	69,76
Расчётная поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	0,0043	0,167
Эффективность	0,57	0,192
Длина каждой трубки теплообменного аппарата, м	0,1	0,083

### 3.3 Расчет конвективной камеры досушивания

Оставшаяся влага удаляется из материала путем подвода нагретого воздуха [3]. Статика сушики устанавливает связь между начальными и конечными параметрами участвующих в сушке веществ на основе уравнений материального и теплового балансов. Из уравнений статики сушики определены параметры продукта, расход сушильного агента и расход теплоты. Количество удаляемой влаги определено из уравнения материального баланса:  $\omega_1 = 14\%$  – начальная влажность материала,  $\omega_2 = 8\%$  – конечная влажность материала

$$W = G \cdot \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{(1 - \omega_1)} = 0,42 \text{ кг/ч}, \quad (5)$$

Расход сушильного агента составит:

$$L = \frac{W}{(d_2 - d_1)} = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (6)$$

## 4. РАЧЕТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

### 4.1. Особенности расчета продолжительности сушки в сублимационном бункере

Одной из важнейших характеристик процесса обезвоживания считается время, затрачиваемое на сушку. Продолжительность складывается из суммарной продолжительности процессов замораживания, сублимации вымороженной влаги и испарения

невывороженной влаги до заданного уровня остаточной влажности. Наиболее распространенным является замораживание пищевых продуктов в морозильных камерах либо морозильных аппаратах в условиях конвективного теплоотвода с естественной и принудительной циркуляцией воздуха.

Для проведения расчетов процесс замораживания разделен на включает три фазы: охлаждение объекта от температуры начальной до криоскопической (температуры начала льдообразования в продуктах); процесс замораживания; снижение температуры замороженного продукта до заданного значения.

Разделение на вторую и третью фазы условно, так как продвижение в объекте фронта кристаллизации и охлаждение уже замерзшей зоны происходят одновременно.

Существует несколько подходов к расчету продолжительности процесса замораживания. В данной работе используется метод поэтапного расчета. Этот метод является наиболее точным, и он позволяет раскрыть физическое влияние на продолжительность отдельных параметров и теплофизических характеристик замораживаемого продукта [4]

#### 4.2. Расчёт длительности процессов охлаждения, замораживания, промерзания и сушки

Определено влияние толщины кусочков продукта на продолжительность сушки

Характерный размер кусочков яблока (толщина) варьировался от 5 мм до 10 мм.

Время охлаждения яблока  $\tau_{охл}$  от начальной температуры до криоскопической при конвективном теплообмене:

$$\tau_{охл} = \frac{L \cdot (L \cdot \alpha_k + 3 \cdot \lambda_2)}{3 \cdot \alpha_k \cdot a_2} \cdot \ln \left[ \frac{2 \cdot \lambda_2 \cdot (t_0 - t_{cp})}{(L \cdot \alpha_k + 2 \cdot \lambda_2) \cdot (t_{кр} - t_{cp})} \right] \quad (7)$$

где:  $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

$a_2$  - коэффициент температуропроводности яблока,  $\frac{м^2}{с}$ ;

При оседании инея на приборах охлаждения необходимо расчёт влияния снежной шубы.

Степень влияния снеговой шубы на сопротивление теплопередаче  $R_{ин}$ :

$$R_{ин} = \frac{H}{\lambda_{ин}} = \frac{1,428 \cdot 10^{-3}}{0,15} \quad (8)$$

где:  $\lambda_{ин}$  - Теплопроводность слоя инея,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

Корректировка продолжительности процесса охлаждения:

$$\tau_{охл.к} = \tau_{охл} + \tau_{охл} \cdot \frac{R_{ин}}{R_{п.о}} \quad (9)$$

где:  $R_{ин}$  - степень влияния снеговой шубы на сопротивление теплопередаче,  $\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$

$R_{п.о}$  - термическое сопротивление приборов охлаждения,  $\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$ ;

Доля вымороженной влаги в зависимости от режима замораживания:

$$\omega = \frac{z \cdot (t_{cp} - t_{кр})}{\frac{2 \cdot t_{кр}}{Bi_1} + z \cdot (t_{кр} + t_{cp})} \quad (10)$$

где:  $Bi_1$  - Критерий Био для замороженного продукта;

Продолжительность процесса охлаждения материала до заданной температуры в центре  $t_{зд}$ :

$$\tau_{зд} = \frac{L \cdot (L \cdot \alpha_{пр.кон} + 3 \cdot \lambda_1)}{3 \cdot \alpha_{пр.кон} \cdot a_1} \cdot \ln \frac{t_{кр} - t_{cp}}{t_{зд} - t_{cp}} \quad (11)$$

где:  $\lambda_1$  - теплопроводность продукта после замораживания,  $\frac{Вт}{м \cdot К}$ ;

Количество влаги, испаренной при замораживании:

$$G_{вл.з} = \frac{\alpha_{к.кон}}{\mu \cdot c_p' \cdot (d \cdot t_{зд} + \varphi \cdot d_0) \cdot F_{пр} \cdot \tau_{общ.зам}} \quad (12)$$

где:  $\alpha_{к.кон}$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией для конца процесса,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ ;

#### 5.1. Исследование зависимость между толщиной продукта и продолжительностью сушки.

Объекты сушки: яблоко, свинина и банан.

После проведения однофакторного численного эксперимента были получены результаты, приведенные в таблице 3.

Таблица 3. Общая продолжительность времени сушки для различных материалов

Продукт	Теплопроводности, $\frac{Вт}{м \cdot К}$	Толщина, м	Общая продолжительность сушки, ч
Яблоко	0,49	0,005	21,84
		0,0075	28,51
		0,01	36,18
Свинина	0,43	0,005	24,585
		0,0075	31,83
		0,01	40,348
Банан	0,48	0,005	22,71
		0,0075	29,14
		0,01	37,72

Данные таблицы 1, представлены в графической форме, на рисунке 5

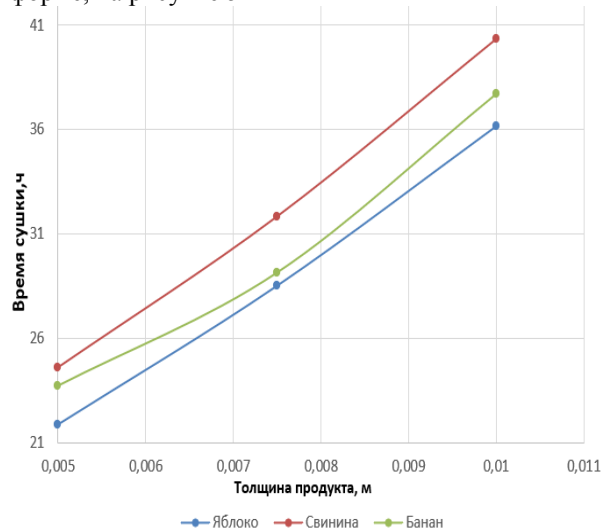


Рисунок 5. График влияния толщины объекта сушки на продолжительность процесса сушки

Влияние толщины объекта сушки на продолжительность процесса АСС представлено на рисунках 6,7,8

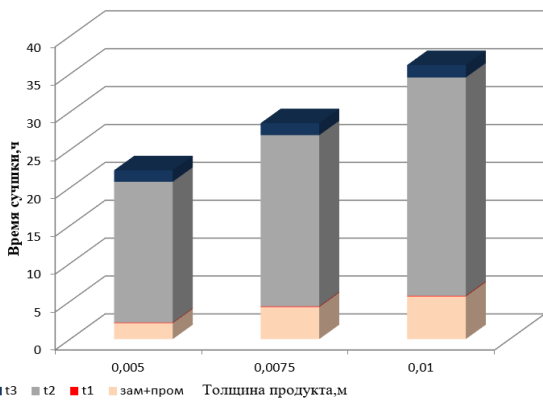


Рисунок 6. Влияние толщины объекта сушки (яблоко) на продолжительность сушки

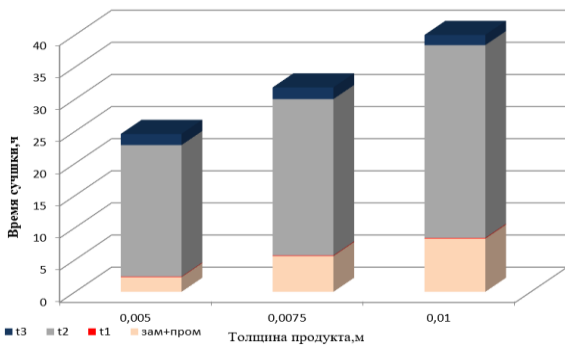


Рисунок 7. Влияние толщины объекта сушки (свинина) на продолжительности сушки

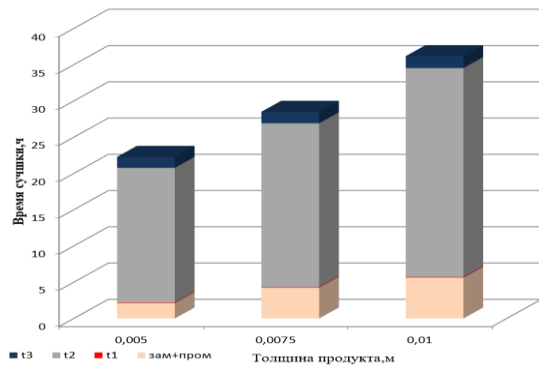


Рисунок 8. Влияние толщины объекта сушки (банан) на продолжительность сушки

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вследствие недостаточно высокой энергоэффективности существующего лабораторного стенда для сушки пищевых продуктов путём сублимации при атмосферном давлении предложена его модернизация. Получено обоснование возможности модернизации существующего лабораторного стенда атмосферной сублимационной сушки путём использования теплоты сбива перегрева и конденсации для подогрева воздуха и подачи его в сублимационный бункер

и камеру досушки с целью увеличения энергоэффективности установки и улучшения качества получаемой продукции.

Повышение энергоэффективности установки достигается за счет снятия теплоты сбива перегрева с конденсатора и направление этой теплоты в холодильный шкаф для подогрева воздуха перед сублимационным бункером, а также замены инфракрасной камеры досушки на конвективную сушилку. Данные внесенные изменения в конструкцию сушильной установки приведет к снижению затрат электрической энергии

Разработаны кожухотрубный теплообменный аппарат и теплообменный аппарат типа труба в трубе. ТА труба в трубе используется для снятия теплоты сбива перегрева с конденсатора и передачи этой теплоты кожухотрубному ТА, который в свою очередь подогревает воздух перед сублимационным бункером.

Произведен расчёт времени сушки для трех материалов с различными геометрическими и теплофизическими характеристиками. В качестве объектов сушки были выбраны: яблоко, свинина и банан. Установлено, что продолжительность сушки свинины (с меньшим коэффициентом теплопроводности, по сравнению с другими рассматриваемыми продуктами) при характерном размере 0,005 м, составила 24,585ч, что примерно на 2 ч больше других продуктов. Итогом численного эксперимента стало выявление зависимости требуемого времени сушки от толщины ломтиков продукта.

Также показано, что наибольшее влияние на длительность процесса обезвоживания оказывает этап в сублимационном бункере, так как в данном процессе энергия к фронту сублимации передается кондукцией через обезвоженный поверхностный слой.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АСС - атмосферная сублимационная сушка

ТА – теплообменный аппарат

ТМА СП — тепломассообменный аппарат сбива перегрева

ВП —воздухоподогреватель

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камовников Б.П., Антипов А.В., Семенов Г.В., Баббаев И.А. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов. - Москва: КОЛОС, 1994. - 249 с.
2. Бакластов А.М., Горбенко В.А., Данилов О.Л. Промышленные тепломассообменные процессы и установки. М.: Энергоатомиздат. 1986. С. 328.
3. В.В. Губарева “Расчет и проектирование конвективных сушильных установок”. – Белгород: Издательство БГТУ, 2014. – 118 с
4. Бражников А.М. Теория термической обработки мясосухопродуктов. 1984.



*В.Д. Алексеева, С.В. Полканов, И.Г. Леонов, И.С. Плашков*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ И РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И ОБЪЕКТОВ БЮДЖЕТНОЙ СФЕРЫ**

### **АННОТАЦИЯ**

Проанализирована существующая документация на здания и создан программный алгоритм для наглядности аналогичных расчётов. Проведён расчёт теплопотерь по нескольким методикам. Разработаны меры по сокращению теплопотерь и повышению класса энергетической эффективности зданий. При этом рассчитано сокращение тепловых потерь и срок окупаемости указанных мероприятий.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Проблема грамотного и целесообразного использования энергетических ресурсов стоит перед энергетиками на каждом этапе их трудовой деятельности, поэтому решение о том, как и в каком количестве расходовать эти ресурсы, является одним из наиболее трудоёмких. Энергетическое обследование, или энергоаудит, - это сбор и анализ информации об использовании энергетических ресурсов с целью получения достоверной информации об объёме используемых ресурсов, выявления возможностей энергосбережения и повышения энергетической эффективности исследуемого объекта с отражением полученных результатов в энергетическом паспорте.

Жилищный фонд на территории нашей страны крайне неоднороден. Состояние жилых зданий различается в зависимости от даты застройки, материала строительных конструкций, типа эксплуатируемых домов при массовой застройке. По данным Росстата жилищный фонд РФ составляет на 01.01.2018 г. 3 708 млн. м<sup>2</sup>, из них 66.4 млн. м<sup>2</sup> – ветхий, 24.6 млн. м<sup>2</sup> – аварийный [1].

Современные исследования показывают, что большинство новых строений не удовлетворяют требованиям СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», а именно: присутствуют многочисленные несоответствия проектным требованиям по теплозащите в отношении примерно 40 процентов жилищного фонда. Также установлено, что «недотопы» и «перетопы» зданий возникают по многим причинам и находятся в пределах 9-13 процентов от годового теплопотребления [2].

По последним данным, энергетически эффективным считается многоквартирный дом, в котором минимизированы расходы энерго-ресурсов в диапазоне от 0 до 91 кВт·ч/ м<sup>2</sup> или, иными словами, классы энергоэффективности А+, А и В [3].

Установлено, что наиболее целесообразно внедрять энергосберегающие мероприятия в изношенных зданиях, а также в зданиях с высокими удельными расходами потребляемых энергоносителей. Перспективными для серийного внедрения энергосберегающих мероприятий представляются типовые здания бюджетных организаций.

Сейчас представлено множество различных энергосберегающих технологий, направленных на сокращение затрат электричества, теплоты, водоснабжения, поэтому перед управляющими бюджетной организации стоит выбор наиболее целесообразной технологии. Для разрешения данной проблемы необходимо систематизировать полученную информацию и оценить рациональность применения того или иного мероприятия с энергетической и экономической точек зрения.

Актуальность проведения энергетического обследования МКД заключается в нивелировании потребления тепловой энергии для реального объекта исследования. При этом речь идёт именно о комплексе мероприятий, а не об отдельно взятых решениях, так как только комплексный подход позволит получить значительный эффект.

Нормативно-правовой базой энергоаудита прежде всего является Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Также было принято множество НПА, регулирующих отношения в сфере энергосбережения, в том числе «Постановление Правительства РФ от 18 ноября 2013 г. N 1034 «О коммерческом учете тепловой энергии, теплоносителя» или всем известное постановление «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года».

### **2. ОБЗОР ОБЪЕКТА №1**

Несомненно, что от того, насколько велики теплопотери, зависит комфорт жителей, а также счета за отопление, горячее водоснабжение и электричество. Продемонстрируем диаграмму потребления энергоресурсов многоквартирным домом [4].

Первым объектом анализа является общежитие по адресу: г. Москва, Варшавское шоссе, 152, к. 7а.

Общая площадь жилых помещений 860.5 м<sup>2</sup>, год ввода в эксплуатацию 1985, объём здания 16050 м<sup>3</sup>, состояние здания ветхое.

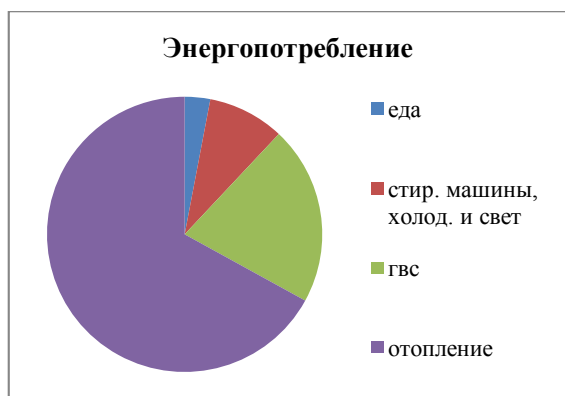


Рис.1. Потребление энергоресурсов многоквартирным домом.

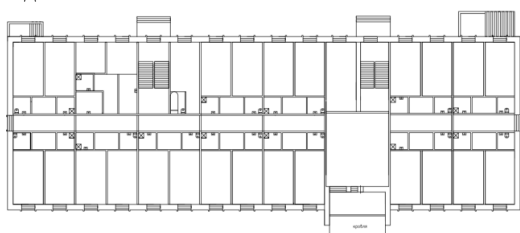


Рис.2. Вид сверху на дом.

Стены кирпичные (без утеплителя), их толщина принята в соответствии с типом здания для аналогичных построек, так как согласно проектной документации данная величина не представлена. Здание обладает стандартными звуко- и теплоизолирующими свойствами.

Состояние ограждающих конструкций удовлетворительное: требуется локальный ремонт блоков фасада, входные группы и оконные блоки в местах общего пользования требуют замены, подвал затоплен и захламлён. Также присутствуют: неплотности между дверьми и дверными проёмами, осыпавшаяся штукатурка внутри помещения, некоторые окна разбиты, излишнее обледенение крыши дома.

Площади элементов здания:

$$F_{\text{дв.о}} = 268.4 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{ст.вн}} = 3601.5 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{пол}} = 765.4 \text{ м}^2$$

$$F_{\text{кровля}} = 765.4 \text{ м}^2$$

Расчёт теплопотерь осуществлялся по двум методикам: с помощью определения термических сопротивлений, по формуле Ермолаева.

Общие теплопотери здания:

$$Q_{\text{об}} = 490 \text{ кВт} \left( 0.42 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right)$$

Расчётная нагрузка отопления:

$$Q_o^p = 324 \text{ кВт}$$

Нормативное значение тепловых потерь для данного типа здания составляет 0.359 Гкал/ч. Определим отклонение рассчитанного значения от нормативного:

$$\frac{0.42 - 0.359}{0.359} 100\% = 17.3 \%$$

Согласно СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий данная величина соответствует не норме, класс энергосбережения пониженный (D), требуется реконструкция здания [5].

Метод 2

Удельная отопительная характеристика по формуле Ермолаева:

$$q_o = 0.41 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°C}}$$

Нормативное значение тепловых потерь для данного типа здания составляет 0.359 Гкал/ч. Определим отклонение рассчитанного значения от нормативного:

$$\frac{0.41 - 0.359}{0.359} 100\% = 14.2 \%$$

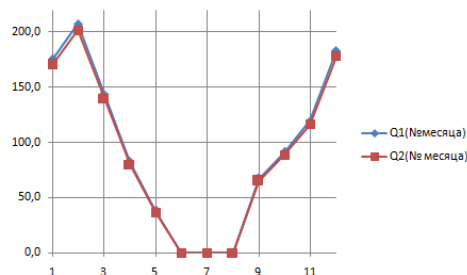


Рис.3. Месячное потребление теплоты в зависимости от температуры наружного воздуха при расчёте через теплопотери Q<sub>1</sub> и по формуле Ермолаева Q<sub>2</sub>.

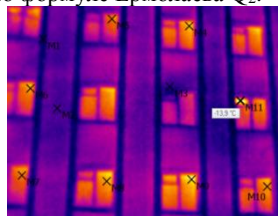


Рис.4. Термограмма общежития.

Таблица 1. Энергосберегающие мероприятия для объекта №1

Название мероприятия	Экономия/комментарии
Установка УУТЭ	Наведение порядка
Замена всех окон	2,5 года
Замена инженерных систем	До 10 лет

В качестве дополнительных ЭСМ предлагаются: утепление стен и установка регуляторов отопления.

Очевидно, что наиболее эффективно проводить комплекс мероприятий, но стоит вопрос в стоимости реализации, поэтому необходимо согласовать их с вышестоящими организациями для дальнейшей проработки.

### 3. ОБЗОР ОБЪЕКТА №2

Яузский бульвар д.3. стр. 1 - является жилым домом и выполнен в серии проекта домов «Башня Вульха».

В подвальном помещении располагается система учета тепловой энергии, 4 прибора не поверены.

Общая площадь жилых помещений 5015.7 м<sup>2</sup>, год ввода в эксплуатацию 1968, объём здания 29016 м<sup>3</sup>, состояние здания удовлетворительное.



На объекте исследования не было выявлено строительных дефектов, которые могли бы увеличить поток теплотопотерь через трещины, разломы материалов ограждающих конструкций.



Рис.5. Вид на здание с южной и западной сторон.

На вводе в здание частично отсутствует изоляция трубопровода. По факту осмотра был выявлен прибор учета, неопломбированный, имеет статус «обесточен», документация по данному прибору не предоставлена, показания в ПАО «МОЭК» не передаются. В ходе обследования был выявлен тепловычислитель РПТ 2220М, задвижка после УУТЭ 100 мм Шар/Фланец, трубопровод 100 мм, наличие запорной арматуры после УУТЭ.

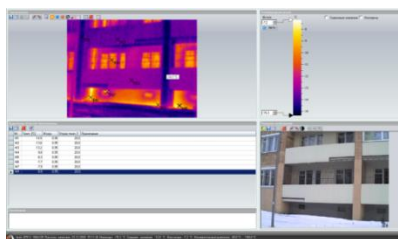


Рис.6. ИК-съемка с западной стороны здания.

Таблица 2. Параметры ограждающих конструкций

	F, м <sup>2</sup>	Материал	δ, м	λ, Вт/(м·К)
Стены	4116	Кирпич	0.3	1.0
Крыша	698.5	рубероид	0.3	0.57
Пол	698.5	Жб	0.25	1.7
Окна	1052	Дерево	0.03	0.1

Общие теплотопотери здания:

$$Q_{об} = 410 \text{ кВт} \left( 0.35 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right)$$

Расчётная нагрузка отопления:

$$Q_{о.р} = 0.49 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

Договорная нагрузка на отопление:

$$Q_{дог} = 0.42 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

Удельная отопительная характеристика по формуле Ермолаева:

$$q_o = 0.4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°C}}$$

Исходя из анализа графиков зависимостей, наблюдается повышенный отток теплоты через ограждающие поверхности, что приводит к нарушению баланса микроклимата и повышенной амплитуде температуры воздуха внутри жилого помещения.

Разница между фактической и заявленной (установленной) энергоснабжающей организацией нагрузки составляет 0.09 Гкал/ч. В годовом

пересчете «недотоп» составит 462 Гкал/год.

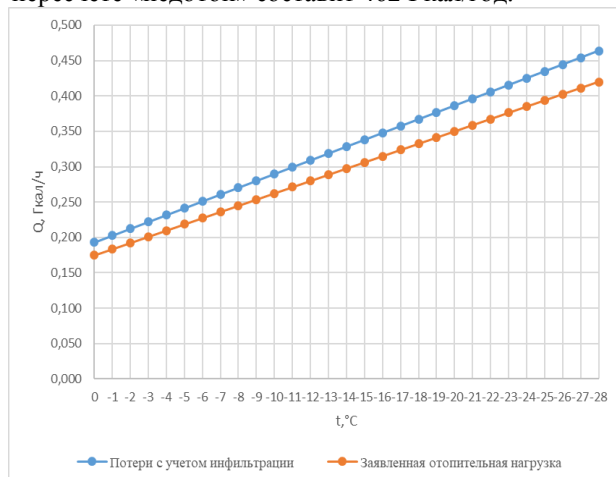


Рис.7. Зависимость отопительной нагрузки от температуры наружного воздуха.

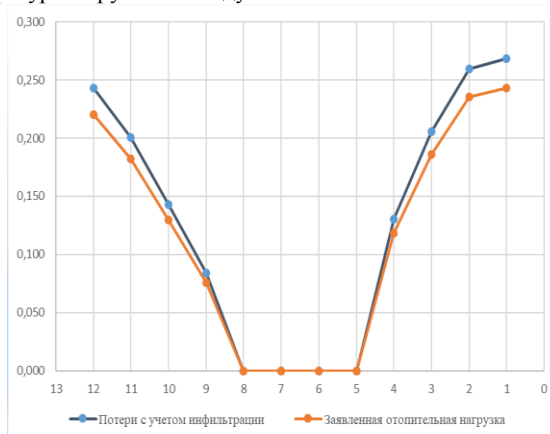


Рис.8. Зависимость значения отопительной нагрузки от месяца года.

Таблица 3. ЭСМ для объекта №2

Название	Стоимость, руб.	Эффективность, %	Окупаемость, год
Установка САРТ, вкл. УУТЭ	560 000	30-35	0.5
Доп. изоляция на трубопроводе	42 577	3-7	1.1
Замена окон	1 128 171	20-23	1.2

#### 4. ОБЗОР ОБЪЕКТА №3

Рассматривается учебно – научный корпус Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе. Год постройки 1989, общая площадь 46909 м<sup>2</sup>, объём здания 207901 м<sup>3</sup>.

Здание имеет следующие параметры помещений:

Таблица 4. Параметры объекта №3

	F, м <sup>2</sup>	Материал	δ, м	λ, Вт/(м·К)
Стены	12567	жб	0.63	1.68
Крыша	8154	рубероид	0.5	1.5
Пол	7436	жб	0.4	1.68
Окна	3211	стеклопакет	0.06	0.15

Общие теплопотери здания:

$$Q_{об} = 2651 \text{ кВт} \left( 2.28 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right)$$

Расчётная нагрузка отопления:

$$Q_{о}^p = 3 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

Договорная нагрузка на отопление:

$$Q_{дог} = 3.36 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

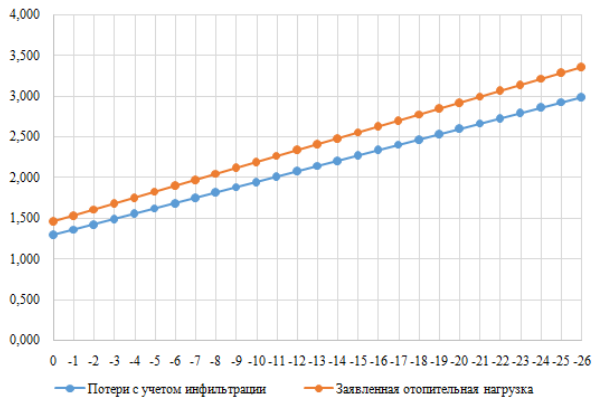


Рис.9. Зависимость отопительной нагрузки от температуры наружного воздуха.

Удельная отопительная характеристика по формуле Ермолаева:

$$q_o = 0.36 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°C}}$$

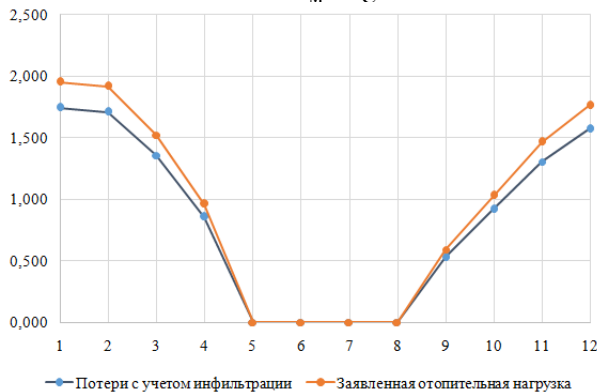


Рис.10. Зависимость значения отопительной нагрузки от месяца года.

Таблица 5. ЭСМ для объекта №3

Название	Экономия, руб/год	Окупаемость, год	Эффективность, %
Понижение тепловой нагрузки	2 341 586	-	11
Изоляция трубопроводов	55 227	3	57
УУТЭ с погодным регулированием	1 260 702	меньше 1	10

С каждым годом растет цена на отопление и горячее водоснабжение. Установка УУТЭ позволит фиксировать точные значения теплоты, которые

получает объект, что в свою очередь повысит точность расчетов. Автоматизация же позволит убрать «перетоп». Так, например, расчетная величина по формуле Ермолаева показала, что фактическая отопительная нагрузка 3 Гкал/ч, но все данные для расчета были взяты из нормативов с допущениями или завышениями, настоящее же значение может достигать меньших значений (2.8 Гкал/ч).

## 5. ОБЗОР ОБЪЕКТА №4

Объект исследования – многоквартирный жилой дом по адресу: ул. Волочаевская, 1. Общая площадь жилых помещений 2789 м<sup>2</sup>, год ввода в эксплуатацию 2005, объём здания 28280 м<sup>3</sup>, состояние здания – после ремонта.

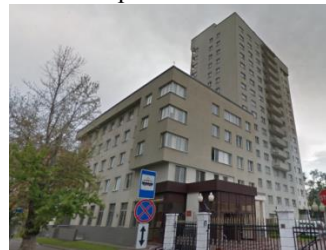


Рис.11. Вид на здание с южной стороны.

При внешнем обследовании здания было выявлено, что состояние ограждающих поверхностей в целом по всей конструкции имеет удовлетворительную оценку. Состояние межпанельных швов имеет удовлетворительную оценку. Общий процент износа здания достигает 5%.

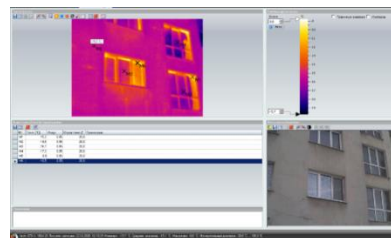


Рис.12. Термограмма здания.

Здание имеет следующие параметры помещений:

Таблица 6. Параметры объекта №4

	F, м <sup>2</sup>	Материал	δ, м	λ, Вт/(м·К)
Стены	4560	жб	0.5	1.68
Крыша	410	рубероид	0.25	1.5
Пол	410	жб	0.5	1.68
Окна	1060	стеклопакет	0.06	0.1

Общие теплопотери здания:

$$Q_{об} = 506 \text{ кВт} \left( 0.44 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right)$$

Расчётная нагрузка отопления:

$$Q_{о}^p = 0.48 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

Договорная нагрузка на отопление:

$$Q_{дог} = 0.43 \frac{\text{Гкал}}{\text{ч}}$$

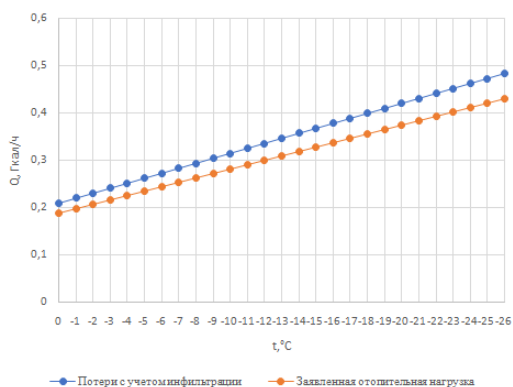


Рис.11. Зависимость отопительной нагрузки от температуры наружного воздуха.

Удельная отопительная характеристика по формуле Ермолаева:

$$q_o = 0.43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°C}}$$

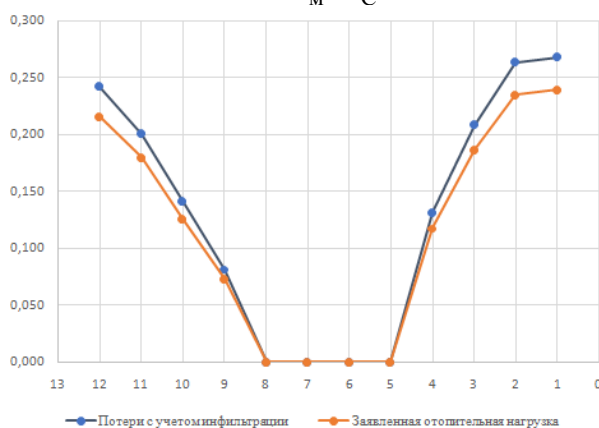


Рис.12. Зависимость значения отопительной нагрузки от месяца года.

В качестве ЭСМ предлагается провести тепловую реабилитацию, а именно: утеплить ограждающие конструкции за счёт установки навесного вентилируемого фасада, отрегулировать автоматику на ИТП с настройкой элеватора и врезкой балансировочного клапана.

При этом удельная отопительная характеристика уменьшится до 0.26 Вт/(м<sup>3</sup>·К) (на 39 процентов), а фактическая отопительная нагрузка уменьшится до 0.29 Гкал/ч (на 40 процентов). Срок окупаемости составит 4.2 года.

Таблица 7. Сводная таблица с результатами

Показатели	Объект №1	Объект №2	Объект №3	Объект №4
V, м <sup>3</sup>	16050	29016	207901	28280
Q <sub>o</sub> <sup>p</sup> , кВт	247	570	3489	558
F/V, м	0,22	0,17	0,2	0,2
R <sub>o</sub> <sup>np</sup> , м <sup>2</sup> · °С/Вт.	0,77	0,42	0,59	0,57
q <sub>o</sub> , Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	0,41	0,4	0,36	0,43
Экономия, %	27	35	57	40

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения энергетического обследования существующих и реконструируемых объектов бюджетной сферы была проанализирована документация на здания и создан программный алгоритм в Excel, результаты вычислений представлены в виде графиков. Расчёт теплопотерь произведён путём определения термических сопротивлений ограждающих конструкций и по формуле Ермолаева, и, так как для всех представленных объектов результаты по двум методикам коррелируют, на них можно положиться при дальнейшем анализе. Также в ходе обследования были предложены ЭСМ, экономия от которых составляет от 27 до 57 процентов. Отдельного внимания заслуживает замечание об установке УУТЭ, так как это необходимо для наведения порядка в технической документации на объекты.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- НПА – нормативно-правовые акты;  
 УУТЭ – узел учёта тепловой энергии;  
 ЭСМ – энергосберегающие мероприятия;  
 F – площадь, м<sup>2</sup>;  
 δ – толщина, м;  
 λ – коэффициент теплопроводности,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$ ;  
 R – полное термическое сопротивление,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$ ;  
 Q – тепловые потери, кВт, Гкал/ч;  
 Q<sub>o</sub><sup>p</sup> – расчётная нагрузка отопления, кВт, Гкал/ч;  
 q<sub>o</sub> – удельная отопительная характеристика,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°C}}$ ;  
 R<sub>o</sub><sup>np</sup> – приведённое термическое сопротивление ограждающих конструкций,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральная служба государственной статистики**// rosstat.gov.ru: URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/13706> (дата обращения: 10.04.2022).
2. **Свод правил СП 131.13330.2012** Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23–01–99\*.
3. **Журнал «Сантехника. Отопление. Кондиционирование»**// www.c-o-k.ru: URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/sovremenny-mnogokvartirnyy-dom-i-ego-energoeffektivnost> (дата обращения: 10.04.2022).
4. **Сайт центра энергоэффективности – XXI века**// www.cenef.ru: URL: [http://www.cenef.ru/art\\_11212\\_119\\_node2.html](http://www.cenef.ru/art_11212_119_node2.html) (дата обращения: 10.04.2022).
5. **Свод правил СП 50.13330.2012** Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.

*Г.И. Парфенов, Н.Н. Смирнов, В.В. Тютиков, В.М. Захаров*

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Россия

## **СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО МИКРОКЛИМАТА В ЗДАНИЯХ С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ СВЕТОПРОЗРАЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье публикуются результаты исследований по моделированию микроклимата в помещениях полномасштабного тренажера блочного щита управления АЭС, расположенного в ИГЭУ, а также ремонтно-механического цеха АО "ПСК" с учетом применения разработанных энергосберегающих мероприятий, таких как использование мобильных теплоотражающих экранов и фотоэлектрических панелей в окнах, понижение температуры внутреннего воздуха в нерабочее время до минимального значения. Определена эффективность применения вышеуказанных мероприятий.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Приказ Минстроя РФ [1] устанавливает снижение потребления тепловой энергии к 2028 году для вновь строящихся зданий на 50 %, а для реконструируемых или проходящих капитальный ремонт – на 20%. Рекомендуется активно внедрять в инженерные системы зданий возобновляемые и альтернативные источники энергии и устройства, утилизирующие тепло вторичных энергоресурсов.

Согласно оценкам экспертов Московского энергетического института [2] по состоянию на 2016 год в РФ затраты на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и ГВС составляют примерно 160 млн т. у. т. (20 % топливно-энергетического баланса страны). На отопление расходуется 80 % из вышеуказанных затрат. Согласно данных исследователей Бухмирова В.В., Пророковой М.В. [3], постаравшихся определить усредненные показатели для зданий непроизводственного назначения, наибольший потенциал в области энергосбережения также приходится на окна и его значение составляет 17,5 %. Потери через окна составляют 35 %.

Снижение потребления топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, а также повышение производительности труда приводит к уменьшению себестоимости и улучшению качества продукции. Организация динамического микроклимата в помещениях способствует повышению работоспособности сотрудников за счет возбуждения центральной нервной системы. Для снижения потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) авторами были предложены к применению энергосберегаю-

щие мероприятия [4], а именно применение теплоотражающих экранов с фотоэлектрическими батареями в окнах, дополнительное понижение температуры внутреннего воздуха в нерабочее время холодного периода года. Дополнительная осушка внутреннего воздуха позволяет уменьшить значение температуру точки росы, следовательно, и значение минимально-допустимой температуры внутреннего воздуха при дежурном режиме отопления в нерабочее время. Известны различные способы осушки воздуха, в том числе конденсация водяных паров в теплообменниках-теплоутилизаторах [5], смешение с сухим наружным воздухом и другие технологии. В данном исследовании рассмотрен вариант смешения вытяжного воздуха с наружным.

Важным аспектом при обосновании целесообразности использования разработанных авторами энергосберегающих мероприятий является их технико-экономическая оценка на основе моделирования годового цикла работы систем по обеспечению необходимых параметров микроклимата в помещениях различного назначения. Значимым этапом при создании имитационной модели микроклимата для зданий с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями с применением теплоотражающих экранов является также разработка и верификация математической модели процесса теплопередачи для данных ограждающих конструкций.

### **1. РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СТАВНЯ**

Авторским коллективом были разработаны различные варианты энергосберегающих светопрозрачных ограждающих конструкций зданий с использованием теплоотражающих экранов, применение которых целесообразно в темное время суток или в период отсутствия людей в помещении. Проведенные экспериментальные исследования процесса теплопередачи через оконные блоки с теплоотражающими экранами, выполненные в климатической камере [6], показали значительное в 1,5÷3,8 раза увеличение приведенного сопротивления теплопередаче данной конструкции  $R_o$  по сравнению с базовым вариантом (без экранов). На основании данных физического эксперимента была

установлена количественная зависимость приведенного сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от геометрических размеров и физических свойств стекол, экранов и образованных ими воздушных прослоек, а также от температурного режима эксплуатации данных конструкций.

Была разработана конструкция энергоэффективного ставня [7], представленного на рисунке 1, предусматривающего дополнительную генерацию электрической энергии путем установки на наружной стороне солнечной батареи.

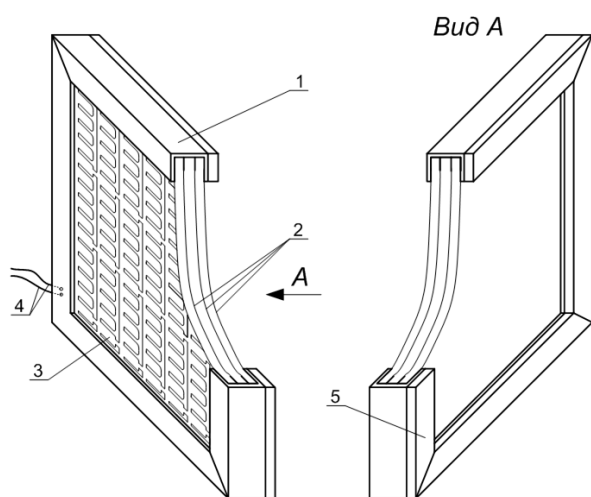


Рис. 1. Конструкция многофункционального энергоэффективного ставня [7]: 1 – рама; 2 – теплоотражающие экраны; 3 – солнечная батарея; 4 – соединительные провода; 5 – уплотняющий шнур.

Использование теплоотражающих экранов в светопрозрачных конструкциях также позволит в светлое время суток теплого периода года значительно снизить поступление солнечной энергии в помещение и сократить затраты энергии на кондиционирование воздуха.

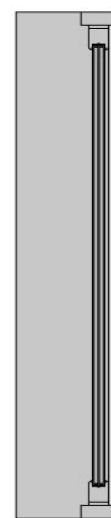
## 2. РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОКОННЫЙ БЛОК С ТЕПЛООТРАЖАЮЩИМИ ЭКРАНАМИ

Для создания имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с экранами были задействованы модули программного пакета Comsol Multiphysics.

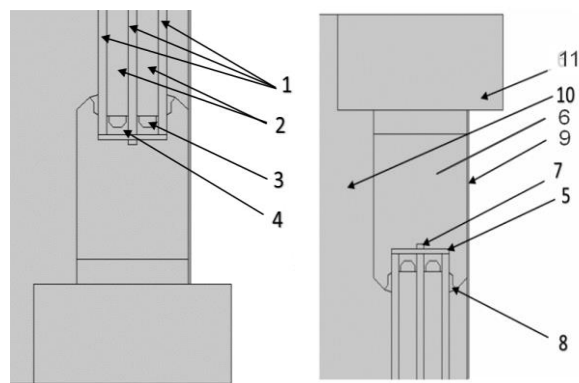
Геометрическая модель двухкамерного стеклопакета формулой СПД 4M1x10x4M1x10x4M1 в деревянной раме (высота стеклопакета  $H_{СПД} = 1,4$  м) и установленными с наружной стороны экранами представлены на рисунке 2.



а)



б)



в)

г)

Рис. 2. – Внешний вид (а) и нижняя (в), верхняя (г) части геометрической модели двухкамерного стеклопакета формулой СПД 4M1x10x4M1x10x4M1 в деревянной раме, установленной в световом проеме кирпичной стены: 1 – стекло; 2 – воздушная прослойка; 3 – осушитель; 4 – герметик; 5 – пластиковая проставка; 6 – деревянная рама; 7 – паз для вентиляции; 8 – силиконовый герметик; 9 – теплоотражающий металлический экран; 10 – воздух в помещении; 11 – кирпичная стена.

При описании математической модели использовались уравнения неизотермического ламинарного движения несжимаемого вязкого газа, сохранения энергии в прямоугольных декартовых координатах, неразрывности, переноса лучистой энергии [6]. При реализации математической модели теплопередачи



через оконный блок с экранами в качестве метода расчета радиационного теплопереноса был принят метод дискретных ординат (Discrete Ordinats (DO)) [6, 8]. Были приняты соответствующие граничные условия.

Степень черноты на поверхности стекол  $\epsilon_{ст}$ , деревянной рамы  $\epsilon_{д}$ , оконного проема  $\epsilon_{пр}$  была принята равной 0,92, на поверхности экранов, выполненных из полированной алюминиевой фольги,  $\epsilon_3 = 0,05$ .

Во всех геометрических областях, содержащих воздух, моделировалась естественная конвекция.

Температура на внутренних поверхностях помещения  $t_{вн}$  в процессе моделирования задавалась таким образом, чтобы температура воздуха в помещении равнялась 20,5 °С. Температура наружного воздуха задавалась равной минус 15 °С.

В математической модели не учитывались солнечная инсоляция, инерционные свойства конструкций, воздухопроницаемость.

Математическая модель модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами в

двумерной постановке была реализована в программно-вычислительном комплексе (ПВК) COMSOL Multiphysics. Задача решалась как стационарная. В ПВК COMSOL Multiphysics численная аппроксимация дифференциальных уравнений выполняется методом конечных элементов.

Исследовались базовый вариант окна без экранов и случаи с одним и двумя теплоотражающими экранами.

В результате проведения многовариантного имитационного трехмерного моделирования были определены локальные значения таких параметров как температура, скорость воздуха, удельный тепловой поток и сопротивление теплопередаче конструкции, построены параметрические поля. Распределение температур в центральной части окна представлено на рисунке 3.

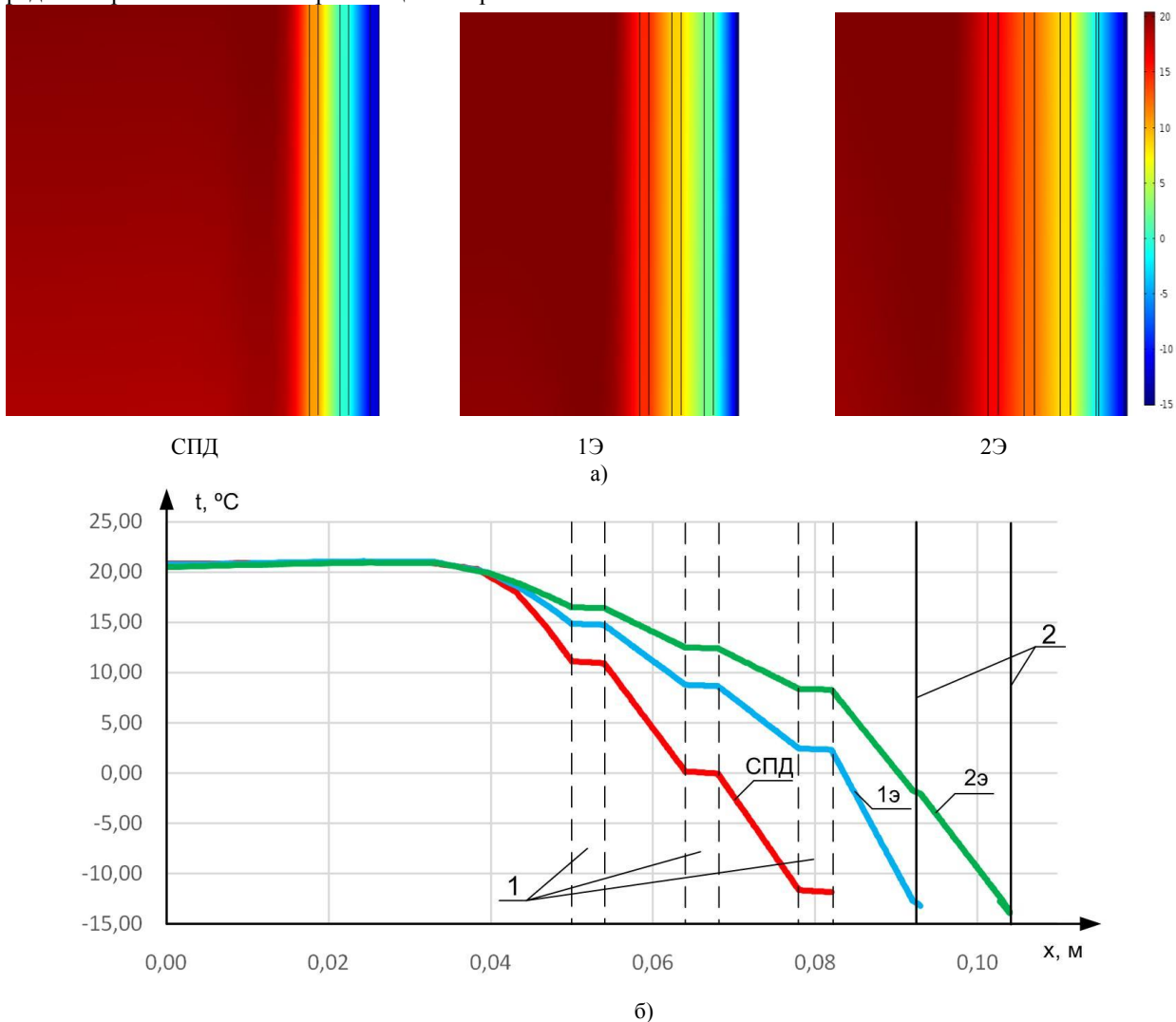


Рис. 3. Температурные поля (а) и графики изменения температур (б) в центральной части двухкамерного стеклопакета (СПД), стеклопакета с одним (1Э) и двумя (2Э) экранами: 1 – стекло 4М1; 2 – металлический экран

Анализ рисунка 3 позволяет сделать вывод о том, что применение со стороны окружающей среды металлических экранов увеличивает температуру на внутренней поверхности стеклопакета с 11 до 17 °С и

понижает на поверхности, обращенной в окружающую среду, с минус 12 до минус 14 °С. Повышение температуры на внутренней поверхности окна при использовании с наружной стороны экранов позволит

обеспечить большой потенциал снижения минимально-допустимой температуры внутреннего воздуха в помещении при применении дежурного режима отопления (при выполнении условия недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций), что приведет к снижению затрат топливно-энергетических ресурсов на поддержание параметров микроклимата. В случае использования экранов наибольшие значения градиента температуры можно отметить в воздушных прослойках, образованных экранами, что связано с их высоким термическим сопротивлением теплопередаче вследствие минимальных значений лучистого теплового потока.

Основная экспериментальная программа по верификации математической модели теплопередачи через оконные блоки с экранами была выполнена в сертифицированной климатической камере испытательной лаборатории АНО «Ивановстройиспытания»

(автономная некоммерческая организация). Климатическая камера АНО «Ивановстройиспытания» изготовлена в соответствии с ГОСТ 26602.1-99 «Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче» [9]. Поверочные аттестационные испытания, выполненные в лаборатории АНО «Ивановстройиспытания» при подтверждении аккредитации лаборатории, показали, что отклонение измеренных значений приведенного сопротивления теплопередаче и теплопроводности от эталонного были не более 4 % (для диапазона температур от минус 40 до +50 °С).

На рисунке 4 представлено сравнение результатов физического эксперимента и численного моделирования процесса теплопередачи через двухкамерный стеклопакет при использовании металлических теплоотражающих экранов, изготовленных из алюминиевой фольги и установленных со стороны окружающей среды.

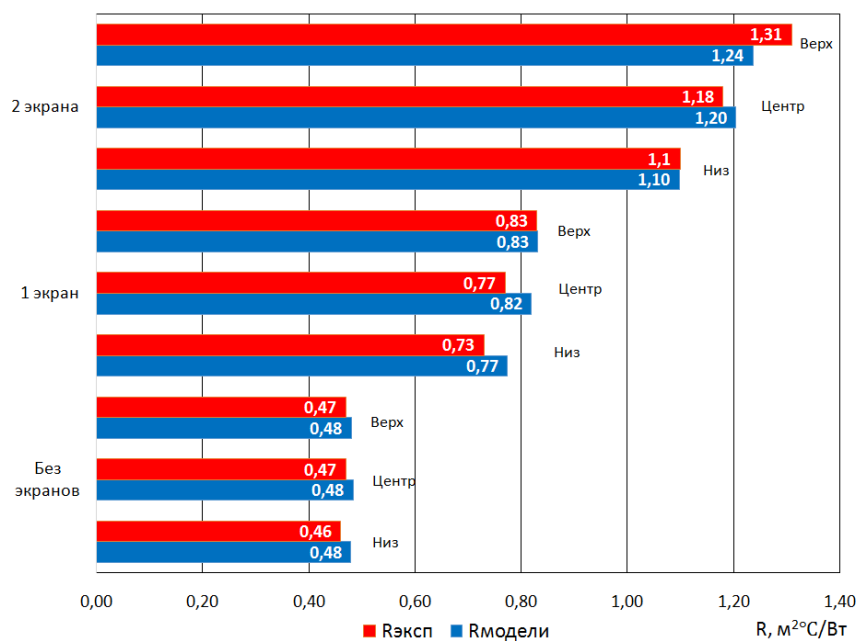


Рис. 4. Сравнение экспериментальных  $R_{\text{эксп}}$  и расчетных  $R_{\text{модели}}$  значений приведенного сопротивления теплопередаче оконного блока по высоте

Относительная погрешность между результатами моделирования в COMSOL и экспериментально полученными данными для 3 вариантов конструкций оконных блоков не превысила 6,4 %. Экспериментальные данные и результаты расчета показывают тенденцию увеличения приведенного сопротивления теплопередаче по высоте оконного блока в случае применения теплоотражающих экранов: при использовании 1 экрана экспериментальные значения сопротивления  $R_0$  увеличивается с 0,73 до 0,83 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 13,6 %), расчетные значения – с 0,77 до 0,83 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 7,8 %); при наличии 2 экранов экспериментальное  $R_0$  возрастает с 1,1 до 1,31 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 19,1 %), расчетное – с 1,10 до 1,24 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или на 11,2 %).

Экспериментальное сопротивление теплопередаче в центральной зоне увеличивается при использовании 2 экранов с 0,47 (без экранов) до 1,18 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или в 2,5 раза), расчетное – с 0,48 до 1,20 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$ ) (или в 2,5 раза).

Были также сопоставлены профили и локальные значения скоростей, а также линий токов в воздушной прослойке с результатами отечественных [10] и зарубежных [11] исследователей, а также справочными значениями из нормативной литературы [12].

В ходе выполнения проверки адекватности двухмерной имитационной модели процесса теплопередачи через оконный блок с экранами путем сопоставления полученных авторами данных с результатами исследований других ученых [10], а также с резуль-



татами экспериментальных исследований в сертифицированной климатической камере, была подтверждена возможность использования разработанной математической модели для определения теплотехнических характеристик данной ограждающей конструкции. Результаты имитационного моделирования теплопередачи через окно использованы при моделировании микроклимата в помещениях с данным типом светопрозрачных ограждающих конструкций.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИЯХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Для снижения затрат ТЭР при организации микроклимата в производственном помещении ремонтно-механического цеха АО "ПСК" (г. Иваново) было предложено в холодный период года в нерабочее и темное время суток использовать экраны в межстекольном пространстве окон и понижение температуры внутреннего воздуха до 5 °С, а в теплый период года – теплоотражающие жалюзи. Было определено, что снижение поступления инсоляции в теплое время года составит 218 ГДж (или 65 %). Совместное использование теплоотражающих экранов в окнах и снижение температуры воздуха внутри помещения в нерабочее время холодного периода года приводит к дополнительному уменьшению тепловых трансмиссионных потерь на 107,6 ГДж (или 53,6%).

Была разработана математическая модель динамического микроклимата для помещений, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачных конструкций с теплоотражающими экранами от температурного режима

эксплуатации, а также генерацию электрической энергии при помощи солнечных батарей. Математическое описание включает уравнение неизоэтермического турбулентного движения несжимаемого вязкого газа (уравнение Навье-Стокса), уравнения неразрывности, переноса энергии.

Динамический микроклимат (ДМ) в рабочее время задавался путем изменения температуры внутреннего воздуха  $t_e(\tau)$  с помощью гармонической функции

$$t_e(\tau) = \bar{t}_e + A_e \cdot \sin(\omega \cdot \tau), \quad (1)$$

где  $\bar{t}_e$  – средняя температура колебаний воздуха при ДМ, °С;  $A_e$  – амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха, °С;  $\omega$  – частота колебания температур, 1/ч.

Для описания турбулентных свойств текучей среды была выбрана  $k-\epsilon$  модель турбулентности.

Количество электрической энергии, генерируемой в солнечных фотоэлектрических батареях (рисунок 1), определялся путем умножения теплового потока от инсоляции, воспринятой энергоэффективным ставнем, во время его использования в светлое время суток, на соответствующий коэффициент преобразования.

Математическая модель динамического микроклимата для помещения тренажера блочного щита управления атомной электрической станцией (БЩУ АЭС), расположенного в ИГЭУ, была реализована в ПВК COMSOL Multiphysics. Геометрическая модель помещения представлена на рисунке 5.

В рабочее время изменение температуры приточного воздуха, подаваемого из воздухораспределителей, было задано по закону гармонических колебаний. В нерабочее время подача воздуха прекращалась и контролировался тепловой режим при остывании помещения и расположенного в нем оборудования (см. рисунок 6).

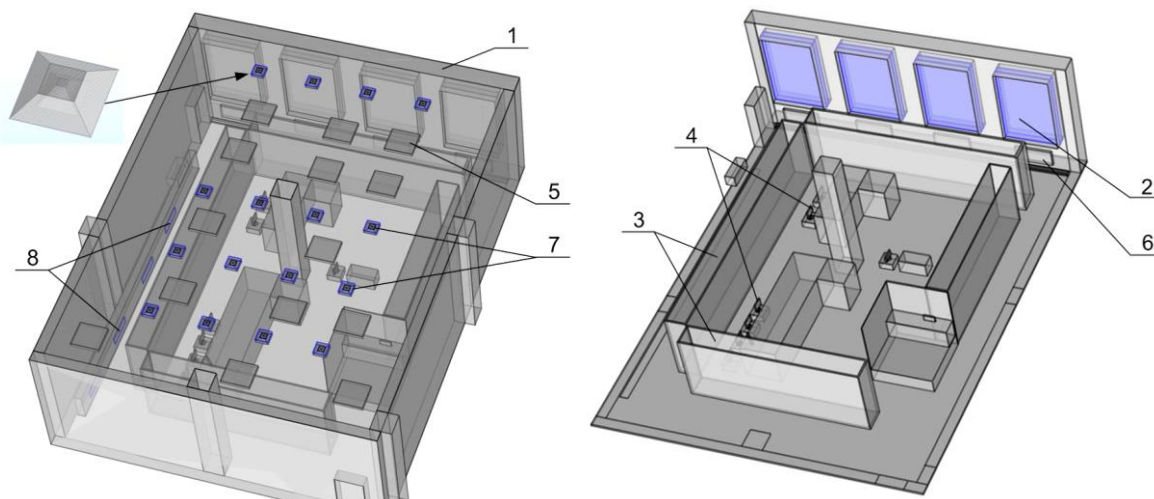


Рис. 5. Геометрическая модель помещения тренажера БЩУ АЭС с размещенным оборудованием и элементами СКВ: 1 – наружная стена; 2 – окна; 3 – блочные щиты управления и индикации; 4 – компьютеры; 5 – осветительные приборы; 6 – отопительные приборы; 7 – воздухораспределители; 8 – вытяжные решетки на вытяжном коллекторе

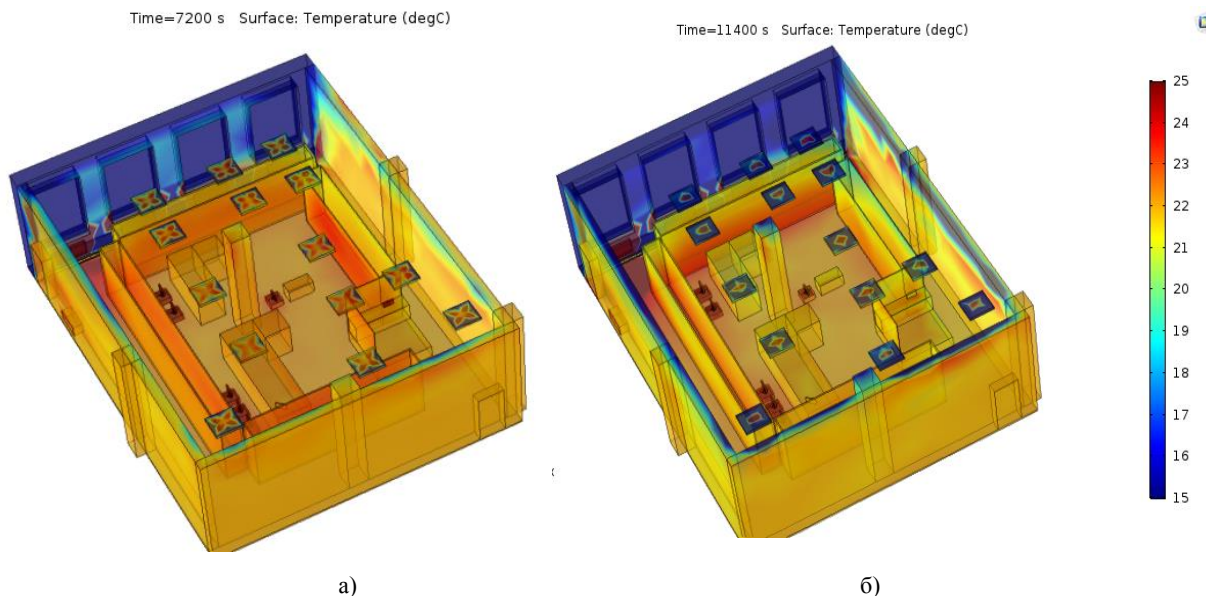


Рис. 6. Динамика остывания поверхностей ограждающих конструкций и оборудования после прекращения работы системы кондиционирования воздуха для условий января: рабочая смена (а) и спустя 70 минут после окончания рабочей смены (3-ий вариант моделирования)

На рисунке 7 представлено распределение линий движения потоков и скоростей воздуха в помещении во время работы СКВ (рабочее время января месяца). Наибольшие скорости воздуха фиксируются в верхней части помещения, а также в области, прилегающей к стене, где расположен вытяжной коллектор. В рабочей зоне помещения

скорость не превышает значения 0,1 м/с, что входит в диапазон оптимальных параметров (не более 0,15 м/с). В области около наружной стены можно отметить минимальные значения скоростей воздуха (не более 0,06 м/с), там расположена так называемая «застойная» зона.

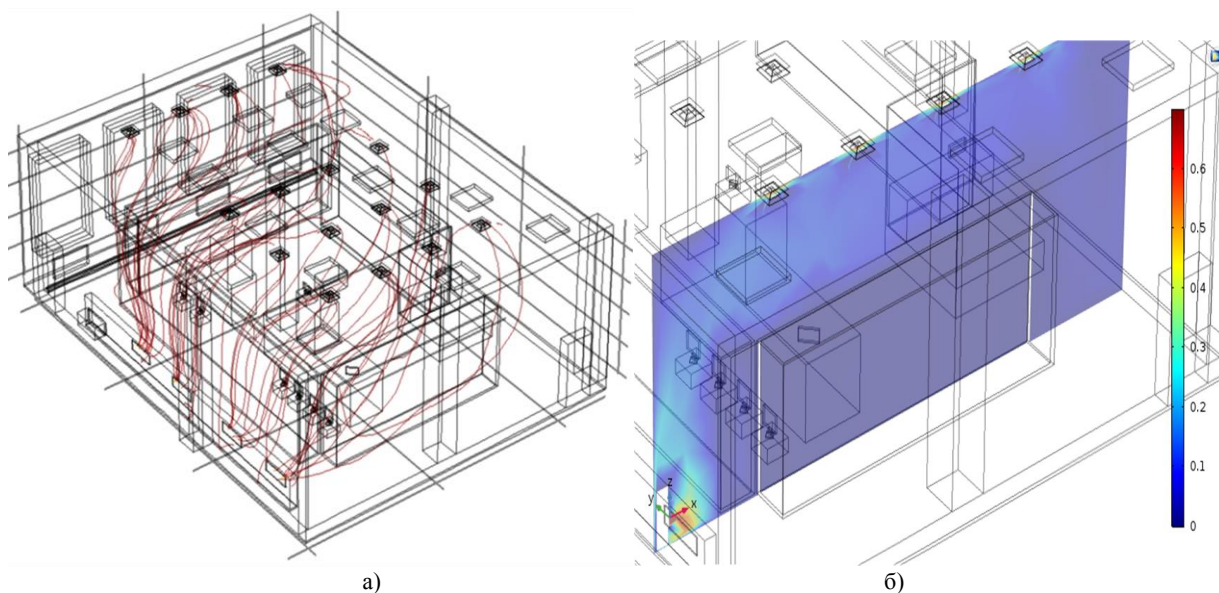


Рис.7 Распределение линий движения потоков (а) и поле скоростей (б)  $v_v$ , м/с, воздуха в сечении

На основании выполненного моделирования были определены годовые затраты теплоты и холода системой кондиционирования воздуха (СКВ) для организации указанного микроклимата (таблица 1) с учетом применения рециркуляции. Было установлено, что с точки зрения энергосбережения самым эффективным вариантом из всех рассмотренных выше является применение энергоэффективного

ставня в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время  $t_{деж}$  до минимальной с предварительной осушкой воздуха. В этом случае потребление теплоты СКВ снизилось на 70,2 %, а выработка электрической энергии в солнечных батареях энергоэффективного ставня составила 1627 кВт·ч за год.

Определение дисконтированного срока окупаемости вариантов реконструкции системы кондиционирования помещения тренажера блочного щита управления АЭС проводилась по состоянию на де-

кабрь 2021 года. Как следует из данных таблицы 1 самый эффективный с точки зрения экономических показателей является четвертый вариант, при котором срок окупаемости составил 4,6 года.

Таблица 1. Сравнение основных показателей эффективности вариантов моделирования динамического микроклимата

№ и краткая характеристика варианта	Годовые затраты теплоты СКВ, ГДж/год (% к базовому вар.)	Годовые затраты холода СКВ, ГДж/год (% к базовому вар.)	Дисконт. срок окупаемости, лет
1. Контрольный вариант	95,6 (100)	36,5 (100)	-
2. Применение ставня в окнах	81,4 (85,1)	35,1 (96,2)	9,4
3. Применение ставня в окнах и понижение температуры в нерабочее время $t_{\text{деж}}$ до минимальной	35,6 (37,2)	35,1 (96,2)	5,1
4. Применение ставня в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время $t_{\text{деж}}$ до минимальной с предварительной осушкой воздуха	28,5 (29,8)	35,1 (96,2)	4,6

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения математического моделирования и экспериментальных исследований в климатической камере было определено, что применение в окнах теплоотражающих экранов, выполненных из алюминиевой фольги, позволяет значительно (в 1,5÷1,8 раза) повысить приведенное сопротивление теплопередаче данной светопрозрачной ограждающей конструкции. Применение энергоэффективного ставня в окнах и понижение температуры воздуха в нерабочее время  $t_{\text{деж}}$  до минимальной с предварительной осушкой воздуха позволяет значительно сократить потребление энергетических ресурсов при организации микроклимата (в том числе и динамического) в помещениях, что в конечном счете приведет к снижению себестоимости и повышению качества продукции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Приказ Минстроя** России от 17.11.2017 г №1550/пр "Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений" (Зарегистрирован в Минюсте России 23.03.2018 г № 50492) (по состоянию на 25.06.2018 г.) [Электронный ресурс].
2. **Прима Л.В., Горелов М.В., Глазов В.С., Фелькер Э.К.** Информационная база данных по оптическим и теплозащитным характеристикам строительных материалов // Энергосбережение – теория и практика: труды Восьмой международной школы-семинара молодых учёных и специалистов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. С. 165-170.
3. **Пророкова М.В.** Повышение эффективности энергосберегающих мероприятий с учетом комфортности микроклимата: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Пророкова Мария Владимировна. Иваново, 2017. 202 с.

4. **Parfenov G.I., Smirnov N.N., Pyzhov V.K., Tyutikov V.V.** Improving the energy efficiency of dynamic air condition systems in buildings with controlled resistance to window heat transfer // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1111. iss. 1. p. 1-6.
5. **Яковлев И.В., Гаряев А.Б., Манчха С.П., Самойленко В.Ю., Парёхина И.В.** Применение теплового насоса для глубокой утилизации теплоты влажного вентиляционного воздуха в бассейне НИУ "МЭИ" // Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ: сборник докладов. М.: 2014. С. 233-239.
6. **Смирнов Н.Н.** Совершенствование систем по созданию динамического микроклимата для помещений с энергоэффективными светопрозрачными конструкциями: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Смирнов Николай Николаевич. Иваново, 2022. 333 с.
7. **Пат. №154163** Российская Федерация, МПК Е 06 В 9/17. Многофункциональный энергоэффективный ставень / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов, Д.А. Лапатеев, Д.С. Трухин, А.А. Яблоков, Ю.С. Колосова. №2014137231/12, заявл. 15.09.2014; опублик. 20.08.2015, бюл. №23.
8. **Solomenko Z.** Heat transfer with radiation in participating media and the discrete ordinates method [Электронный ресурс] / Z. Solomenko. Режим доступа: <https://www.comsol.com/blogs/heat-transfer-in-participating-media-and-the-discrete-ordinates-method>.
9. **ГОСТ 26602.1-99.** Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче. М.: Изд-во ГУП ЦПП, 1999. 32 с.
10. **Голубев С.С.** Численное моделирование сложного теплообмена в стеклопакете с учетом его деформирования // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 47-52.
11. **Wright J.L., Sullivan H.F.** Natural convection in sealed glazing units: a review // ASHRAE Transactions. 1989. Vol. 95. pp. 592-603.
12. **ГОСТ 24866-99.** Стеклопакеты клееные строительного назначения. Технические условия. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000 год. 25 с.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

### АННОТАЦИЯ

Современная вычислительная радиоэлектронная аппаратура имеет большие тепловыделения. Она должна справляться с большим количеством задач, которые выполняются одновременно. Для этого используется несколько процессоров и в каждом процессоре может быть несколько ядер. В данной статье рассматриваются вопросы оптимального расположения тепловыделяющих элементов на электронной плате для минимизации их теплового влияния друг на друга.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Когда мы используем персональный компьютер и запускаем приложения, то приложения могут использовать не один поток, а два. Потоки создаются ядрами в процессоре. И чем больше процессоров и ядер в процессоре, тем больше приложений можно использовать одновременно, тем сильнее нагревается процессор. Особенно значительные тепловыделения имеют суперкомпьютеры, в которых число процессоров значительно больше, чем в бытовых компьютерах. Поток создается активным процессором. Каждый раз когда открывается приложение, оно само создает поток, который будет обрабатывать задачи этого конкретного приложения. Поэтому важной задачей становится при выборе персонального компьютера не только тип процессора, но и количество процессоров и количество ядер в каждом процессоре. В наиболее мощных ПК сейчас может использоваться и 6 и 8 процессоров. Но это увеличивает стоимость ПК и тепловыделения от процессоров. Наиболее популярны модели, где имеются 2 или 4 процессора. Это оптимальное сочетание цены и вычислительных возможностей. В связи с минимизацией размеров ПК и увеличением числа вычислительных мощностей, обостряется проблема перегрева ПК.

### 2. ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ

Очень важно, чтобы тепловыделяющие элементы РЭА не перегревали друг друга. Для этого их нужно разместить на оптимальном расстоянии друг от друга на электронной плате. Вопросы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры имеют решающее значение для её эффективной работы, а так же для экономии энергии на охлаждения. Так как на охлаждение управляющих процессоров затрачивается

большое количество энергии. Оптимальное расположение тепло выделяющих элементов позволяет экономить энергию на охлаждение.

Нами разработана тепловая модель, состоящая из четырех процессоров с внутренними источниками теплоты, которые влияют друг на друга. Произведен расчет температурного поля каждого элемента и результирующего температурного поля для четырех объектов, расположенных на различных расстояниях друг от друга.

Численный эксперимент был произведен для четырех процессоров электронных вычислительных устройств: IntelCorei3 и IntelCorei5

Процессор IntelCorei3 имеет следующие параметры, которые являются входными данными для модели.

Материалы Silicon, PCB 12-layers. Тепловой источник VS Мощность 73W. Цели ГЦМах температура. Время нагрева 7с.

Corei3-540 Частота 3060 СокетLGA 1156 Тепловыделение 73 (W- Ватты)

Описание: Тактовая частота 3067 МГц, Частота шины DMI МГц, Коэффициент умножения 23, Напряжение на ядре 0.65 В

Наборы команд:

Поддержка Hyper-Threading

Инструкции MMX, SSE, SSE2, SSE3, SSE4

Поддержка AMD64/EM64T

Поддержка NX Bit

Поддержка Virtualization Technology

Ядро:

Ядро Clarkdale

Количество ядер 2

Техпроцесс 32 нм

Кэш

Объем кэша L1 64 Кб

Объем кэша L2 512 Кб

Объем кэша L3 4096 Кб

Максимальная рабочая температура 90 °C

Напряжение на ядре 0.65В-1.4В

Процессор IntelCorei3 удобно применять для обработки текстов, электронной почты, и т.д. Мощности процессора Core i3 более чем достаточно, чтобы обрабатывать это всё с легкостью. Процессор Core i3 является 100% и доступным для подавляющего большинства пользователей.

Процессор IntelCorei5 имеет следующие параметры, которые являются входными данными для модели.



Материалы Silicon, PCB 12-layers. Тепловой источник VS Мощность 95W. Цели ГЦМах температура. Время нагрева 7с.

Core i5-750 Частота 2660 Сокет LGA 1156 Тепловыделение 95 (W- Ватты)

Количество ядер	4
Частота	2.66 ГГц
Процессор	64-битный
Частота шины	2500 МГц
Технологический процесс	45 нм

Процессоры Intel Core i5 автоматически распределяют вычислительную мощность туда, где она требуется больше всего. Процессоры данного типа удобно использовать при создании видео в формате HD, записи цифровой музыки, редактировании фотографий, а также в самых современных играх. Процессор Intel Core i5 имеет большие возможности для многозадачной работы.

На первом этапе создания модели проводилось твердотельное моделирование объекта и была создана конструкция, состоящая из четырех элементов, находящихся в корпусе. Твердотельное моделирование было проведено в САПР Solid Works. Solid Works содержит высокоэффективные средства твердотельного моделирования, основывающиеся на постепенном добавлении или вычитании базовых конструктивных тел [1]. Эскиз для получения базового тела может быть построен на произвольной рабочей плоскости. Типовые инструменты для получения базовых тел позволяют выполнить: выдавливание заданного контура с возможностью указания угла наклона образующей; вращение контура вокруг оси; создание твердого тела, ограничиваемого поверхностью перехода между заданными контурами; выдавливание контура вдоль заданной кривой; построение фасок и скруглений различного вида; построение уклонов; создание различного типа отверстий; получение развертки тел равномерной толщины.

Основные методы создания твердого теласочетают в себе также возможность комбинации всех перечисленных способов как при добавлении материала, так и при его снятии.

Результаты твердотельного моделирования для двух процессоров приведены на рисунке 1.

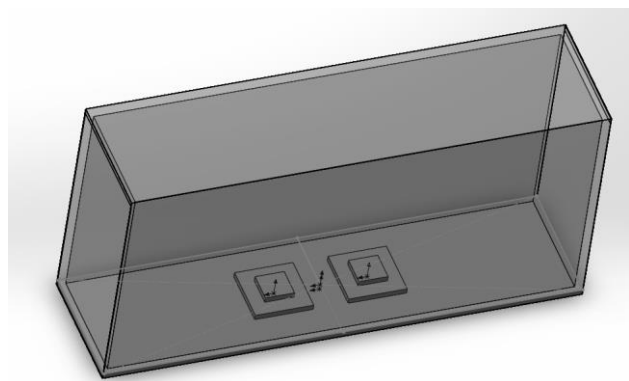


Рис.1 Детали в сборке.

При работе со сборкой, разработчик может по мере необходимости создавать новые детали, определяя их размеры и расположение в пространстве относительно других элементов сборки. Наложённые связи позволяют автоматически перестраивать всю сборку при изменении параметров любой из деталей, входящих в узел. Существует возможность контроля собираемости сборки. Для проектирования изделий, получаемых с помощью сварки, система позволяет выполнить объединение нескольких свариваемых деталей в одну.

### 3. РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МОДЕЛИ

Расчет температурного поля модели проводился в среде FlowSimulation. В качестве исходных данных были заданы следующие величины:

1. – граничные условия 3 рода на внешних стенках;
2. – начальная температура объекта;
3. – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;
4. – удельная мощность поверхностного тепловыделения через единицу площади;
5. – мощность тепловыделения через всю внешнюю поверхность модели [2].

Так же задаются параметры, влияющие на расчетную сетку и критерии завершения расчета, а значит, и на точность решения задачи.

Результаты расчетов для процессора :Intel Core i3, приведены на рисунках 2, 3, 4, 5.

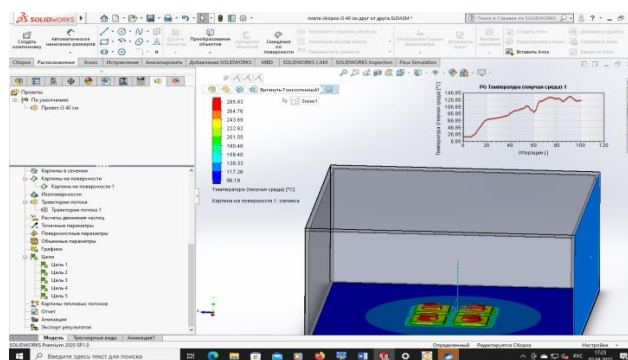


Рис. 2. Расстояние между процессорами 15 мм. Температур в центре между процессорами 146 С

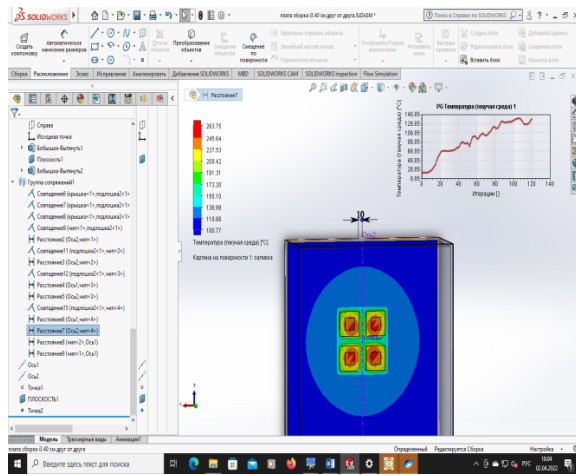


Рис. 3. Расстояние между процессорами 20 мм. Температур в центре между процессорами 146 С

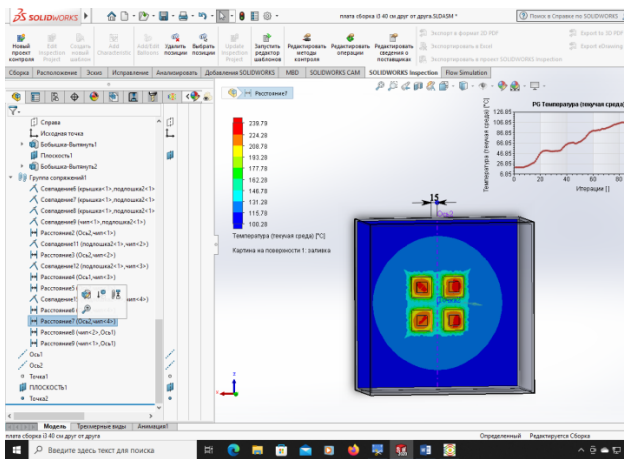


Рис. 4. Расстояние между процессорами 30 мм. Температур в центре между процессорами 128 С

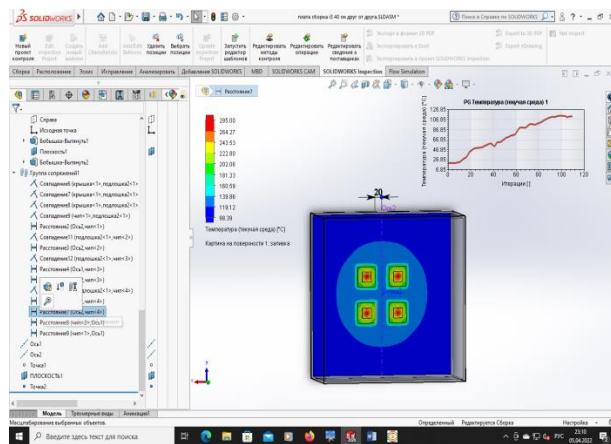


Рис. 5. Расстояние между процессорами 40 мм. Температур в центре между процессорами 110 С

В итоге мы построили график изменения температуры между процессорами в зависимости от расстояния между ними для двух временных слоёв.

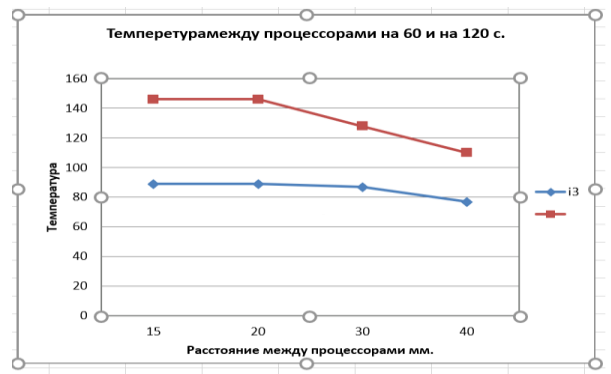


Рис. 6. График изменения температуры между процессорами

В результате можно сделать вывод, что на расстоянии 15 и 20 мм температуры между процессорами почти не изменяются.

Результаты расчетов для процессора Intel Core i5, приведены на рисунках 7, 8, 9, 10 (мощность тепловыделения 95 Вт) [3].

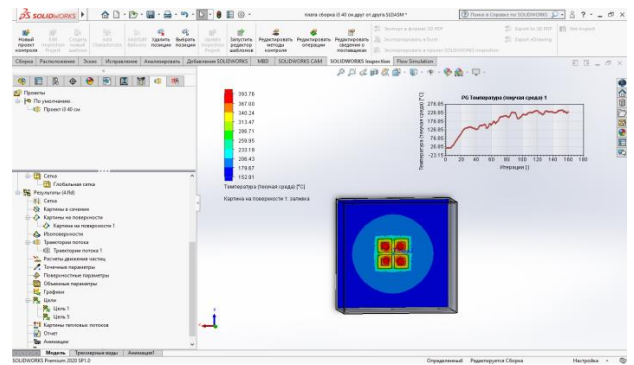


Рис. 7 Расстояние между процессорами 10мм. Температур в центре между процессорами 226 С

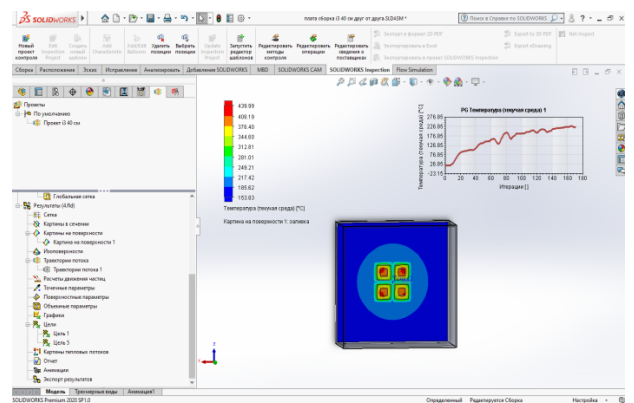


Рис. 8 Расстояние между процессорами 15мм. Температур в центре между процессорами 226 С

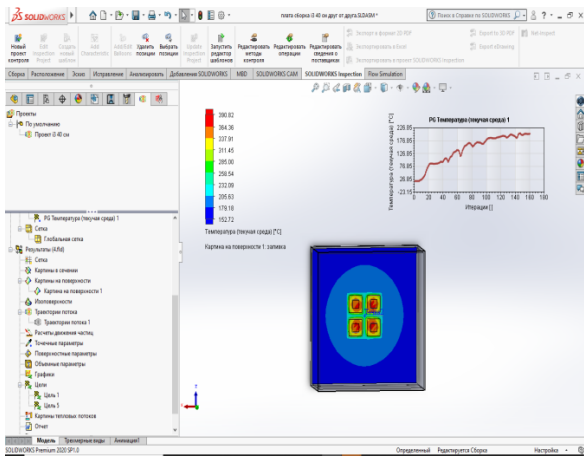


Рис. 9 Расстояние между процессорами 20 мм. Температур в центре между процессорами 190 С

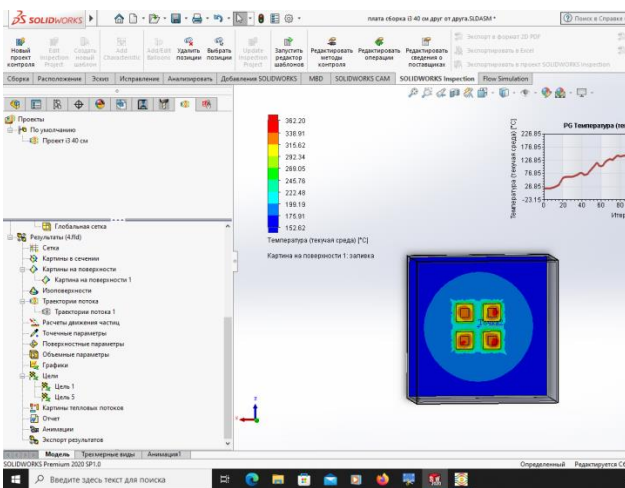


Рис.10 Расстояние между процессорами 30 мм. Температур в центре между процессорами 178 С

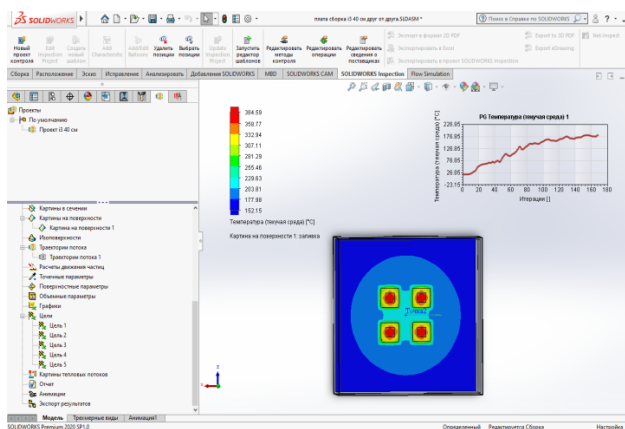


Рис. 11 Расстояние между процессорами 40 мм. Температур в центре между процессорами 178 С

В итоге мы построили график изменения температуры между процессорами Intel Core i5 в зависимости от расстояния между ними.

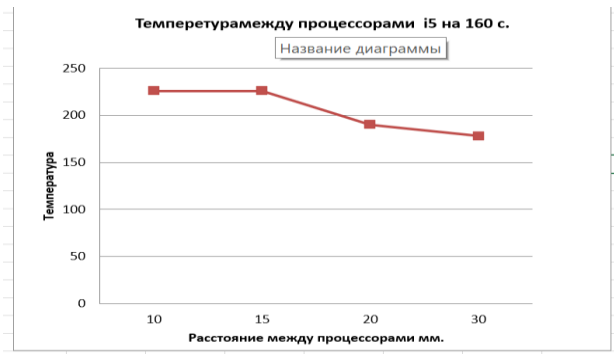


Рис. 12. График изменения температуры между процессорами

#### 4.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам моделирования можно сделать вывод, что температура между процессорами и для Intel Core i3 на расстоянии 15 и 20 мм, а для Intel Core i5 не меняется на расстоянии между процессорами 10 и 15 мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алямовский, А.А. Собачкин А.А., Одинцов Е.В., А.И. Харитонович А.И., Пономарёв Н.Б. SolidWorks 2007/2008 Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт Петербург: БВХ - Петербург, 2008, 543 с. ISBN: 978-5-9457-994-5.
2. Дульнев Г.Н., Польщикова Б.Б. Тепловое моделирование электротехнических устройств //Инж. физ. журн., 1981, №6. – с. 1062-1069.
3. Калинин Е.Н. , Кузнецов В.Б. , Корочкина Е. Е.О моделировании температурных полей процессоров в системах управления текстильного отделочного оборудования (статья).- Сборник материалов SMARTEX 2016, с.294-297.



*О.Б. Колибаба<sup>1</sup>, Д.А. Долинин<sup>1</sup>, Р.Н. Габитов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Россия

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЕЧЕЙ ПИРОЛИЗА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

### **АННОТАЦИЯ**

Долгое время мусоропереработке в нашей стране не уделялось должного внимания, на текущий момент эта отрасль находится на стадии формирования и нуждается в технологиях и оборудовании, позволяющих перерабатывать и утилизировать твердые коммунальные отходы (ТКО), получать товарную продукцию экологически чистым методом и быстро окупать строительные и эксплуатационные издержки.

Предложена конструкция пиролизной печи для утилизации предварительно подготовленных ТКО с получением газообразного топлива, повышающая энергетическую эффективность процесса термической переработки.

По результатам расчета теплового баланса получены КПД пиролизной печи при нагреве с различными скоростями, на основании которых предложен рациональный режим работы установки.

Произведен расчет сокращения выбросов диоксида углерода. Применение пиролизной технологии позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 17% по сравнению с традиционным сжиганием ТКО.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Сложившаяся в Российской Федерации ситуация в области образования, использования, обезвреживания, хранения и захоронения твердых коммунальных отходов приводит к опасному загрязнению окружающей среды, нерациональному использованию природных ресурсов, значительному экономическому ущербу и представляет реальную угрозу здоровью людей.

Практически, одной из основных задач в области охраны окружающей среды является решение проблемы обезвреживания и переработки ТКО, среди которых особую трудность вызывают отходы, образующиеся в жилом секторе из-за сложного морфологического состава и распределенных источников образования.

По данным Росприроднадзора, ежегодно в России образуется порядка 35-40 млн. тонн твердых коммунальных отходов, и практически весь этот объем размещается на полигонах и свалках. Из-за отсутствия необходимой инфраструктуры и предприятий – переработчиков только 4-5% утилизируется другими способами.

Отходы, при их неконтрольном размещении на свалках, негативно воздействуют на окружающую среду, являясь источником поступления вредных химических и биологических веществ в грунтовые и поверхностные воды, атмосферный воздух и почву, создавая угрозу здоровью и жизни населения. Влия-

ние потока ТКО сказывается на глобальных геохимических циклах ряда биофильных элементов, в частности, органического углерода. Так, масса этого элемента, поступающего в окружающую среду с отходами, составляет примерно 85 млн. тон в год, в то время как общий естественный приток углерода в почвенный покров планеты составляет лишь 41.4 млн. тонн в год [1].

В соответствии с «Основами государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденными Президентом Российской Федерации 28.04.2012г. № Пр-1102, основными направлениями обращения с отходами являются: предупреждение и сокращение образования отходов; развитие инфраструктуры их обезвреживания и поэтапное введение запрета на захоронение отходов, не прошедших сортировку и обработку в целях обеспечения экологической безопасности при хранении и захоронении.

В связи с этим, проблема организации промышленной переработки ТКО является актуальной задачей. Именно промышленная переработка, учитывающая требования экологии, ресурсосбережения и экономики и решающая в совокупности вопросы обезвреживания, утилизации и ликвидации твердых отходов, представляет собой кардинальный путь решения проблемы ТКО [2].

Поскольку ТКО могут состоять на три четверти из органических компонентов, то целесообразна их утилизация термическими методами, одним из которых является пиролиз. Термическое обезвреживание отходов по технологии пиролиза заключается в их необратимом химическом изменении под действием повышенной температуры при отсутствии кислорода или при его незначительном количестве, в результате которого образуются пиролизный газ и твердый углеродистый остаток [3]. Преимущество пиролиза по сравнению с непосредственным сжиганием отходов заключается, прежде всего, в его эффективности с точки зрения предотвращения загрязнения окружающей среды [4]. Установки или заводы по переработке ТКО способом пиролиза функционируют в Дании, США, ФРГ, Японии и других странах [5, 6].

К числу наиболее важных инженерно-технических задач, подлежащих решению в целях дальнейшего развития и внедрения технологии пиролиза отходов, следует отнести создание эффективных пиролизных установок для их переработки. В настоящее время существуют разнообразные конструкционные решения пиролизных установок [7, 8].

Любая пиролизная установка содержит набор технологического оборудования, главным элементом которого является реактор (печь) [9].

Предложена конструкция тоннельной печи для пиролизной переработки твердых коммунальных отходов, позволяющая повысить энергетическую эффективность процесса. Принципиальная схема печи показана на рис. 1.

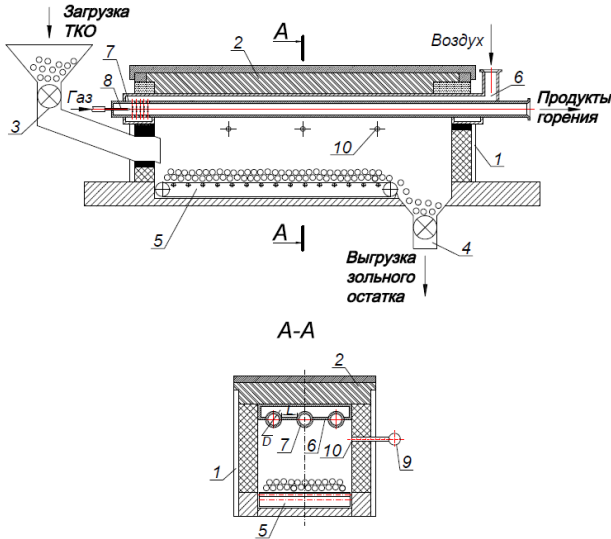


Рис.1. Печь для термической переработки твердых коммунальных отходов: 1 – корпус; 2 – свод; 3 – устройство загрузки; 4 – устройство выгрузки зольного остатка; 5 – конвейер; 6 – recuperативная камера; 7 – радиационные трубы; 8 – горелка; 9 – коллектор пиролизного газа; 10 – патрубки сбора пиролизного газа.

Печь содержит металлический футерованный внутри прямоугольный корпус с теплоизолированным плоским сводом. С одной стороны, установка снабжена устройством загрузки, оснащенный дозатором, с другой – устройством выгрузки зольного остатка. Транспортировка ТКО в течение всего производственного процесса осуществляется ленточным конвейером, обеспечивающим непрерывность технологического процесса термического разложения. Под сводом расположена металлическая recuperативная камера, в которую встроены радиационные трубы [10]. Recuperативная камера, заполненная воздухом, создает воздушную прослойку между теплоизолированным сводом и радиационными трубами, что позволяет существенно снизить тепловые потери от радиационных труб через свод, а, следовательно, сократить расход топлива. Также при этом создаются потоки направленного теплового излучения на слой ТКО, интенсифицирующие пиролиз отходов и повышающие энергетическую эффективность процесса. Организованные лучистые потоки направленного действия воздействуя на слой ТКО, приводят к его термическому разложению с образованием газообразных продуктов (пирогаза) и твердого углеродистого остатка. Пирогаз удаляют из рабочего пространства печи с последующей подачей внешнему потребителю и использованием на собственные нужды установки (сжигание в радиационных трубах). Оставшийся на конвейерной ленте после проведения процесса твердый углеродистый

остаток собирают для последующего использования в технологических целях.

Расчет теплового баланса печи проведен на основании экспериментальных и расчетных данных, представленных в работах [11, 12].

При составлении тепловых балансов принимались допущения [13]:

- 1) масса углеродного остатка составляет не более 15% от первоначальной массы ТКО (по результатам термогравиметрии);
- 2) перед подачей на сжигание пиролизный газ подвергается полной осушке.

## 2. ТЕПЛОВЫЙ БАЛАНС РЕКУПЕРАТИВНОЙ КАМЕРЫ

Recuperативная камера включает в себя радиационные трубы и расположенный над ними под сводом печи воздушный канал. В радиационные трубы подаются пиролизный газ ( $G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$ ) и воздух, предварительно подогретый в воздушном канале ( $G_{\text{возд}}$ ). Имеющие высокую температура продукты горения ( $G_{\text{пг}}$ ) обеспечивают тепловой поток через стенки радиационных труб в камеру пиролиза и в воздушный канал. Структура теплового баланса recuperативной камеры представлены, соответственно, на рис.2.

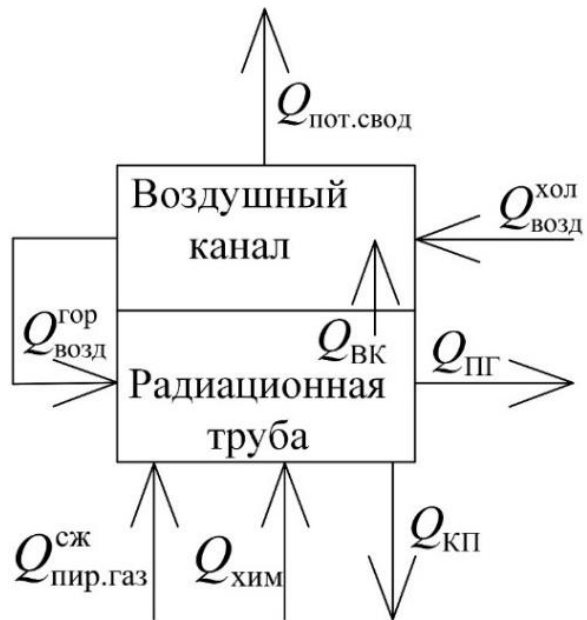


Рис. 2 Тепловой баланс recuperативной камеры

### 2.1. Приходные статьи теплового баланса воздушного канала

1. Физическое тепло воздуха, кВт:

$$Q_{\text{возд}}^{\text{хол}} = G_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}}^{\text{хол}} \cdot t_{\text{возд}}^{\text{хол}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{возд}}$  – расход воздуха, кг/с;  $c_{\text{возд}}^{\text{хол}}$  – удельная теплоемкость холодного воздуха, кДж/(кг°C);  $t_{\text{возд}}^{\text{хол}}$  – температура холодного воздуха, °C.

2. Теплота, переданная через стенки радиационных труб в воздушный канал  $Q_{\text{вк}}$ , кВт, определяется математическим моделированием.

Математическое моделирование теплообменных процессов в рекуперативной камере и камере пиролиза производили с использованием САЕ-пакета конечно-элементного анализа ANSYS.

На рис. 3 изображена геометрическая модель расчетной области рекуперативной камеры и камеры пиролиза.

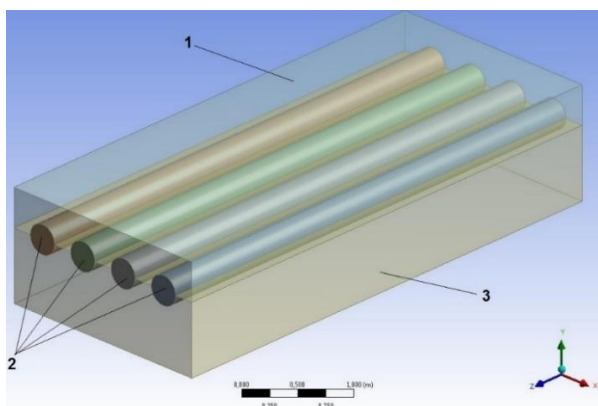


Рис. 3 Геометрическая модель расчетной области: 1 – воздушный канал; 2 – радиационные трубы; 3 – камера пиролиза

Для моделирования газодинамических и теплообменных процессов использовали CFD-модуль ANSYS Fluent. Задачу решали в стационарной постановке. В расчетах учитывали уравнения энергии, неразрывности и движения. Поскольку продукты горения пиролизного газа имеют температуру более 1700°C, то дополнительно учитывали лучистый теплообмен. Турбулентность движения сред разрешалась с помощью  $k-\varepsilon$  модели. В качестве теплоносителей задавали продукты горения пиролизного газа и воздух с соответствующими теплофизическими свойствами. Граничные условия для дымовых газов и воздуха задавали массовыми расходами и температурами на входе и давлением на выходе.

Разработанная модель позволила визуализировать поля скоростей, давлений и температур в различных сечениях и точках расчетной области и получить средние значения тепловых потоков и температур на выбранных поверхностях.

Результаты расчета температурных полей рекуперативной камеры и камеры пиролиза показаны на рис. 4.

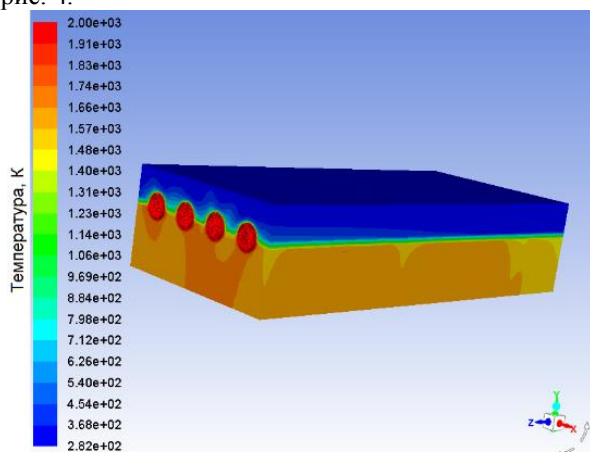


Рис. 4 Температурные поля воздушного пространства, радиационных труб и камеры пиролиза

## 2.2. Расходные статьи теплового баланса воздушного канала

1. Физическое тепло подогретого воздуха, кВт:

$$Q_{\text{возд}}^{\text{гор}} = G_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}}^{\text{гор}} \cdot t_{\text{возд}}^{\text{гор}}, \quad (2)$$

где  $G_{\text{возд}}$  – расход поступающего на горение воздуха, кг/с;  $c_{\text{возд}}^{\text{гор}}$  – удельная теплоемкость подогретого воздуха, кДж/(кг°C);  $t_{\text{возд}}^{\text{гор}}$  – температура подогретого воздуха, °C.

2. Потери тепла в окружающую среду, принятые в количестве 5% от суммы приходных статей баланса, кВт:

$$Q_{\text{пот.свод}} = 0.05 \cdot (Q_{\text{возд}}^{\text{хол}} + Q_{\text{БК}}), \quad (3)$$

## 2.3. Приходные статьи теплового баланса радиационной трубы

1. Химическая теплота пиролизного газа, кВт:

$$Q_{\text{хим}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}, \quad (4)$$

где  $G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$  – расход идущего на горение пиролизного газа, определяемый расчетом, кг/с;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – теплота сгорания пиролизного газа, кДж/кг.

2. Физическая теплота пиролизного газа, кВт:

$$Q_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} = G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} \cdot c_{\text{пир.газ}} \cdot t_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}, \quad (5)$$

где  $c_{\text{пир.газ}}$  – удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°C);  $t_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$  – температура поступающего в радиационную трубу пиролизного газа, °C.

3. Физическая теплота подогретого воздуха  $Q_{\text{возд}}^{\text{гор}}$ , кВт (формула (2)).

## 2.4. Расходные статьи теплового баланса радиационной трубы

1. Потери тепла с продуктами горения, кВт:

$$Q_{\text{пг}} = G_{\text{пг}} \cdot c_{\text{пг}} \cdot t_{\text{пг}}, \quad (6)$$

где  $G_{\text{пг}}$  – расход продуктов горения, кг/с;  $c_{\text{пг}}$  – удельная теплоемкость, кДж/(кг°C);  $t_{\text{пг}}$  – температура, °C.

2. Теплота, переданная через стенки радиационных труб в воздушный канал  $Q_{\text{БК}}$ , кВт, определяется математическим моделированием.

3. Теплоту, переданную из рекуперативной камеры в камеру пиролиза, определяем из уравнения теплового баланса рекуперативной камеры кВт:

$$Q_{\text{КП}} = Q_{\text{хим}} + Q_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}} + Q_{\text{возд}}^{\text{хол}} - Q_{\text{пг}} - Q_{\text{пот.свод}}. \quad (7)$$

## 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС КАМЕРЫ ПИРОЛИЗА

В камеру пиролиза поступают предварительно подготовленные твердые коммунальные отходы ( $G_{\text{ТКО}}$ ). Они частично окисляются кислородом ( $G_{\text{O}_2}$ ) с выделением энергии и разлагаются, образуя

пиролизный газ ( $G_{\text{пир.газ}}$ ) и твердый углеродный остаток ( $G_{\text{ТУО}}$ ). Схема тепловых потоков в зоне пиролиза представлены на рис. 5.

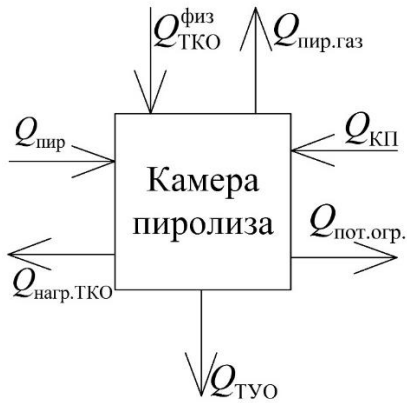


Рис. 5. Тепловой баланс камеры пиролиза в рабочем режиме

### 3.1. Приходные статьи теплового баланса камеры пиролиза

1. Физическое тепло ТКО, кВт:

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} = G_{\text{ТКО}} \cdot c_{\text{ТКО}} \cdot t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}, \quad (8)$$

где  $G_{\text{ТКО}}$  – производительность установки по исходному сырью, кг/с;  $c_{\text{ТКО}}$  – удельная теплоемкость ТКО на входе в зону пиролиза, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}$  – начальная температура ТКО, °C.

2. Теплота химических реакций чистого пиролиза и окисления ТКО, кВт:

$$Q_{\text{пир}} = G_{\text{ТКО}} \cdot q_{\text{пир}}, \quad (9)$$

где  $q_{\text{пир}}$  – тепловой эффект пиролиза, определяемый экспериментально, кДж/кг.

3. Тепло, переданное из рекуперативной камеры в камеру пиролиза –  $Q_{\text{КП}}$  (расчет приведен в тепловом балансе рекуперативной камеры), кВт.

### 3.2. Расходные статьи теплового баланса рекуперативной камеры

1. Теплота, уносимая пиролизным газом из зоны пиролиза, кВт:

$$Q_{\text{пир.газ}} = G_{\text{пир.газ}} \cdot c_{\text{пир.газ}} \cdot t_{\text{пир.газ}}, \quad (10)$$

где  $G_{\text{пир.газ}}$  – расход продуктов горения, кг/с;  $c_{\text{пир.газ}}$  – удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{пир.газ}}$  – температура пиролизного газа, °C.

2. Теплота, уносимая твердым углеродным остатком из зоны пиролиза, кВт.

$$Q_{\text{ТУО}} = G_{\text{ТУО}} \cdot c_{\text{ТУО}} \cdot t_{\text{пир}}^{\text{кон}}, \quad (11)$$

где  $G_{\text{ТУО}}$  – расход твердого углеродного остатка, кг/с;  $c_{\text{ТУО}}$  – удельная теплоемкость твердого углеродного остатка, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{пир}}^{\text{кон}}$  – температура твердого углеродного остатка на выходе из камеры пиролиза, °C.

3. Теплота, необходимая на нагрев ТКО, пиролизного газа и твердого углеродного остатка в процессе пиролиза, кВт:

$$Q_{\text{нагр.ТКО}} = G_{\text{ТКО}} \cdot c_{\text{пир.ТКО}} \cdot (t_{\text{пир}}^{\text{нач}} - t_{\text{ТКО}}^{\text{вх}}) + G_{\text{пир.газ}} \cdot c_{\text{пир.газ}} \cdot (t_{\text{пир}}^{\text{кон}} - t_{\text{пир}}^{\text{нач}}) + G_{\text{ТУО}} \cdot c_{\text{ТУО}} \cdot (t_{\text{пир}}^{\text{кон}} - t_{\text{пир}}^{\text{нач}}), \quad (12)$$

где  $c_{\text{пир.ТКО}}$  – удельная теплоемкость ТКО, кДж/(кг·°C);  $t_{\text{пир}}^{\text{нач}}$  – температура начала процесса пиролиза, °C;  $t_{\text{пир}}^{\text{кон}}$  – температура окончания процесса пиролиза, °C.

4. Потери тепла в окружающую среду, принятые в количестве 5% от суммы приходных статей баланса, кВт:

$$Q_{\text{пот.огр.}} = 0.05 \cdot (Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{КП}}), \quad (13)$$

Уравнение теплового баланса камеры пиролиза имеет вид:

$$Q_{\text{ТКО}}^{\text{физ}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{КП}} = Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{ТУО}} + Q_{\text{нагр.ТКО}} + Q_{\text{пот.огр.}} \quad (14)$$

На рис.5 показана схема тепловых потоков по всей установке в целом.

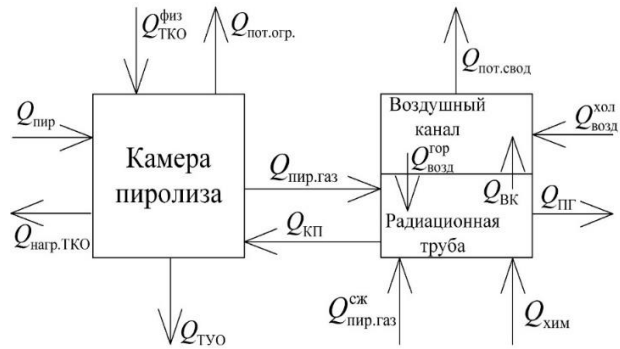


Рис. 5 Тепловой баланс установки

Для расчета термического КПД установки использована формула [14]:

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_{\text{пот.ТКО}}}{Q_{\text{хим}} + Q_{\text{пир}} + Q_{\text{возд}}^{\text{хол}}}, \quad (15)$$

где  $\sum Q_{\text{пот.ТКО}}$  – потери теплоты в процессе переработки ТКО, кВт:

$$\sum Q_{\text{пот.ТКО}} = Q_{\text{пг}} + Q_{\text{ТУО}} + Q_{\text{нагр.ТКО}} + Q_{\text{пир.газ}} + Q_{\text{пот.огр.}} + Q_{\text{пот.свод}} \quad (16)$$

Расчет теплового баланса и КПД установки при скоростях нагрева ТКО 5°С/мин, 10°С/мин и 15°С/мин производили для печи, имеющей следующие конструктивные характеристики:

- размеры рабочего пространства 5x2x0.7 м;
- высота слоя ТКО – 0.5 м;
- емкость печи по ТКО – 1000 кг;
- радиационная труба Ø324x4 мм;
- количество радиационных труб – 4 шт;

Расчет выполнен по формулам (1) – (16) с использованием результатов исследований, представленных в работе [15].

В табл. 1 приведены основные результаты расчетов.

**Таблица 1. Расчетные параметры работы пиролизной печи**

Скорость нагрева ТКО, °С/мин	Теплота сгорания пиролизного газа $Q_n^p$ , МДж/кг	Тепловой эффект пиролиза ТКО, кДж/кг	Температура горения пиролизного газа, °С	Термический КПД
5	17.98	7969	1960	0.48
10	14.39	8976	2060	0.51
15	12.68	1769	2116	0.26

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что максимальный КПД печи, равный 0.51, имеет место при скорости нагрева 10°С/мин. Этот режим характеризуется наибольшим тепловым эффектом пиролиза. Увеличение скорости нагрева до 15°С/мин приводит к значительному снижению КПД установки до 0.26.

В связи с тем, что в настоящее время важным направлением экологической политики развитых стран является декарбонизация экономики и энергетических систем, то расчет экологического эффекта будем производить путем сравнения количества выбросов CO<sub>2</sub> для двух способов обращения с ТКО – сжигание и пиролиз в предложенной пиролизной печи [15].

Согласно данным [16], 1 т ТКО содержит 0.85 т углерода, и при ее сжигании (полном окислении) образуется 1.76 т CO<sub>2</sub>.

В случае пиролиза из 1 т ТКО образуется 15% или 150 кг твердого углеродного остатка. По данным энергодисперсионного анализа [17] углеродный остаток содержит 66% углерода. Таким образом, при переработке 1 т ТКО методом пиролиза в углеродном остатке будет содержаться 0.85·0.15·0.66=0.084 т углерода.

В пересчете на CO<sub>2</sub> это будет составлять 0,084·3.66=0.307 т.

Таким образом, использование пиролизной технологии позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 307 кг с каждой тонны исходных ТКО (табл. 2).

**Таблица 2. Сравнение выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании и пиролизе ТКО**

	Сжигание ТКО	Пиролиз
Выход CO <sub>2</sub> на 1 т исходных ТКО, т	1760	1453

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена конструкция пиролизной печи для утилизации предварительно подготовленных ТКО с получением газообразного топлива, повышающая энергетическую эффективность процесса переработки.

2. По результатам расчета теплового баланса получены КПД пиролизной печи при нагреве ТКО

со скоростями 5, 10 и 15°С/мин, на основании которых предложен рациональный режим работы установки, характеризующийся скоростью 10°С/мин.

3. Произведен расчет сокращения выбросов диоксида углерода. Применение пиролизной технологии позволит сократить выбросы CO<sub>2</sub> на 17% по сравнению с традиционным сжиганием ТКО.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ТКО – твердые коммунальные отходы;  
 $G_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$  – расход подаваемого в радиационные трубы пиролизного газа, кг/с;  
 $G_{\text{возд}}$  – расход подогретого воздуха, кг/с;  
 $G_{\text{пр}}$  – расход продуктов горения, кг/с;  
 $c_{\text{возд}}^{\text{хол}}$  – удельная теплоемкость холодного воздуха, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{возд}}^{\text{хол}}$  – температура холодного воздуха, °С;  
 $Q_{\text{вк}}$  – теплота, переданная через стенки радиационных труб в воздушный канал, кВт;  
 $Q_{\text{возд}}^{\text{гор}}$  – физическое тепло подогретого воздуха, кВт;  
 $c_{\text{возд}}^{\text{гор}}$  – удельная теплоемкость подогретого воздуха, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{возд}}^{\text{гор}}$  – температура подогретого воздуха, °С;  
 $Q_{\text{пот.свод}}$  – потери тепла в рекуперативной камере, кВт;  
 $Q_{\text{хим}}$  – химическая теплота пиролизного газа, кВт;  
 $Q_n^p$  – теплота сгорания пиролизного газа, кДж/кг;  
 $Q_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$  – физическая теплота пиролизного газа, кВт;  
 $c_{\text{пир.газ}}$  – удельная теплоемкость пиролизного газа, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{пир.газ}}^{\text{сж}}$  – температура поступающего в радиационную трубу пиролизного газа, °С;  
 $Q_{\text{пр}}$  – потери тепла с продуктами горения, кВт;  
 $c_{\text{пр}}$  – удельная теплоемкость продуктов горения, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{пр}}$  – температура продуктов горения, °С;  
 $G_{\text{ТКО}}$  – производительность установки по исходному сырью, кг/с;  
 $c_{\text{ТКО}}$  – удельная теплоемкость ТКО на входе в зону пиролиза, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{ТКО}}^{\text{ис}}$  – начальная температура ТКО, °С;  
 $Q_{\text{пир}}$  – теплота химических реакций чистого пиролиза и окисления ТКО, кВт;  
 $q_{\text{пир}}$  – тепловой эффект пиролиза, кДж/кг;  
 $Q_{\text{пир.газ}}$  – теплота, уносимая пиролизным газом из зоны пиролиза, кВт;  
 $G_{\text{пир.газ}}$  – расход продуктов горения, кг/с;  
 $t_{\text{пир.газ}}$  – температура пиролизного газа, °С;  
 $Q_{\text{ТУО}}$  – теплота, уносимая твердым углеродным остатком из зоны пиролиза, кВт;  
 $G_{\text{ТУО}}$  – расход твердого углеродного остатка, кг/с;  
 $c_{\text{ТУО}}$  – удельная теплоемкость твердого углеродного остатка, кДж/(кг°С);

$t_{\text{пир.кон}}$  – температура твердого углеродного остатка на выходе из камеры пиролиза, °С;  
 $Q_{\text{нагр.ТКО}}$  – теплота, необходимая на нагрев ТКО, пиролизного газа и твердого углеродного остатка в процессе пиролиза, кВт;  
 $c_{\text{пир.ТКО}}$  – удельная теплоемкость ТКО, кДж/(кг°С);  
 $t_{\text{пир}}^{\text{нач}}$  – температура начала процесса пиролиза, °С;  
 $t_{\text{пир}}^{\text{кон}}$  – температура окончания процесса пиролиза, °С.  
 $Q_{\text{пот.огр.}}$  – потери тепла в радиационной трубе, кВт;  
 $\eta$  – термического КПД установки;  
 $\sum Q_{\text{пот.ТКО}}$  – потери теплоты в процессе переработки ТКО, кВт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Громова Н.Ю., Салова Т.Ю. Техногенные системы и экологический риск // СПб: СПбГПУ. – 2011. – 305 с.
- Березюк М.В., Румянцева А.В. Новая система управления ТКО: инновационный подход // Инновационное развитие экономики: научно-практический и теоретический журнал № 5 (35). – 2016. – С.19-29.
- Basu, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory / P. Basu // Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA. – 2010. – 365 p.
- Шубов Л.Я. Термические процессы в технологиях переработки твердых бытовых отходов: аналитическая оценка и практические рекомендации/ Л.Я. Шубов, Л.Г. Федоров, Р.В. Залепухин, В.Ф. Кроткова // ВИНТИ, Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – М. – 1998, № 5. – С. 33 – 97.
- Трушников К.А. Мировые тренды в организации услуг по утилизации твердых коммунальных отходов // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами. Материалы Восьмой международной научно-практической конференции. – Новокузнецк. – 2019. – С.138 – 141.
- Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. / Под ред. С. Соуфера, О. Заборски. – М.: Мир, 1985. – 386 с.
- Севрюкова Е.А., Пономаренко Н.В. Технологические аспекты комплексной утилизации твердых бытовых отходов методом высокотемпературного пиролиза // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы повышения эффективности производств микроэлектроники». – Москва. – 2016. – С. 71 – 77.
- Гунич С.В., Янчуковская Е.В., Днепровская Н.И. Анализ современных методов переработки твердых бытовых отходов // Известия вузов. прикладная химия и биотехнология. – 2015. – №2. – С. 110 – 115.
- Власов О.А. Мечев В.В. Анализ работы печей сжигания отходов / О.А. Власов, В.В. Мечев // Твёрдые бытовые отходы. – 2017. – №8. – С. 40 – 43.
- Еринов А.Е., Семернин А.М. Промышленные печи с радиационными трубами // М.: Металлургия, 1977. – 280 с.
- Колибаба О.Б., Габитов Р.Н., Аксенчик К.В., Артемьева В.А. Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 3. – С. 14-19. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.014.
- Долинин Д.А. Колибаба О.Б., Сокольский А.И., Габитов Р.Н. Экспериментальное исследование процесса термической деструкции твердых коммунальных отходов // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сб. науч. трудов Междунар. научно-технического симпозиума. – Киров: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина». 2021. – Т.1. – С.182–186. DOI: 10.37816/eeste-2021-1-182-186.
- Kolibaba O.B., Sokolskiy A.I., Gabitov R.N. Research of the pyrolysis of municipal solid waste aimed at improving the efficiency of thermal reactors // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2017, Vol. 18, issue 2. pp. 147–160. DOI: 10.1615/InterJenerCleanEnv.2017020368.
- Шубов Л.Я. Ставровский М.Е., Шехирев Д.В. Технологии отходов // ГОУВПО «МГУС». – М., 2006. – 410 с.
- Габитов Р.Н., Колибаба О.Б., Сокольский А.И., Грошева А.В. Разработка конструкции печи для утилизации твердых отходов и оценка эффективности ее работы // Вестник ИГЭУ. – 2019. – №5. – С.23 – 30.
- Глебова А.Г., Данеева Ю.О. Адаптация российской энергетики к декарбонизации мировой экономики. Экономика. Налоги. Право. 2021;14(4):48-55. DOI: 10.26794/1999-849X-2021-14-4-48-55.
- Колибаба О.Б., Долинин Д.А., Рузанов И.А. Использование твердых продуктов пиролиза в теплотехнологии производства керамики // «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»: Междунар. науч.-техн. конф. (XXI Бенардосовские чтения) (2-4 июня 2021 г., Иваново). Мат. конф. В 3-х тт. Т.2. – Иваново: ФГБОУ ВО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», 2021. С. 267–270.



А.А. Кобзева<sup>1</sup>, С.К. Ву<sup>2</sup>, В.С. Глазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup> Ханойский национальный педагогический университет  
«HNUE», Вьетнам

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ В КАНАЛЕ, СТЕНКИ КОТОРОГО ИМЕЮТ РАЗНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ИНТЕНСИФИКАТОРЫ ТЕПЛООБМЕНА

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты численного моделирования теплообмена в вентилируемом канале наружного ограждения высокотемпературной установки, который содержит луночные интенсификаторы теплообмена на горячей стороне. Установлено, что на холодной (гладкой) стороне канала локальный коэффициент теплоотдачи изменяется волнообразно и имеет большие значения по сравнению с аналогичным каналом, но без интенсификаторов теплообмена.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения теплоотдачи от теплопередающей поверхности применяются различные методы интенсификации теплообмена, которые в основном делятся на активные и пассивные [1]. Различие двух этих методов заключается в том, что пассивные методы не требуют внешнего подвода энергии. Увеличение теплопередачи происходит за счет увеличения площади поверхности теплообмена или изменения ее геометрических параметров. В качестве активных методов интенсификации применяются:

- 4) Механическое перемешивание;
- 5) Вибрация поверхности;
- 6) Пульсация потока;
- 7) Электростатическое поле;
- 8) Инжекция;
- 9) Струйные аппараты.

К пассивным методам интенсификации теплообмена относятся:

- 1) Шероховатость поверхности;
- 2) Обработанные или текстурированные поверхности;
- 3) Развитие поверхности;
- 4) Перемешивающиеся устройства;
- 5) Устройства, закручивающие поток;
- 6) Змеевики;
- 7) Устройства поверхностного натяжения;
- 8) Добавки для жидкости;
- 9) Добавки для газов.

В нашей работе рассматривается пассивный метод интенсификации теплообмена с помощью развития поверхности. К таким интенсификаторам теплообмена относятся вогнутые/выпуклые лунки и ребра различной формы.

В работах И.А. Попова приводятся исследования теплоотдачи в канале с луночными интенсификаторами теплообмена, однако в его работах температуры стенок канала одинаковы.

На основании выше изложенного, **цель** данной работы заключается в определении характерных особенностей / закономерности изменения локального коэффициента теплоотдачи в вентилируемом канале высокотемпературной установки (ВТУ), имеющем интенсификаторы теплообмена на его горячей стороне.

### 2. ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ВЕНТИЛИРУЕМОГО КАНАЛА ПРИ НАЛИЧИЕ ЛУНОЧНЫХ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ НА ЕГО ГОРЯЧЕЙ СТОРОНЕ

На рис. 1 представлены два варианта (*а* и *б*) конструкции вентилируемого канала в наружном ограждении ВТУ, отличающиеся видом рельефа на его теплообменных поверхностях.

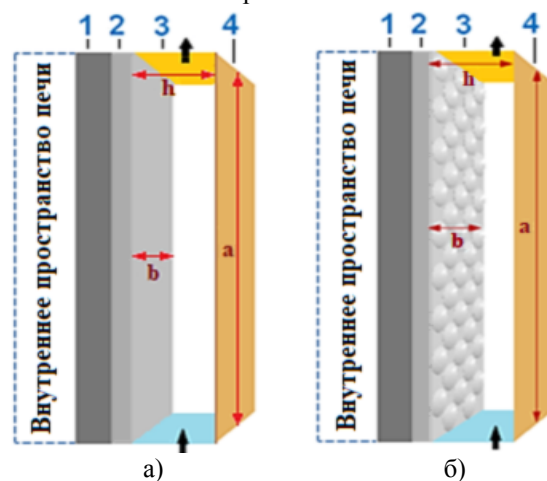


Рис. 1. Варианты конструкций вентилируемого канала в наружном ограждении ВТУ: 1 - огнеупорный слой; 2 - теплоизоляционный слой, содержащий луночные интенсификаторы теплообмена; 3 - воздушный зазор; 4 – кожух

Численное моделирование теплообмена для двух указанных вариантов выполнено в программе PHOENICS-2020. Были использованы модель турбулентности Chen-Kim  $k\epsilon$  и модуль для расчёта излучения Immersol.

В обоих вариантах на наружной поверхности кожуха ВТУ были заданы граничные условия 3-го

рода, учитывающие температуру внешней среды  $t_{oc}=15^{\circ}\text{C}$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{oc}=6 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$ .

В зоне контакта огнеупорного и теплоизоляционного слоёв заданы идеальные условия сопряжения (равенство температур и тепловых потоков), а также условие "прилипания" (нулевая скорость воздуха в зоне его контакта с обмуровкой и кожухом). На внутренней поверхности футеровки применены граничные условия 1-го рода ( $1500^{\circ}\text{C}$ ).

Т.к. в программе PHOENICS используется метод

контрольного объема, который лучше всего работает с прямоугольной сеткой, то при её построении был использован метод Cut-cell. Необходимое количество ячеек сетки устанавливалось исходя из мощности компьютера, наименьшего времени расчета, обеспечивающего сходимость вычислительного процесса и допустимую погрешность искомых величин.

Геометрические параметры канала и теплотехнические характеристики материалов, использованных в наружном ограждении ВТУ представлены в табл. 1.

**Таблица 1. Теплотехнические параметры конструкции наружного ограждения ВТУ**

Элемент конструкции	Теплотехнический параметр
Кожух	Алюминий; толщина $\delta_{Al}=0,001 \text{ м}$ ; коэффициент теплопроводности $\lambda_{Al}=236 \text{ Вт/м/К}$ ; удельная массовая теплоёмкость $c_{p,Al}=904 \text{ Дж/кг/К}$ ; степень черноты $\epsilon_{Al}=0,29$ .
Обмуровка	<b>1 слой:</b> Циркон; толщина $\delta_{Ц}=0,02 \text{ м}$ ; коэффициент теплопроводности $\lambda_{Ц}=1,3+0,64 \cdot 10^{-3} t_{cp} \text{ Вт/м/К}$ ; удельная массовая теплоёмкость $c_{p,Ц}=630+0,13 t_{cp} \text{ Дж/кг/К}$ ; плотность $\rho_{Al}=(3,48 \div 3,83) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; степень черноты $\epsilon_{Ц}=0,52 \div 0,8$ . <b>2 слой:</b> Муллит; толщина $\delta_{М}=0,012 \text{ м}$ ; коэффициент теплопроводности $\lambda_{М}=1,12+0,445 \cdot 10^{-3} t_{cp} \text{ Вт/м/К}$ ; удельная массовая теплоёмкость $c_{p,М}=835+0,21 t_{cp} \text{ Дж/кг/К}$ ; плотность $\rho_{М}=(2,34-2,52) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ; степень черноты $\epsilon_{М}=0,8 \div 0,85$ . <b>3 слой - воздушный канал:</b> длина $a=0,533 \text{ м}$ ; ширина $b=0,161 \text{ м}$ ; высота $h=0,012 \text{ м}$ ; Температура внутренней поверхности обмуровки $t_{вн}=1500^{\circ}\text{C}$ ;
Интенсификаторы	Лунки в шахматном порядке; глубина $h_l=0,01 \text{ м}$ ; печатный диаметр $d_l=0,04 \text{ м}$ ; плотность расположения $f=\pi d_l^2/S_1/S_2=0,69$ ; поперечный и продольный шаги расположения лунок $S_1=S_2=30,176$ .
Воздух на входе в канал	Объемный расход $V_{air}=0,04025 \text{ м}^3/\text{с}$ ; $t'_{air}=20^{\circ}\text{C}$ .
Внешняя среда	Температура $t_{oc}=15^{\circ}\text{C}$

На рис. 2-5 представлены результаты численного моделирования в программе PHOENICS для двух

вариантов конструкции каналов в наружном ограждении ВТУ.

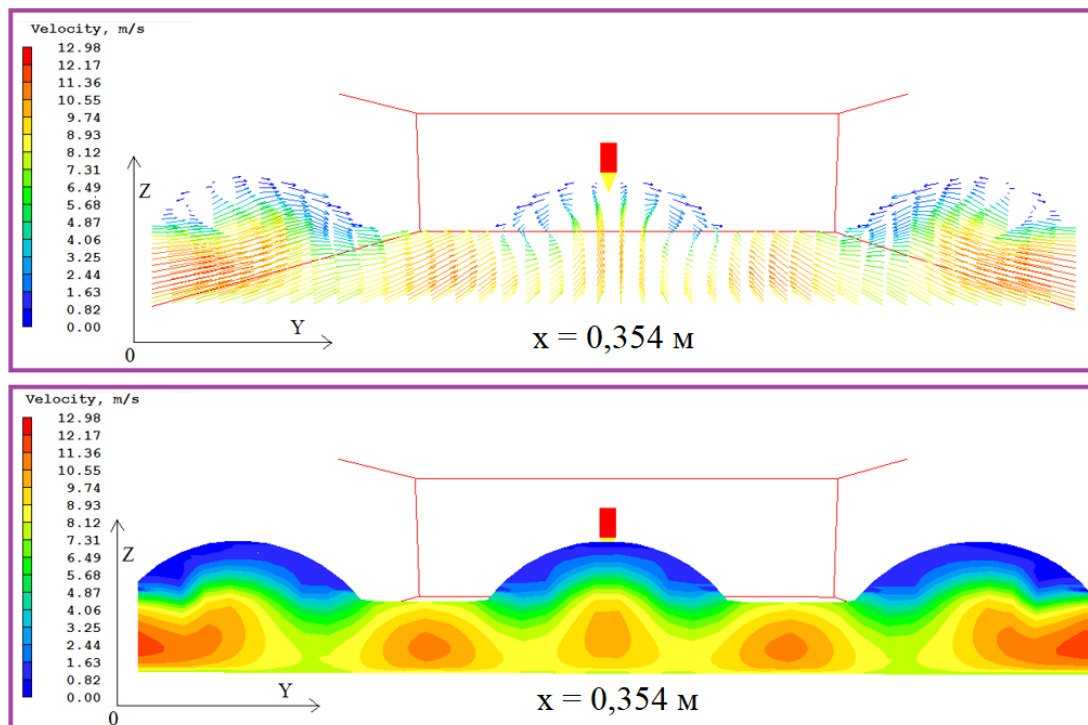


Рис. 2. Поле скоростей в срединном поперечном сечении исследуемого канала

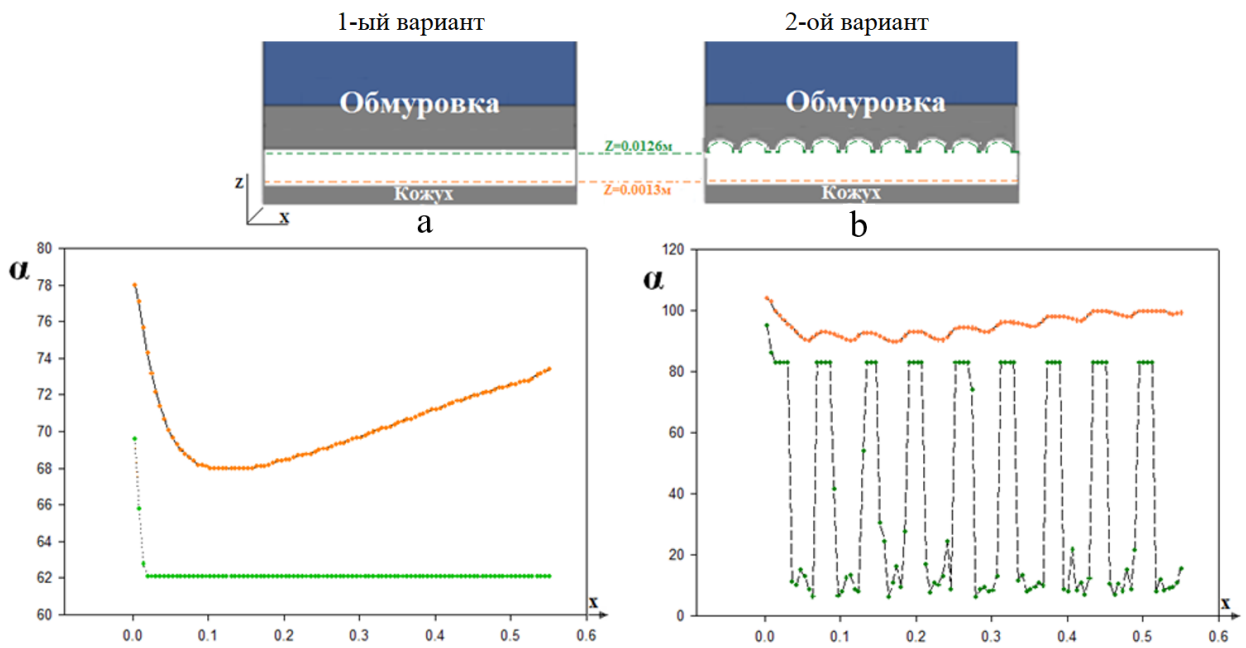


Рис. 3. Изменение локального коэффициента теплопередачи в канале ВТУ при отсутствии лучных интенсификаторов теплообмена (а) и при их наличии (б)

Анализ структуры воздушного потока в каналах рассмотренных вариантов наружного ограждения, показал, что в отличие от 1-го варианта, во 2-м варианте наблюдается возвратное движение воздуха в углублениях, расположенных на наружной поверхности обмуровки, а также ячеестое и циркуляционное движение воздуха в углублениях и между ними (рис. 2). Максимальная скорость воздуха наблюдается на выходе из лунки в области, непосредственно прилегающей к ней. Температура воздуха изменяется волнообразно, увеличиваясь в направлении движения воздушного потока. Более высокие её значения наблюдаются сразу за лункой, т.е. там, где высокая теплоотдача. Температура воздуха в канале 2-го варианта всегда выше, чем в канале 1-го варианта.

На рис. 3а представлено локальное изменение величины КТО в канале без лучных интенсификаторов. Температура вдоль канала со стороны кожуха (оранжевые линии) меньше температуры со стороны обмуровки ВТУ (зеленые линии). Как видно из графика, КТО со стороны кожуха ВТУ выше, чем КТО со стороны обмуровки. Вдоль оси  $Ox$  КТО со стороны кожуха снижается, но при расстоянии  $x=0,12$  м начинает увеличиваться.

При наличии лучных интенсификаторов вдоль горячей стороны канала, коэффициент теплоотдачи изменяется волнообразно и имеет большие значения, чем в аналогичном канале без поверхностных интенсификаторов теплообмена (см рис. 3б).

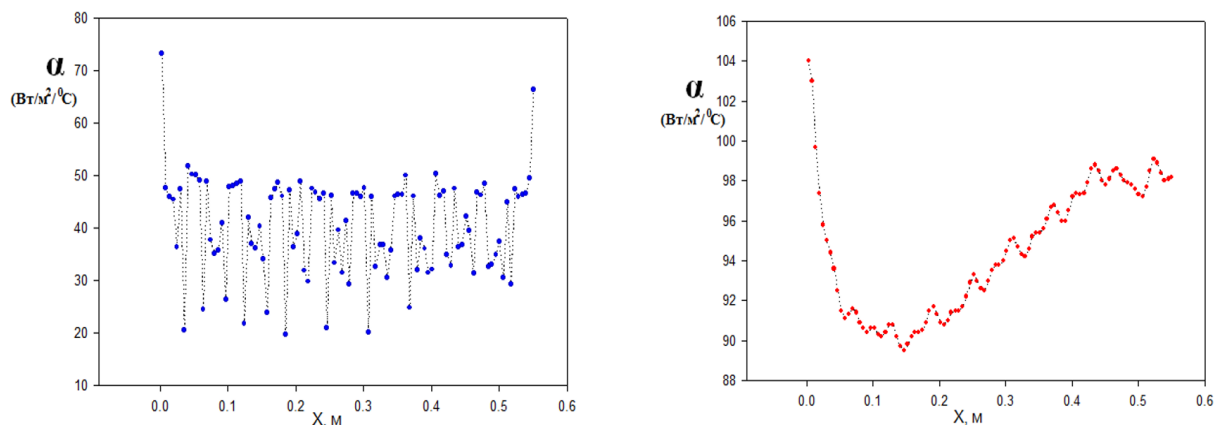


Рис. 4 Изменение локального коэффициента теплоотдачи обмуровки с лучными интенсификаторами теплообмена ( $z=0,0127\div 0,0228$  м) и гладкого кожуха ( $z=0,001316$  м) по ширине ( $y=0,0523\div 0,109$  м) и вдоль ( $x=0\div 0,553$  м) канала

Сопоставляя КТО со стороны обмуровки ВТУ, то при отсутствии лунок КТО изменяется в интервале от  $78 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  до  $68 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , а при их наличии в интервале от  $105 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  до  $85 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Если же рассматривать локальное изменение КТО с холодной

стороны кожуха ВТУ, то при отсутствии лунок КТО изменяется в интервале от  $68 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  до  $62 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , а при их наличии в интервале от  $92 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  до  $8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

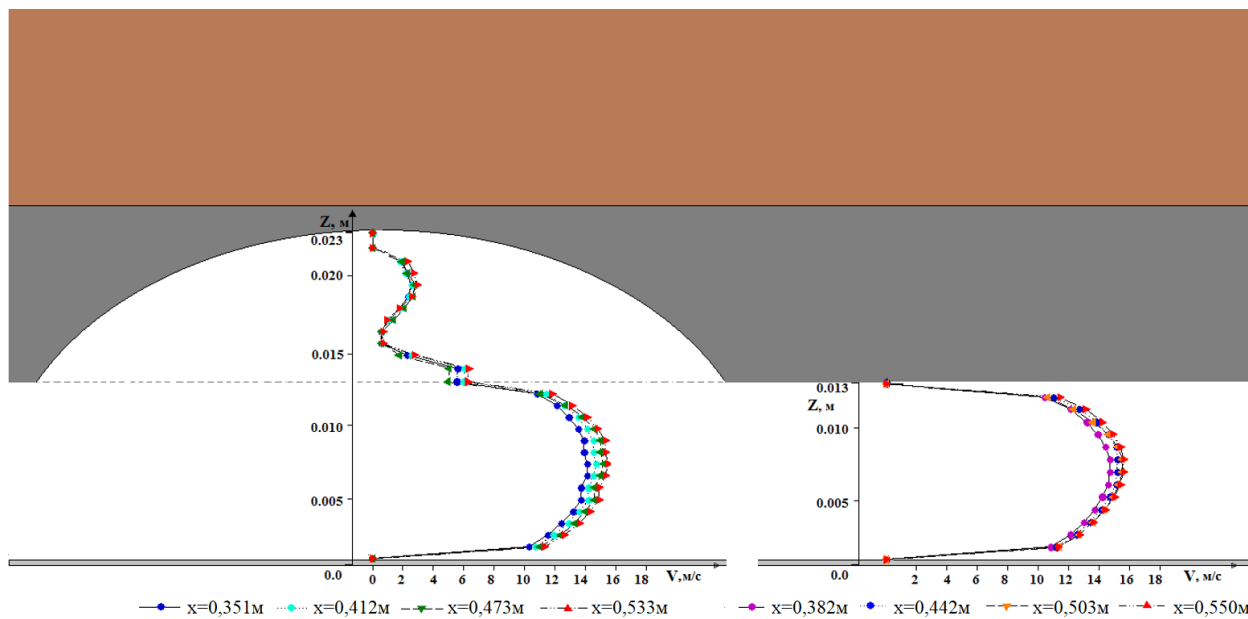


Рис. 5. Профиль скорости воздуха по центру сечения лунки и между лунками

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения энергетической эффективности ВТУ имеет смысл в вентилируемых каналах, расположенных между обмуровкой и кожухом, использовать лучочные интенсификаторы теплообмена. Это повысит температуру воздуха на выходе вентилируемого канала. Подогретый таким образом воздух можно направить на горение и/или использовать его для предварительного нагрева шихтового материала. Более того, такое техническое решение позволяет практически полностью регенерировать тепловой

поток, направляемый через ограждение в окружающую среду.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КТО – коэффициент теплоотдачи;  
ВТУ – высокотемпературная установка;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Интенсификация теплообмена. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 559 с.

*Е.Е. Ельникова<sup>1</sup>, А.А. Кобзева<sup>1</sup>, Ч.А. Кадыров<sup>2</sup>, В.С. Глазов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика

## ОБ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЯХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ТРЕБУЕМЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОМФОРТ В ЗДАНИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

- **АННОТАЦИЯ**

- Приведена оценка влияния локального потепления на требуемые теплотехнические характеристики отопительных приборов, оснащенных вертикальным оребрением, и теплозащитной оболочки здания, расположенного в городе Каракол в близи горного озера Иссык-Куль.

- **1. ВВЕДЕНИЕ**

В мировой печати давно обсуждается процесс глобального потепления и его влияние на природу, человека и результаты его деятельности. По прогнозам Всемирной метеорологической организации, к концу текущего столетия ожидается увеличение средней приземной температуры на 1,4 - 5,8°C. Ясно, что такое увеличение температуры необходимо учитывать при возведении зданий и сооружений, а также при разработке и реконструкции систем, обеспечивающих комфортные условия для людей и установок, реализующих тот или иной теплотехнологический процесс высокой эффективности.

Несмотря на то, что потепление носит глобальный характер, его интенсивность разная и зависит от места и времени, т.е. имеет локальные особенности. В этом смысле территория Кыргызстана не является исключением. Так, первая оценка изменения климата на этой территории была опубликована в Первом Национальном Сообщении Кыргызстана, в ответ на обязательства по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Эти изменения были определены в четырех климатических зонах Кыргызстана: Северная и Северо-Западная, Юго-Западная, Тянь-Шаньская и Иссык-Кульская котловина. Оказалось, что в среднем, для всей территории Кыргызстана, средняя годовая температура в XX веке в пересчете на 100 лет возросла на 1,6°C, что значительно выше глобального потепления земли, равного 0,75°C на этом же промежутке времени. Кроме того, оказалось, что наибольшее потепление наблюдалось в Иссык-Кульской котловине (2,4°C в зимние периоды), а наименьшее - летом (1,2°C) [1, 2]. Поэтому наша работа посвящена обоснованию необходимости проведения энергосберегающих мероприятий, учитывающих локальное потепление, для объектов и систем, обеспечивающих комфортные условия в зданиях, расположенных в Иссык-Кульской котловине.

Актуальность данной работы, обусловлена еще и тем, что существующие цены и тарифы на тепловую энергию не учитывают в полной мере процесс потепления и не покрывают затраты многих отечественных энергокомпаний, что приводит к их убыточности. Поэтому поиск ответа на вопрос: «Как отражается процесс потепления на теплотехнические характеристики теплозащитной оболочки зданий и элементов системы отопления, обеспечивающих требуемый комфорт в помещениях зданий?» является важным для принятия обоснованных энергосберегающих решений.

Задачи, решение которых позволяет достичь поставленной цели:

- Выявить тенденцию изменения климата в районе города Каракол по данным метеостанции, расположенной вблизи этого города [2], и СНиП за период 1982-2013 гг.
- Рассчитать требуемое сопротивление наружного ограждения (НО) жилого здания с учетом локального потепления по данным близлежащей метеостанции и актуальной версии нормативного документа по теплозащитной оболочке зданий [6, 14].
- Выявить влияние потепления на **требуемые** массогабаритные характеристики отопительного прибора, имеющего вертикальное оребрение.

## 2. АНАЛИЗ КЛИМАТА В Г. КАРАКОЛ

На рис. 1 приведены результаты обработки данных, полученных местной метеостанцией города Каракол, фиксирующие отклонение среднемесячной температуры от нормативных её значений за период с 2008 по 2019 годы.

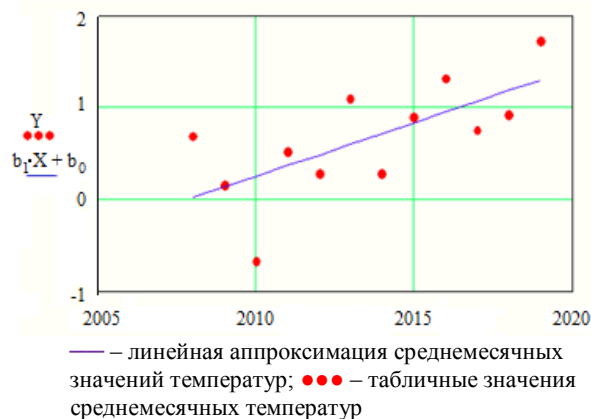




Рис. 1. Результат обработки табулированных данных местной метеостанции г. Каракол:  $b_1=0,12$  °C/год – скорость изменения температуры в единицу времени (год);  $b_0=-232,28$  – свободный член в линейной аппроксимации;  $stderr=0,48$  – стандартная (среднеквадратическая) ошибка

На рис. 2 представлена роза ветров для г. Каракол в 2011 и 2021 гг. Видно, что преобладающее направление ветра изменилось с Юго-Восточного на Западное. Если учесть, что Юго-Восточный ветер является более теплым по отношению к Западному ветру, становится не ясным почему климат стал более теплым. Анализ причин наблюдаемого локального потепления показал, что на него могут влиять такие факторы как изменение ландшафта местности, расширение города в одном из направлений, а также появление дополнительных метеостанций.

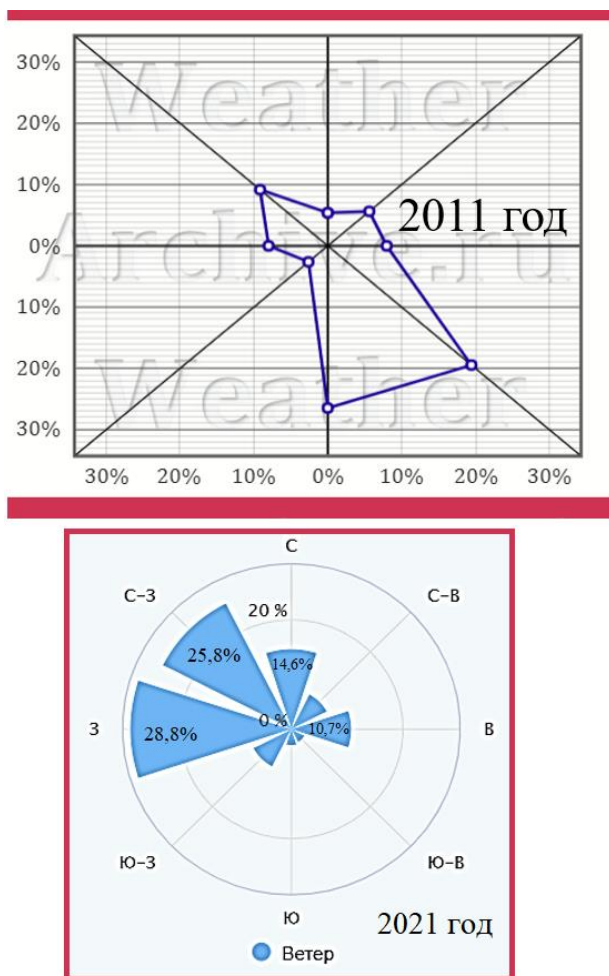
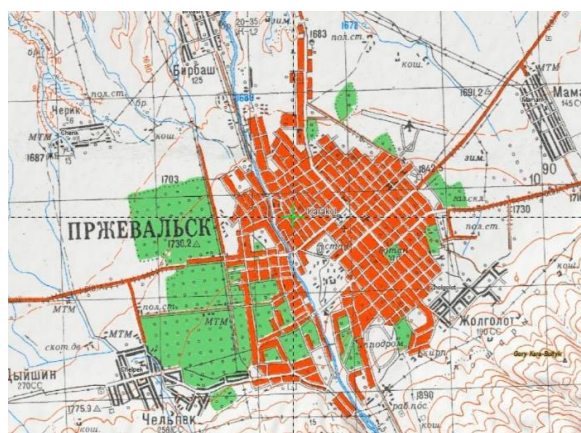


Рис. 2. Роза ветров в г. Каракол в разные годы

Мы полагаем, что основным фактором, повлиявшим на локальное потепление, является расширение города в северо-западном направлении и преобладающая ориентация его асфальтированных улиц (см. рис. 3).

После того, как мы выявили тенденцию к потеплению, возникает вопрос: «Почему термическое сопротивление наружного ограждения зданий в XXI веке больше термического сопротивления у зданий, построенных в середине прошлого века». Здравый смысл подсказывает, что, если есть потепление, то не

нужно увеличивать термическое сопротивление, и поэтому можно сэкономить на строительных материалах. Более того, потепление сокращает продолжительность отопительного периода, а значит способствует снижению необходимого для комфорта энергопотребления.



а)



б)

Рис. 3 - Карта города Пржевальск (Каракол): а – 1985 г., КССР; б – 2022 г., Кыргызстан

Отсюда следует вывод, что потепление избавляет нас от необходимости проведения ряда энергосберегающих мероприятий. Кажущееся противоречие здравому смыслу снимает тот факт, что на границе двух веков (XX и XXI) был выполнен переход от санитарно-гигиенических норм к энергосберегающим требованиям, который и привел к отмеченному недоумению. Поэтому в эпоху потепления энергосберегающие мероприятия должны быть направлены на снижение термического сопротивления наружных ограждений здания, рассчитанного из условия выполнения не санитарных норм, а действующих энергосберегающих требований.

### 3. РАСЧЕТ ТРЕБУЕМОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЖИЛОГО ЗДАНИЯ С УЧЁТОМ ЛОКАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Теплотехнический расчет был выполнен для 3-х этажного жилого здания, представленного на рис. 4.



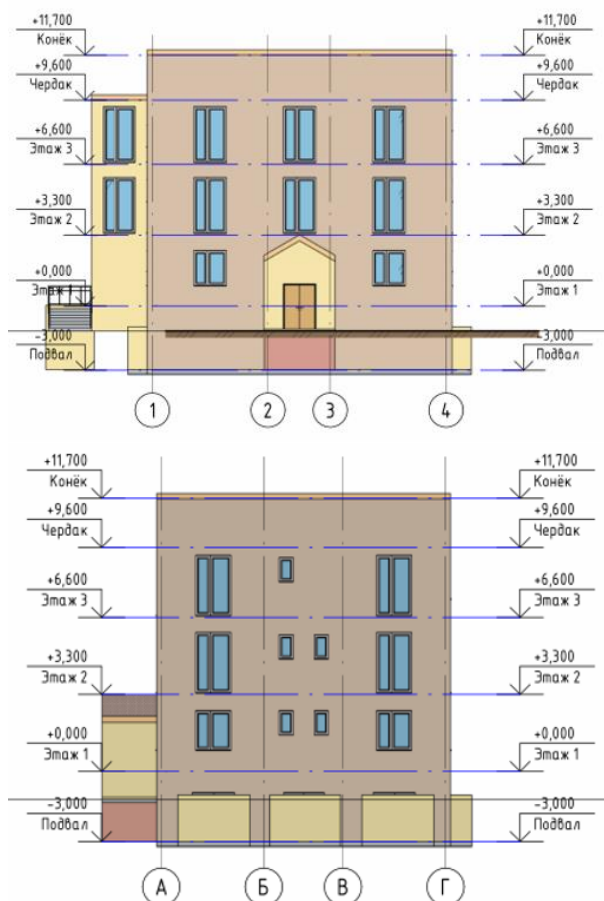


Рис. 4. 3D-модель жилого дома с цоколем

Исследование изменения температуры в зоне нахождения здания в период с 2008 по 2019 год, подтвердило тенденцию к потеплению. Следовательно, рассчитанные по действующим нормативным документам параметры теплозащитной оболочки могут быть избыточными для рассматриваемого объекта. Чтобы убедиться в этом, расчет был проведен по нескольким нормативным документам: по [4,10], действующему на момент возведения здания и по [6] актуальному на данный момент. Кроме того, при выполнении теплотехнического расчета были использованы данные по температуре и времени отопительного периода за 2019 год. Из результатов выполненного расчета (см. табл. 1 и 2) следует, что учет процесса потепления позволяет, не увеличивая величину удельных тепловых потерь, через теплозащитную

оболочку здания, сократить толщину теплоизоляционного материала на 36%, по сравнению с требованием СНиП 1999 год.

**Таблица 1. Сопротивления теплопередачи и удельные тепловые потери, согласно СНиП, вышедших в 1982, 2001, 2013 гг., и <http://weatherarchive.ru/>**

Годы	z, сут	$R_{0,0}$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	$q$ , Вт/м <sup>2</sup>
1982	188	0,33	103,03
2001	188	3,95	8,61
2013	187	3,83	8,61
2019	178	3,31	8,61

**Таблица 2. Расчетные параметры утеплителя**

Годы	1982-2001	1982-2013	1982-2019
$\Delta R_{ут}$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	3,62	3,5	2,98
$\Delta \delta_{ут}$ , м	0,13	0,11	0,08

#### 4. ВЛИЯНИЕ ПОТЕПЛЕНИЯ НА МАССО-ГАБАРИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Для того, чтобы обеспечить высокую теплоотдачу отопительного прибора, имеющего, например, вертикальное оребрение [9-12], необходимо определить оптимальные геометрические параметры его ребер при известной их массе и температуре в основании. В ходе моделирования теплообмена между одиночным прямоугольным ребром и омывающим его воздухом выяснилось, что:

- при неизменном коэффициенте теплоотдачи максимально возможный тепловой поток соответствует одной и той же высоте ребра не зависимо от температуры его основания, но уменьшается с её снижением;
- изменение коэффициента теплоотдачи приводит к необходимости менять геометрические параметры ребер в отопительном приборе, а значит и к изменению его конструктивных характеристик;
- снижение коэффициента теплоотдачи приводит к увеличению оптимальной высоты ребра и его температуры, а вот уменьшение металлоемкости ребра приводит к снижению оптимальной высоты ребра и к изменению конструкции отопительного прибора.

Эти выводы сделаны на основании результатов математического моделирования и анализа графиков, представленных на рис. 5-8.

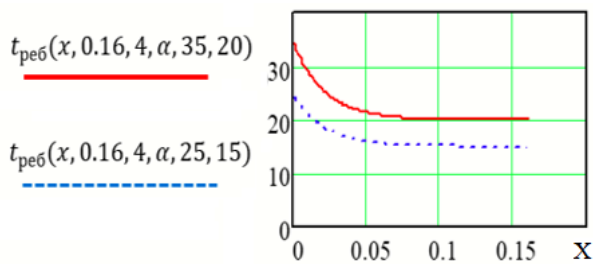


Рис. 5. Изменение температуры по высоте ребра при разных значениях температуры в его основании (30 и 25 °С) и воздуха (20 и 15 °С) омывающего это ребро

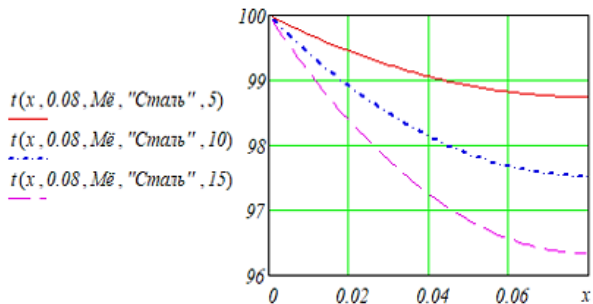


Рис. 6. Влияние коэффициента теплоотдачи на температуру ребра

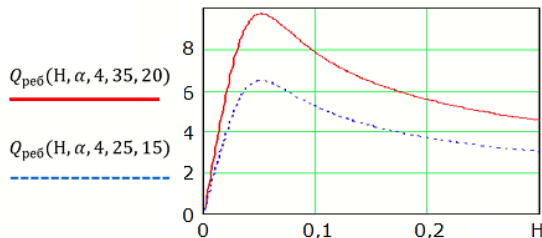


Рис. 7. Зависимость теплового потока от высоты ребра при сохранении его массы и неизменной величине коэффициента теплоотдачи

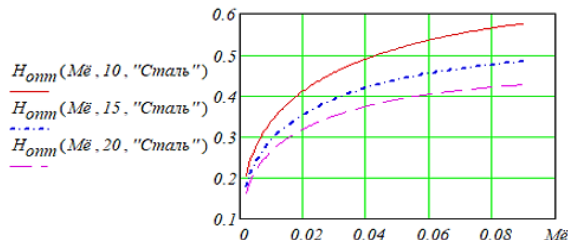


Рис. 8. Влияние материалоемкости и коэффициента теплоотдачи на оптимальную высоту ребра при сохранении его массы

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- На основании анализа данных местной метеостанции г. Каракол и СНиП, актуальных в период 1982-2013 гг., установлена тенденция к потеплению.
- Приведены и проанализированы причины изменения преобладающего направления ветра и расчетной температуры наружного воздуха в г. Каракол за 1985 г. и 2022 г.
- Выполнен расчет требуемого сопротивления наружного ограждения трехэтажного жилого зда-

ния, который показал, что учёт локального потепления позволяет сэкономить на теплоизоляционном материале без увеличения удельных тепловых потерь через наружное ограждение рассматриваемого здания.

- Выполнена качественная оценка влияния потепления на **требуемые** теплотехнические характеристики отопительного прибора с вертикальным оребрением. Установлено, что с уменьшением температуры теплоносителя в отопительном приборе не меняется оптимальная высота ребер, которым соответствует максимальный тепловой поток. Кроме того, при сохранении величины коэффициента теплоотдачи отопительному прибору не требуется реконструкция. Она может потребоваться если коэффициент теплоотдачи изменится. Так, при свободной конвекции  $\alpha \sim Nu \sim Gr \sim \Delta t = t_{оп} - t_{в}$ , поэтому  $\downarrow \Delta t$  приводит к  $\downarrow \alpha$  а значит к необходимости менять параметры ОП, либо повышать  $\alpha$  за счет организации вынужденной конвекции, т.е. использовать вентилятор.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

НО – наружное ограждение;  
 СНиП – строительные нормы и правила;  
 ОП – отопительный прибор;  
 Nu, Gr – числа Нуссельта и Грасгофа;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>/К;  
 $\Delta t$  – разность температур между температурой отопительного прибора,  $t_{оп}$  и воздухом в помещении,  $t_{в}$ , °С;  
 $\downarrow$  - снижение/уменьшение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-прикладной справочник по климату СССР
2. World weather: сайт. – URL: <https://world-weather.ru/archive/kyrgyzstan/karakol/>.
3. Retromap: сайт. – URL: <http://retromap.ru/1419881>.
4. СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика»
5. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология»
6. СНиП КР 23-01:2013 «Тепловая защита зданий»
7. WetherArhive.ru: сайт. – URL: <http://weatherarchive.ru/Temperature/Karakol>.
8. ГОСТ 30494-2.
9. **Свиштунов, В.М.** Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства: Учебник для вузов. – СПб.: Политехника, 2007.
10. Справочник проектировщика. Внутренние санитарно-технические устройства. Ч.1. Отопление / Под редакцией И.Г.Старовойрова. - М.: Стройиздат, 1990.
11. Рекомендации по применению отопительных стальных конвекторов «НовоТерм» и «НовоТерм-Лайт» (вторая редакция) – Москва 2007.
12. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М., 2004.
13. Сведения о самой холодной пятидневке. Каракол 2019 год - <https://weatherarchive.ru/Pogoda/Karakol>.
14. Studbox.net: сайт. – URL: [https://studbooks.net/2265454/matematika\\_himiya\\_fizika/opredelenie\\_teplovyh\\_potery\\_kryshu\\_zdani](https://studbooks.net/2265454/matematika_himiya_fizika/opredelenie_teplovyh_potery_kryshu_zdani)

А.А. Арбатский<sup>1</sup>, С.И. Поляков<sup>2</sup>, И.В. Рычков<sup>2</sup>, А.Н. Жидков<sup>2</sup>, А.В. Дубовой<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

<sup>2</sup>ТПХ «РУСКЛИМАТ», РОССИЯ

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТАКТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию взаимодействия воздуха и воды в теплообменниках смесительного типа, на примере классической конструкции поверхностного увлажнителя. Произведен предварительный расчет максимальной возможной энергетической эффективности подобных устройств, при применении их в качестве охладителей в летний период, по сравнению с классической конструкцией охладителей, на базе трубчатых-ребренных теплообменников.

В рамках исследования была построена экспериментальная установка, позволяющая провести серию экспериментов при различных параметрах воды и воздуха, а также предложена математическая модель эффективного управления параметрами увлажнения.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обоснована необходимостью повышения энергетической эффективности систем охлаждения в летний период. На данный момент, в подавляющем большинстве конструкций центральных кондиционеров, если требуется охлаждение применяется схема приведенная на рис.1. Для охлаждения используются водяные или фреоновые, трубчатые-ребренные теплообменники, классической конструкции [1].

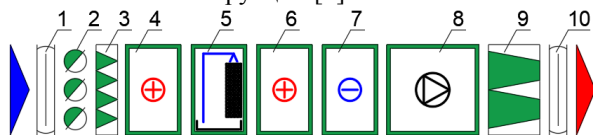


Рис. 1 Компоновка приточной части центрального кондиционера: 1, 10 – гибкие вставки; 3, 9 – фильтры; 4 – нагреватель 1-й ступени; 5 – секция адиабатного увлажнения; 6 – нагреватель 2-й ступени; 7 – охладитель (см. рис.2); 8 – вентилятор.

Конструктив данных теплообменников определен стандартизацией производств и мало поддается изменению в массовом сегменте рынка (любое изменение направленное непосредственно на повышение коэффициента теплоотдачи, как правило, приводит к удорожанию конструкции). Примеры вариан-

тов изменения геометрии оребрения с целью увеличения коэффициента теплоотдачи приведены в различных работах [2], [3] (см. также рис. 2).

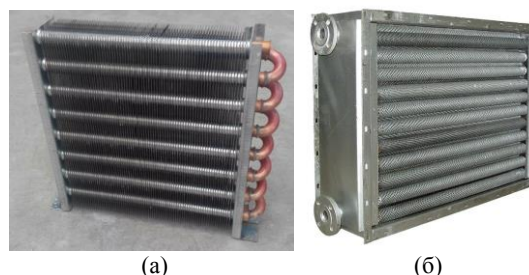
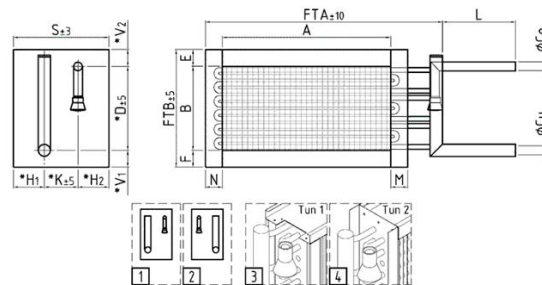


Рис. 2 Трубчатый-ребренный теплообменник: а) – прямоугольное оребрение; б) – спирально-навивное оребрение

Следует отметить что подобные методы увеличения эффективности теплообменников (отмечая их ценность и важность) не имеют существенного эффекта, в случае охладителей, так как значительная часть потерь энергии определяется процессом конденсации влаги из воздуха. Пример расчета теплообменника - охладителя, производителем, по эмпирическому алгоритму в автоматизированной программе [4]:



ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ			
Расход воздуха (объемный)	7207	м³/ч	Хладагент
Расход воздуха (массовый)	8216	кг/ч	Кол-во внешних контуров хладагента
Скорость воздуха в сечении	3,50	м/с	Температура кипения
Падение давления воздуха	150	Па	Температура конденсации
Температура воздуха на входе	30,0	°C	Температура перегрева
Влажность воздуха на входе	50	%	Температура переохлаждения
Температура воздуха на выходе	19,9	°C	Расход хладагента (массовый)
Влажность воздуха на выходе	74	%	Падение давления хладагента
Тепловой поток (полная мощность)	39,9	кВт	Площадь теплообменной поверхности
Запас	9,28	%	Объем (внутр. ТУ)
Количество выпадающего конденсата	22,61	л/ч	Вес (приблизительно)

Рис. 3 Пример расчета фреонового охладителя. Полная мощность – 39,9 кВт, явная мощность – 25,5 кВт.

Из приведенного примера, нетрудно заметить, что потери на конденсацию составляют до 35% от совокупной тепловой мощности теплообменника. Параметры теплоносителя выбраны из наиболее часто применяемых в системах холодоснабжения центральных кондиционеров (температура испарения фреонов R410A, R134 и т.д. составляет от 3 °С до 7 °С, температура воды контура центрального охлаждения может варьироваться в пределах от 5 °С до 15 °С) [5], [6].

Потери холода при конденсации можно сокращать путем увеличения температуры теплоносителя, однако это приводит к увеличению размеров теплообменника и существенному удорожанию центрального кондиционера, а также росту аэродинамического сопротивления. В таблице 1 приведены данные теоретического расчета необходимого расхода холода, для обеспечения передачи нужного количества явного холода при различных температурах теплоносителя. Расчет произведен по следующему алгоритму [5]:

Процесс строится исходя из температуры теплоносителя согласно рис. 4:

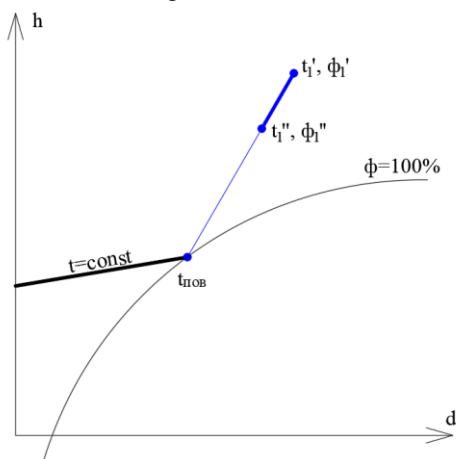


Рис. 4 Общий вид процесса охлаждения в h-d диаграмме:  $t_{пов}$  – температура поверхности охладителя, определяемая по средней температуре теплоносителя

$$Q_{п} = G(h' - h'') \quad (1)$$

Где:

$Q_{п}$  – полная холодильная мощность подводимая к теплообменнику, кВт;

$G$  – расход воздуха проходящего через теплообменник, м<sup>3</sup>/с;

$h'$  – энтальпия воздуха на входе в теплообменник, кДж/кг;

$h''$  – энтальпия воздуха на выходе из теплообменника, кДж/кг.

$$Q_{я} = Gc_p(t' - t'') \quad (2)$$

Где:

$Q_{я}$  – явная холодильная мощность передаваемая воздуху, кВт;

$G$  – расход воздуха проходящего через теплообменник, м<sup>3</sup>/с;

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость сухого воздуха при заданной температуре, кДж/кгК;

$t'$  – температура воздуха на входе в теплообменник, °С;

$t''$  – температура воздуха на выходе из теплообменника, °С;

Энтальпия определяется графо-аналитически по h-d диаграмме, либо по уравнению:

$$h = c_p * t + (2500 + 1,8069 * t) * \left(\frac{d}{1000}\right) \quad (3)$$

Где:

$d$  – абсолютное влагосодержание воздуха, г/кг;

В правом столбце, указана ориентировочная стоимость теплообменника, для обеспечения заданных параметров [7]. Вполне допустимо оперировать параметром стоимости, так как при расчете по алгоритму поставщика теплообменников, разница стоимости объективно отражает разницу в совокупности материальных и нематериальных ресурсах необходимых для производства, транспортировки и установки теплообменника.

Из таблицы 1 нетрудно заметить, что стандартизация производств приводит к резкому скачку стоимости теплообменника, при переходе через определенную температуру теплоносителя. Таким образом, мы будем рассматривать разницу между первой и последней строчкой таблицы, чтобы подтвердить актуальность проводимого исследования, так как в первых трех строчках, изменение параметров теплообменника находится в пределах погрешности теплового расчета (менее 5%).

Таким образом несложно посчитать, приблизительный (осредненный) срок окупаемости, при увеличении температуры теплоносителя с 5 °С до 10 °С:

$$C = \frac{C_1 - C_2}{n(Q_{п2}/\varepsilon_2 - Q_{п1}/\varepsilon_1)\tau T} \quad (4)$$

Где:

$C_{1,2}$  – стоимости теплообменников, руб.;

$n$  – коэффициент отношения средней, к максимальной необходимой мощности охлаждения (принимается 0,47 как средний по стране);

$\varepsilon_{1,2}$  – коэффициент трансформации холодильной, в электрическую мощность (принимается от среднего, равного - 2,5, для температуры теплоносителя 7/12 °С и наружной температуры 30 °С с учетом работы насосов и вентиляторов охлаждения конденсатора, умноженного на отношение средних температур теплоносителя);

$\tau$  – время работы охладителя в году, ч;

$T$  – тариф на эл. энергию, руб/кВт\*ч.

Для Москвы, примерный срок окупаемости составит (тариф на эл. энергию принят 5,32 руб/кВт\*ч как средне-взвешенный согласно [8], число часов работы в году -  $\tau = 1440$  ч. Исходя из времени стояния температуры более 20 °С): 5,7 лет.



Таблица 1. Расчет расхода холода и стоимости теплообменника при различных температурах теплоносителя

$G$ , $M^3/ч$	$t_1$ , °C	$\phi_1$ , %	$t_2'$ , °C	$t_2''$ , °C	$Q_{я}$ , кВт	$Q_{п}$ , кВт	Типо-размер теплообменника	Стоимость, руб
1000	30	50	5	10	3,5	6,2	HW 500*250-3	4942
			6	11	3,5	6,2	HW 500*250-3	4942
			7	12	3,5	6,1	HW 500*250-3	4942
			8	13	3,5	6	HW 500*250-3	4942
			9	14	3,5	5,8	CW 500*250-4	33915
			10	15	3,5	5,7	CW 500*250-4	33915

Примечания:

- $G$  – расход воздуха через теплообменник,  $t_1$  – температура воздуха на входе в теплообменник,  $\phi_1$  – относительная влажность воздуха на входе,  $t_2'$  – температура охлаждающей воды на входе,  $t_2''$  – температура охлаждающей воды на выходе,  $Q_{я}$  – явное количество теплоты передаваемое воздуху,  $Q_{п}$  – полное количество теплоты необходимое для охлаждения.

Из всего выше-изложенного следует, что существующие подходы к повышению эффективности охлаждения, такие как: увеличение коэффициента теплоотдачи, увеличение температуры теплоносителя с целью сократить потери на образование конденсата - не дают существенного эффекта по увеличению энергетической эффективности теплообменного оборудования, применяемого для охлаждения воздуха в центральных кондиционерах.

При этом существует, достаточно часто применяемая конструкция центрального кондиционера включающая в себя адиабатный увлажнитель воздуха, который применяется исключительно зимой. Подавляющее большинство существующих алгоритмов расчета адиабатных увлажнителей, которые применяются на климатическом рынке, не включают в себя возможность расчета устройства на охлаждение летом, и в центральном кондиционере ставят дополнительный охладитель, для этой цели.

Предлагается совместить функционал поверхностного увлажнителя и охладителя, таким образом уменьшив капитальные вложения в центральный кондиционер, одновременно повысив эффективность самого процесса охлаждения.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУХА И ВОДЫ

### 2.1. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 5. Внешний вид установки представлен на рис. 6

Установка включает в состав все необходимые элементы, для создания температуры и влажности воздуха в диапазоне значений: 10 - 25 °C, 30 – 70%, соответственно. Данный диапазон является характерным рабочим диапазоном температур и влажностей, для приточной вентиляции большей части зданий и помещений [6].

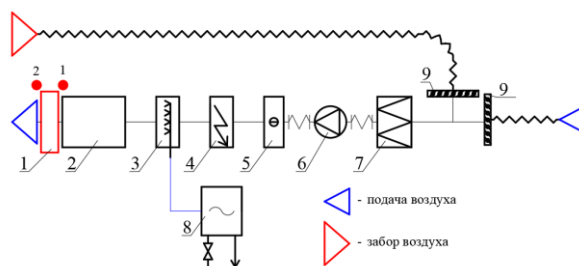


Рис. 5 Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – испытываемый образец, 2 – секция выравнивания потока, 3 – паро-распределитель, 4 – электрический нагреватель, 5 – охладитель, 6 – вентилятор, 7 – фильтр, 8 – паровой увлажнитель, 9 – секция смешения.



(а)

Рис. 6 Внешний вид испытательного стенда

Таким образом, измеряя параметры воздуха в точках 1 и 2, а также параметры воды подаваемой в секцию увлажнения мы можем делать эмпирические зависимости, для различных конструкций и впоследствии проверять действие различных математических моделей взаимодействия воздуха и воды по интегральным характеристикам.

### 2.2. Предлагаемые эксперименты

Состав экспериментов предполагает перекрестную проверку результатов эксперимента различными способами. Эксперимент ставится, с учетом особенностей принятой конструкции секции увлажнения центральных кондиционеров (рис. 7):

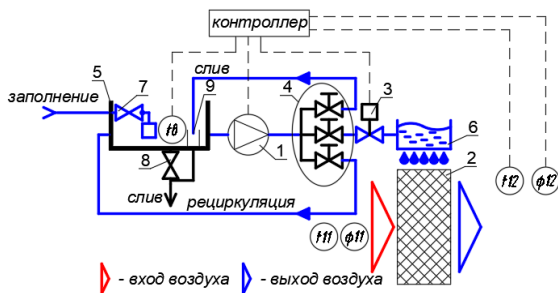


Рис. 7 Принципиальная схема камеры увлажнения: 1 – насос, 2 – увлажняющая насадка (см. рис.8), 3 – регулирующий вентиль, 4 – балансирующий коллектор, 5 – поддон, 6 – распределительный поддон, 7 – клапан заполнения, 8 – сливной кран, 9 – аварийный перелив



Рис. 8 Внешний вид насадки увлажнителя

**Эксперимент 1:** Работа в стационарном режиме. Устанавливается постоянный режим работы с заданной температурой и влажностью воздуха на входе, с постоянной температурой подаваемой воды. Фиксируются следующие параметры:

- Температура воздуха на входе:  $t_{11}, ^\circ\text{C}$ ;
- Температура воздуха на выходе:  $t_{12}, ^\circ\text{C}$ ;
- Относительная влажность воздуха на входе:  $\phi_{11}, \%$ ;
- Относительная влажность воздуха на выходе:  $\phi_{12}, \%$ ;
- Температура воды в поддоне (на подаче в увлажняющую насадку):  $t_{в}, ^\circ\text{C}$ ;
- Расход воздуха:  $G, \text{кг/с}$ ;
- Скорость воздуха:  $w, \text{м/с}$ .

В течении всего времени эксперимента поддерживается постоянная температура и влажность воздуха на входе, а также расход воздуха.

**Эксперимент 2:** Установка отключается от подачи воды, устанавливается постоянная циркуляция воды внутри установки, измеряются следующие параметры:

- Объем воды в поддоне в начале эксперимента:  $V_1, \text{м}^3$ ;
- Объем воды в поддоне в конце эксперимента:  $V_2, \text{м}^3$ ;
- Температура воды в поддоне в начале эксперимента:  $t_{в1}, ^\circ\text{C}$ ;
- Температура воды в поддоне в конце эксперимента:  $t_{в2}, ^\circ\text{C}$ ;
- Температура воздуха на входе:  $t_{11}, ^\circ\text{C}$ ;

- Относительная влажность воздуха на входе:  $\phi_{11}, \%$ ;
- Расход воздуха:  $G, \text{кг/с}$ ;
- Скорость воздуха:  $w, \text{м/с}$ ;
- Время эксперимента:  $\tau, \text{сек}$ .

В течении всего времени эксперимента поддерживается постоянная температура и влажность воздуха на входе, а также расход воздуха.

**Эксперимент 3:**

- Температура воздуха на входе:  $t_{11}, ^\circ\text{C}$ ;
- Относительная влажность воздуха на входе:  $\phi_{11}, \%$ ;
- Расход воздуха:  $G, \text{кг/с}$ ;
- Скорость воздуха:  $w, \text{м/с}$ ;
- Температура воды в поддоне в каждый момент времени:  $t_{вт}, ^\circ\text{C}$ ;
- Объем воды в поддоне в каждый момент времени:  $V_{вт}, \text{м}^3$ .

Таким образом из 3-х экспериментов, меняя параметры воздуха на входе можем вычислить все необходимые параметры тепло- и массообмена для испытываемой геометрии устройства.

### 2.3. Математическая модель управления влажностью и температурой

На рис. 7 представлена предлагаемая схема системы увлажнения воздуха, которая реализуется в конструкции представленной на рис. 9.

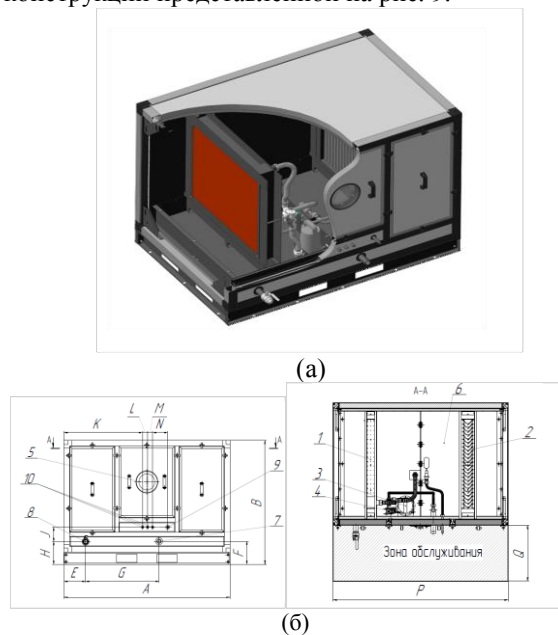


Рис. 9 Эскизное изображение (а) и чертеж (б) конструкции секции увлажнения: 1 – насадка увлажнителя, 2 – каплеуловитель, 3 – насос, 4 – балансирующий коллектор, 5 – смотровое окно, 6 – поддон, 7 – сливной патрубков, 8 – аварийный перелив, 9 – подпитка и заполнение, 10 – кабельные выводы

Расстояние между позициями 1 и 2 обуславливается максимально-возможным выносом крупнодисперсной фракции флагаи потоком воздуха, также определяемым экспериментально для возможных условий работы увлажнителя.



Таблица 1. Данные эксперимента 1 для расхода воздуха 1000 м<sup>3</sup>/ч

G, м <sup>3</sup> /ч	t <sub>1</sub> ', °C	φ <sub>1</sub> ', %	h <sub>1</sub> ', кДж/кг	t <sub>в</sub> , °C	h <sub>1</sub> '', кДж/кг	t <sub>1</sub> '', °C	φ <sub>1</sub> '', %	Q <sub>я</sub> , кВт	Q <sub>п</sub> , кВт
1000	30	50	64,57	10	52,14	20	76	3,5	4,02

В отличие от существующих на данный момент систем увлажнения, в предлагаемой конструкции имеется регулирующий клапан (поз. 3, рис. 7), работающий исходя из показаний датчиков температуры и влажности: t<sub>в</sub>, t<sub>12</sub> и φ<sub>12</sub>. Проведя серию экспериментов описанных в разделе 2.2. мы можем заранее установить все необходимые нам параметры управления и представить их в обобщенной математической модели:

$$TR_1' = TR_1(1 - A t_p^B)(1 - C t_b^D) \quad (5.1)$$

$$TR_2' = TR_2(1 - A t_p^B)(1 - C t_b^D) \quad (5.2.)$$

Где:

TR<sub>1</sub>' – темп регулирования если температура воды ниже температуры точки росы;

TR<sub>2</sub>' – темп регулирования если температура воды выше температуры точки росы;

TR<sub>1</sub> и TR<sub>2</sub> – базовые темпы регулирования устанавливаемые пользователем, согласно инструкции, разработанной на базе проведенных экспериментов;

t<sub>p</sub><sup>B</sup> – температура точки росы входящего воздуха, °C;

A, B, C, D – настроечные константы, также устанавливаемые по результатам исследования, значения которых могут меняться в зависимости от условий эксплуатации.

Под темпом регулирования подразумевается величина единичного воздействия на исполнительный механизм в определенный интервал времени (к примеру, закрытие или открытие вентиля 3 на 20% в течении 10 сек.). Т.е. вместо классического ПИД-алгоритма управления влажностью, предлагается ступенчатое управление с гибкой регулировкой параметров, что позволит осуществить настройки системы увлажнения как для работы по влажности, так и для работы по температуре.

#### 2.4. Использование системы для охлаждения воздуха

Предлагается следующая схема совмещения функции охладителя и увлажнителя в одной системе (рис. 10):

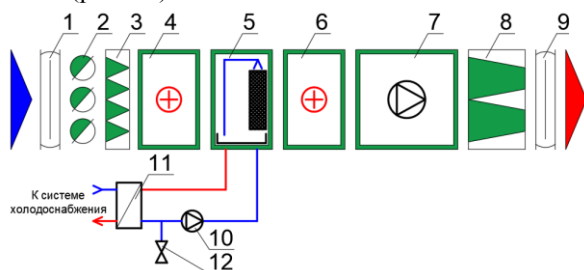


Рис. 10 Компоновка приточной части центрального кондиционера: 1, 9 – гибкие вставки; 3, 8 – фильтры; 4 – нагреватель 1-й ступени; 5 – секция увлажнения/охлаждения; 6 – нагреватель 2-й ступени; 7 – вентилятор; 10 – насос, 11 – теплообменник подключения к системе холодоснабжения; 12 – подпитка воды.

В режиме охлаждения, секция работает фактически на сквозной проток, с существенно большим расходом воды, чем необходим в режиме увлажнения. Расход воды определяется разницей температур подающей и обратной линии системы холодоснабжения. Т.е. мы получаем контактный охладитель, смешивающего типа, с некоторым уносом влаги. Рассчитать теоретический энергосберегающий эффект можно следующим образом:

- Полная мощность затраченная на охлаждение воздуха будет определяться по формуле 1;
- При этом энтальпия h'' будет иметь иное значение, определяемое эффективностью тепло- и массообмена в увлажняющей насадке.

Данные эксперимента, согласно схеме эксперимента 1, описанной в разделе 2.2. приведены в таблице 2. Дополнительный энергосберегающий эффект составил более 30%, за счет эффективного массообмена.

Точный энерго-сберегающий эффект может быть получен для любой геометрии насадки увлажнителя, после получения зависимостей для эффективности тепло- и массообмена, но даже приближенные расчеты показывают, что может быть достигнут дополнительный энерго-сберегающий эффект при охлаждении воздуха, при этом будет снижена стоимость центрального кондиционера за счет отсутствия охладителя. Расход воды компенсирующий унос влаги не будет существенным по сравнению с достигаемым энергетическим эффектами:

$$W = 3600G(d_1' - d_1'') \quad (5)$$

Где:

W – расход воды, кг/ч;

d<sub>1</sub>' – абсолютное влагосодержание в начале и в конце процесса соответственно, кг/кг.

Таким образом, для результатов эксперимента представленных в таблице 2:

$$W = 1,51 \text{ кг/ч.}$$

Складывающуюся экономию можно пересчитать через тарифы на воду и электрическую энергию:

$$\mathcal{E} = n \left( T \frac{Q_p}{\varepsilon} - W T_v \right) \tau \quad (6)$$

Где:

T<sub>v</sub> – тариф на потребление воды, руб/л (для москвы T<sub>v</sub>=45,48 руб/м<sup>3</sup> согласно [9]);

Таким образом, в пересчете на параметры примененные для оценки срока окупаемости во введении (формула 4) получим (параметр ε принимается базовым, для температурного графика системы охлаждения 7/12 °C):

$$\mathcal{E} = 5 \text{ 743 руб/год;}$$

Понятие срока окупаемости, в данном случае не имеет смысла, так как мы экономим не только энергию, но и капитальные вложения в установку, за счет отсутствия охладителя.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ энерго-сберегающего эффекта получаемого при традиционных методах регулировки параметров при охлаждении воздуха;

2. Предложена экспериментальная установка и схема проведения эксперимента, для установления точных характеристик систем увлажнения с разной конструкцией и геометрией, которые могут быть использованы в модели управления параметрами увлажнения и охлаждения;

3. Предложена математическая модель управления параметрами увлажнения и охлаждения ;

4. Предложена принципиальная схема использования увлажнителя в качестве охладителя, которая позволяет экономить капитальные вложения с одновременным получением энергосберегающего эффекта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Каменев П. Н. , Тертичник Е. И.** учебное пособие / - Изд. 2-е, исправл. и дополн. - Москва : Издательство АСВ, 2011. - 281 с. - ISBN 978-5-93093-436-2.
2. **Тюрин М.П., Бородин Е.С.** Рекуперативные теплообменники и их расчёт: Учебное пособие.– М.: МГУДТ, 2016. – 59с.
3. **Ангуфьев А.С.** Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. - М-Л.: Энергия, 1966.
4. **Программа** расчета теплообменных аппаратов ГК «СТ-Радиатор», МО, 2022 г.
5. **Стефанов Е.В.,** Вентиляция и кондиционирование воздуха: изд. «АВОК Северо-запад» Санкт-Петербург, 2005г.
6. **Ананьев В.А., Балужева Л.Н., Гальперин А.Д., Гордов А.К., Еремин М.Ю., Звягинцева С.М., Мурашко В.П., Седых И.В.** Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика Третье издание.: Евроклимат, 2000 г., -416с.
7. **Программа** расчета секций охлаждения в составе центральных кондиционеров «ППВО» ТПХ «Русклимат», Москва, 2022 г.
8. **Тарифы** на эл. энергию в г. Москва за 2022 год: <https://www.mosenergosbyt.ru/individuals/tariffs-n-payments/tariffs-msk/polnaya-versiya-tarifov.php>
9. **Тарифы** на водоснабжение в г. Москва за 2022 год: <https://www.mosvodokanal.ru/forabonents/tariffs>

*А.А. Арбатский<sup>1</sup>, В.С. Глазов<sup>1</sup>, С.И. Поляков<sup>2</sup>, С.П. Останин<sup>2</sup>, К.И. Королева<sup>2</sup>,  
А.В. Дубовой<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup>ТПХ «РУСКЛИМАТ», РОССИЯ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ПРЯМОГО НАГРЕВА ВОДЫ И ВОЗДУХА МЕТОДАМИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена методам анализа эффективности устройств прямого нагрева воды и воздуха и способам исследования эффективности подобных устройств. В работе предлагаются методы оценки качества работы устройств нагрева воды и воздуха основанные на показателях энергетической эффективности и обеспечении приемлемых для пользователя параметров работы. Также предложены методы исследования работы подобных устройств путем замера косвенных параметров при их работе.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее, в работе [1] рассматривался, так называемый критерий качества работы системы прямого электрического нагрева воздуха в помещениях. И обосновывалась актуальность наличия подобного критерия. Однако не рассматривались методы объективного определения данного критерия, в равных условиях, для различных приборов.

Также в результате экспериментов с конвекторами и водонагревательными приборами был выявлен общий принцип получения энергетической эффективности и повышения качества работы нагревательных приборов за счет внедрения системы плавного регулирования электрической мощности. Принцип заключается в более равномерном распределении температуры, что влечет ликвидацию локальных перегревов и, как следствие, уменьшение тепловых потерь. По разным оценкам для конвекторов, в лабораторных условиях, эффект составил до 40%, для водонагревателей до 22% (в зависимости от типа потребления ГВС).

В рамках данной работы проведено обобщение методов исследования работы электрических и водяных нагревательных приборов.

### 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ

#### 2.1. Электрические конвекторы

Для электрических конвекторов предлагается следующий алгоритм проведения исследований для определения энергетической эффективности и качества работы:

В термokonстантной зоне, построенной на основании принципов изложенных в [2] устанавливается электрический нагревательный прибор и измеряются следующие показатели:

- Температура поверхностей:  $t_{\text{пов.и}}$ , °C;
- Потребляемая электрическая мощность:  $W$ , кВт
- Температурное поле вокруг прибора (значения температур на удалении от прибора с разных сторон).

На основании данных измерений мы можем делать выводы о соотношении значений передаваемой тепловой энергии путем излучения и конвекции, а также о распределении температур рядом с прибором, что позволит делать выводы о создании прибором локальных перегревов приводящих к дополнительным тепловым потерям.

Описанный выше метод, был выведен на основании проведенного исследования [3], в результате которого было выявлено, что конвекторы с инверторным управлением, в условиях помещения с постоянными тепловыми потерями и равной электрической мощностью имеют преимущество по энергетической эффективности в сравнении с водяными радиаторами, работающими на электрическом котле:

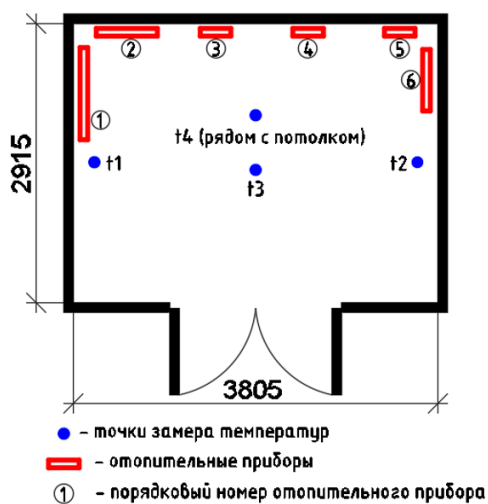


Рис. 1 Схема проведения эксперимента. Размещение испытываемых приборов в теплоизолированной камере.



Рис. 2 График потребляемой энергии при нагреве теплоизолированной камеры с 16 °C до 35 °C по средне-объемной температуре

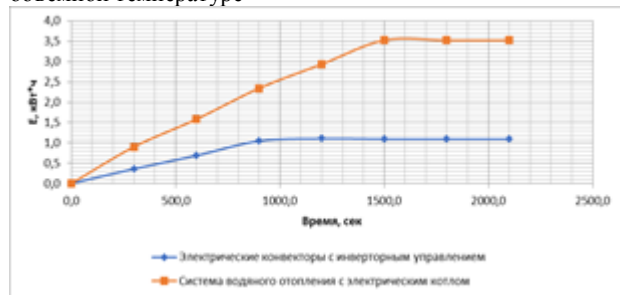


Рис. 3 График потребляемой энергии при поддержании в теплоизолированной камере постоянной температуры в условиях постоянных тепловых потерь



Рис. 4 Колебания средне-объемной температуры при поддержании в теплоизолированной камере постоянной температуры в условиях постоянных тепловых потерь

Из рис.3 нетрудно заметить, что разница в количестве энергии потребляемой системой

прямого электрического нагрева и водяной системой с эл. котлом постоянно увеличивается. Если в рис.2 разницу в затраченной энергии на прогрев помещения легко объяснить дополнительной теплоемкостью водяной системы, то для рис. 3 объяснений может быть несколько:

- 1) Дополнительные тепловые потери водяной системы вызванные регулярным перегревом из-за инерционного регулирования (см. рис.4);
- 2) Тепловые потери электрического котла, находящегося вне измерительной камеры;
- 3) Прогрев элементов теплоизолированной камеры.

С учетом данных на рис. 4, а также последующих замеров температур поверхности приборов во время работы на поддержание температуры (см. таблицу 1) объяснение 1 выглядит достаточно правдоподобно. Однако, с целью исключить погрешности связанные с факторами 2 и 3 необходимо проводить более точные замеры в термоконстантной зоне построенной в соответствии с [2].

## 2.2. Электрические водо-нагреватели

Основываясь на ранее сделанных предположениях об эффективности конвекторов с плавным регулированием мощности нагревательного элемента, можно предположить, что похожий эффект может дать плавное регулирование нагревательного элемента водо-нагревательного прибора.

Однако исследование водо-нагревательного прибора представляет из себя более сложную задачу, так как различия между различными конструкциями водо-нагревательного элемента будут меньше, чем для систем описанных в разделе 2.1.

Этот вывод сделан на основании проведенного эксперимента:

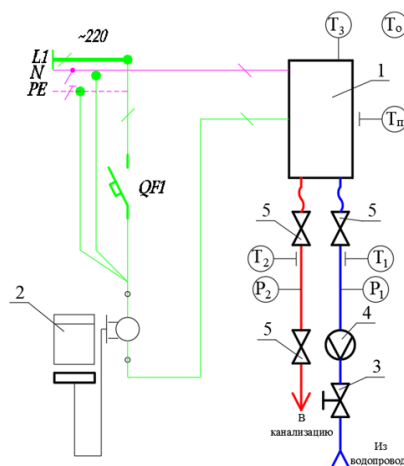
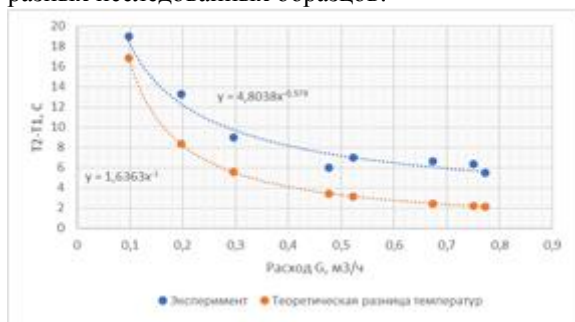


Рис. 5 Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования водонагревательных приборов: 1 – Испытываемый образец, 2 – электрический счетчик с функцией измерения тока и напряжения, 3 – регулирующий вентиль для изменения расхода, 4 – расходомер, 5 – запорные краны

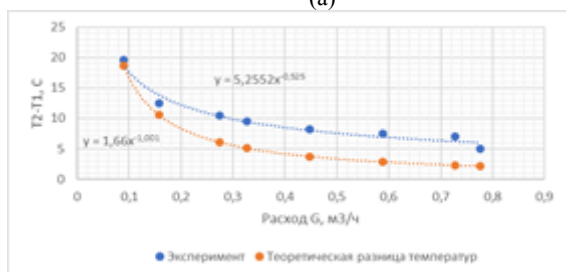
Таблица 1. Результаты замеров температуры поверхности нагревательных приборов

Тип нагревательного прибора	Температура окружающего воздуха $t_{окр}$ , С	Средняя по площади температура отопительного прибора $t_{пов}$ ,	Температура нагревательного элемента, $t_{вн}$	Температура воды, $t_{вн}$
Электрический Electrolux ECH/R-2000 T	30,6	45,9	50,0	-
Водяной OASIS 500/80 12 секций	31,7	72,5	-	71,8

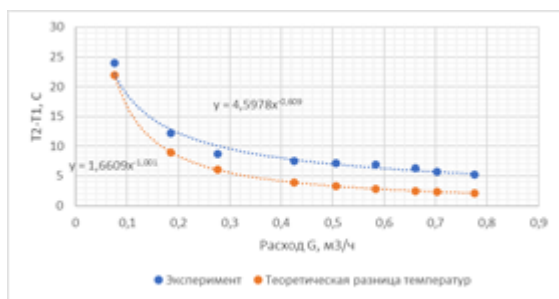
Эксперимент заключался в работе в стационарном режиме при различных расходах воды. Задавался фиксированный расход воды при максимальной мощности ТЭНов, при этом фиксировались параметры входа и выхода воды, при выходе на стационарный режим. Время выхода на стационарный режим рассчитывалось исходя из отношения расхода воды к объему бака (т.е. время полной смены всего объема воды в баке). Получены следующие результаты для разных исследованных образцов:



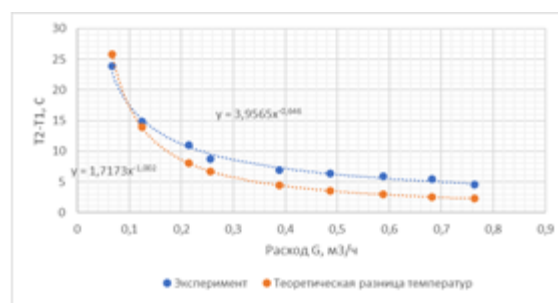
(а)



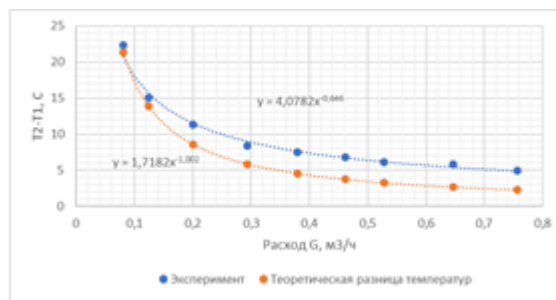
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис. 6 Результаты замеров поддерживаемой разницы температур для различных образцов продукции: а) - Thermex IF 50 V (pro), б) - EWH 50 Megapolis с панелью Centurio IQ 2.0, в) - EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами Без инвертора, г) - EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами с инвертором, д) - EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами

Исходные характеристики образцов приведены в таблице 2.

Под теоретической разницей температур подразумевается значение, которое должно быть при заданном расходе и подаваемом количестве эл. энергии.

Различия реальной и теоретической разницы температур говорят о создаваемом паразитном тепловом потоке. Для того, чтобы исключить эту погрешность предлагается анализировать не абсолютное значение разницы температур, а скорость ее изменения:

Составим тепловой баланс, при условии 100% передачи энергии проточной воде [4]:

$$Q_T = \alpha F_{ТЭН}(T_{ТЭН} - T_3) = G c_p (T_2 - T_1) \quad (5)$$

Где:

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности ТЭНов, Вт/м<sup>2</sup>К;

$F_{ТЭН}$  – площадь поверхности ТЭНов, м<sup>2</sup>;

$G$  – расход жидкости, кг/с;

$c_p$  – удельная теплоемкость воды при средней температуре, кДж/кгК; Из уравнения 6 нетрудно заметить, что при увеличении расхода, и постоянной величине подаваемой эл. Энергии, разница температур  $T_2-T_1$  должна уменьшаться прямо пропорционально увеличению расхода, при условии неизменности комплекса  $\alpha(T_{ТЭН}-T_3)$ .

Соответственно:

- Если  $d(T_2-T_1) < dG$ , то комплекс  $\alpha(T_{ТЭН}-T_3)$  уменьшается с уменьшением расхода, следовательно выше влияние естественной конвекции;

- Если  $d(T_2-T_1) > dG$ , то комплекс  $\alpha(T_{ТЭН}-T_3)$  увеличивается с уменьшением расхода, следовательно выше влияние принудительной конвекции. При преобладании принудительной конвекции, мы, с высокой степенью вероятности, всегда будем иметь 100% или близкий к 100% КПД, так как интенсивное перемешивание будет нивелировать любые гравитационные потоки и вся подаваемая энергия будет идти непосредственно на нагрев проточной воды.

Как только мы получаем увеличение влияния естественной конвекции, теоретически возможно образование релаксационных (застойных – см. рис. 7б) зон, в верхней части бака, со слабым перемешиванием. Оценку соотношения будем производить исходя из анализа зависимостей:  $(T_1-T_2)_p = f(G)$  и  $(T_1-T_2)_r = f(G)$ , где индексы «р» и «т» обозначают реальную разницу температур, получившуюся в результате эксперимента и теоретическую полученную из теплового баланса:

$$(T_1-T_2)_r = Q_{эл.п} / (Gc_p) \quad (7)$$

Соответственно получим соотношение для каждого из значений расходов:

$$\frac{((T_2-T_1)_p)'}{((T_2-T_1)_r)'} = \varepsilon \quad (8)$$

Где:

$\varepsilon$  – соотношение реальной скорости изменения температуры к теоретической (теоретическая скорость изменения температуры всегда прямо пропорциональна расходу).

Соответственно:

- При  $\varepsilon > 1$ : преобладает принудительная конвекция;

- При  $\varepsilon < 1$ : преобладает естественная конвекция;

В отсутствии иных данных, при  $\varepsilon < 1$ , интенсивность перемешивания, и соответственно влияния релаксационных зон на тепловой поток, предлагается оценивать следующим образом:

$$Q_1 = Q_{эл.п} - Q_{доп.пот} \quad (9)$$

Где:

$Q_{доп.пот}$  – дополнительные тепловые потери вызванные локальным перегревом отдельных зон бака, кВт;

$$Q_{доп.пот} = Q_{пот}(1-\varepsilon) \quad (10)$$

Где:

$Q_{пот}$  – тепловые потери, определяемые по интегральной характеристике тепловой изоляции, по средней температуре воды в баке и температуре поверхности бака, кВт.

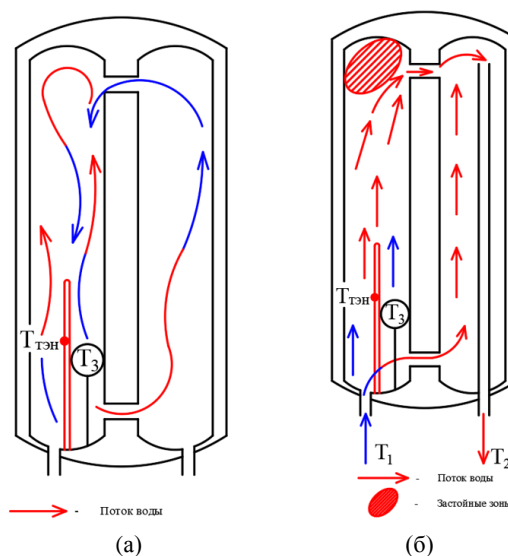


Рис. 7 Предполагаемое движение потоков воды рядом с ТЭНами и датчиком температуры ( $T_3$ ): а) - при отсутствии протока воды, б) – при постоянном протоке воды

Таким образом исходя из графиков зависимости изменения разницы температур от времени мы можем вычислять дополнительные тепловые потери водонагревательного прибора, оценивая таким образом, его энергетическую эффективность.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено физическое обоснование экономии получаемой при применении плавного управления электрическими приборами;

2. Поставлена система экспериментов для объективного определения энергетической эффективности и качества работы электрических нагревательных приборов;

3. Предложена математическая модель анализа экспериментальных данных, позволяющая оценить влияние интенсивности перемешивания потока на эффективность работы водонагревательного прибора;



Таблица 2. Характеристики испытываемых образцов водонагревательных приборов

Наименование	Ин-вертер	Заяв-ленная макси-мальная мощ-ность, кВт	Тол-щина тепло-вой изоляции, мм	Объем бака, л
Thermex IF 50 V (pro)	Нет	2	20*	50*
EWH 50 Megapolis с панелью Centurio IQ 2.0	Нет	2	35	42
EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами Без инвертора	Нет	2	20	46,8
EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами с инвертором	Да	2	20	46,8
EWH 50 digital inverter с сухими ТЭНами	Да	2	35	42

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

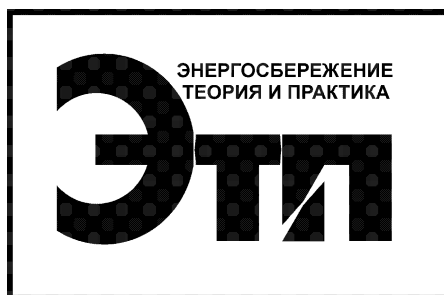
2. **А.А. Арбатский, А.В. Ладовский, С.И. Поляков** РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ; Энергосбережение – теория и практика: Труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 19–23 октября

2020 г.) – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. – 435 с.-

2. **ГОСТ Р 53583 — 2009** «Приборы отопительные. Методы испытаний»

3. **ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ С ПРЯМЫМ НАГРЕВОМ И СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА.** Исследование для коммерческого заказчика по договору от 28.05.2020г. № 2087200





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одиннадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 4

*Технологии водородной  
энергетики*

*А.А. Борисов, В.С. Королев, С.Н. Петин*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОЙ АККУМУЛЯЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается принцип использования газовых отходов высокотемпературных реакторов при использовании процесса энергохимической аккумуляции (ЭХА) для производства водорода. Проводится сравнение экспериментальных исследований процесса ЭХА на лабораторном стенде с результатами численного моделирования в программном комплексе ANSYS. Представлен анализ результатов математического численного моделирования в сравнении с результатами экспериментальных исследований, при этом показано, что максимальное отклонение результатов по температуре и составу продуктов  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  составляет 10%, что позволяет использовать полученные настройки CFD-системы для моделирования реакторов ЭХА для различных процессов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение актуальности использования водорода связано со снижением выбросов парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода. Обсуждение проблемы декарбонизации на Climate Action Summit 2019 привело к тому, что более 60 стран мира, в том числе страны ЕС и Великобритания, обязались прийти к полной углеродной нейтральности к 2050 г. Использование водорода в качестве элемента декарбонизации осложняется тем, что производство водорода характеризуется значительными выбросами парниковых газов при его производстве из природного газа. В Российской Федерации производство водорода в основном реализуется на основе природного газа, который составляет 19,1% от всех разведанных запасов природного газа в мире [1]. Однако такая технология относится к технологиям производства «серого» водорода. Снижение парниковых газов при производстве водорода из природного газа позволит обеспечить использование газовых отходов при протекании процессов термохимической рекуперации (ТХР) и энергохимической аккумуляции (ЭХА), варианты решений по данным процессам представлены в [2-4].

### 2. ЭНЕРГОХИМИЧЕСКАЯ АККУМУЛЯЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

Энергохимическая аккумуляция – это процесс физико–химического взаимодействия высокотемпературных газовых отходов с природным газом или другими углеводородсодержащими веществами с целью превращения их в топливный газ широкого применения. Общая схема использования процесса ЭХА, представлена на рисунке 1.

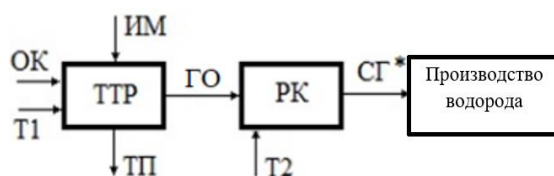
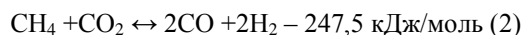
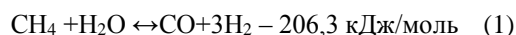


Рис.1 Схема ВТУ с ЭХА

ОК – окислитель, Т1 – топливо 1, ИМ – исходный материал, ТТР – теплотехнологический реактор, ГО – газовые отходы, РК – реактор конверсии, Т2 – топливо 2, СГ – синтез – газ, ТП – технологический продукт

Основными химическими реакциями процесса ЭХА является паровая и уголекислотная конверсия метана:



Представленные реакции являются эндотермическими, обеспечение теплоснабжения реакций обеспечивается за счет охлаждения газовых отходов, что позволяет обеспечить превращение теплоты во вторичное топливо (синтез – газ).

На данный момент, процесс ЭХА не имеет массового применения в производстве, поэтому стоит вопрос разработки конструкций реакторов данного процесса и оценки его конструктивных параметров. Использование методов математического моделирования для исследования реактора ЭХА представлено в [4], но в данной работе не представлена проверка использования данных результатов, основанная на физическом моделировании.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭХА

Экспериментальные исследования процесса ЭХА проводились на кафедре Энергетики высокотемпературной технологии МЭИ и представлены в [5,7], при использовании экспериментальной установки в виде туннельной печи, схема, которой представлена на рисунке 2.

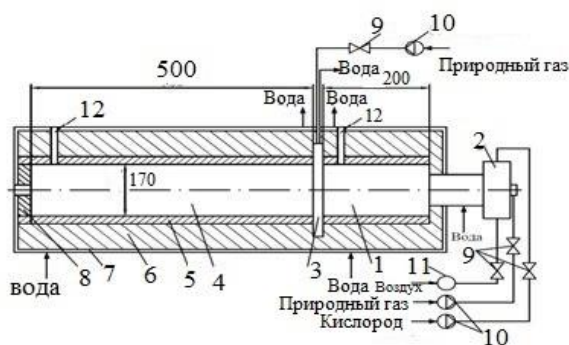


Рис.2 Схема экспериментальной установки ЭХА:

1 – камера сгорания; 2 – газогорелочное устройство; 3 – газовый коллектор; 4 – реакционный канал; 5 – огнеупорное ограждение канала; 6 – теплоизоляция; 7 – водоохлаждаемая рубашка; 8 – выходной пережим; 9 – регулировочные вентили; 10 – измерительные диафрагмы; 11 – ротаметр; 12 – штуцер для размещения газозаборной трубки

Установка содержит газогорелочное устройство 2, камеру сгорания 1, водоохлаждаемый газовый коллектор 3 и экспериментальный канал 4. Камера сгорания и экспериментальный канал представляют собой объем квадратного сечения с длиной стороны 170 мм. Канал выполнен из высокоглиноземистого огнеупора, а теплоизоляция канала выполнена из шамотного кирпича толщиной 65 мм. Длина камеры сгорания 200 мм, длина экспериментального канала 500 мм. Огнеупоры смонтированы в металлическом корпусе квадратного сечения 300x300 мм.

Подача природного газа для проведения процесса ЭХА производится через газовый коллектор 3. Коллектор выполнен в виде замкнутой трубки, которая имеет систему газовыпускных отверстий диаметром 1,3 – 2,0 мм, обеспечивающую равномерное распределение потока дополнительного газа в потоке продуктов сгорания, поступающих из камеры сгорания 1.

В таблице 1 представлены результаты экспериментального исследования охлаждения продуктов сгорания природного газа посредством ЭХА. Показано, что путем ввода природного газа в поток продуктов горения в количестве от 0,163-0,468 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> их температура снижается с 1400 °С до 1080 °С, при этом идет увеличение продуктов реакций паровой и углекислотной конверсий – СО и Н<sub>2</sub> при этом снижается доля СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О.

Таблица 1. Результаты физического эксперимента энергохимической аккумуляции

CH <sub>4</sub>	T	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	°С	%	%	%	%	%	%
0,000	1400	0	5,90	8,75	0,00	78,38	1,95
0,163	1270	7,39	3,45	7,70	0,00	75,26	1,29
0,245	1210	10,00	9,60	7,25	0,77	71,26	1,22
0,327	1155	11,63	10,52	6,70	0,91	68,91	1,48
0,409	1115	11,97	10,38	6,20	1,84	67,38	1,67
0,468	1080	12,90	10,41	7,00	2,00	65,82	1,25

### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОЙ АККУМУЛЯЦИИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА В ANSYS FLUENT

В настоящее время программные продукты для моделирования физико-химических процессов активно используются, при этом достоверность результатов моделирования основана на верификации результатов моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований. В работе в первую очередь решается задача по разработке геометрической модели экспериментального стенда в программном пакете SolidWorks, которая представлена на рисунке 3 с последующим импортом в программный пакет ANSYS при преждевременном экспорте в программную платформу SpaceClaim.

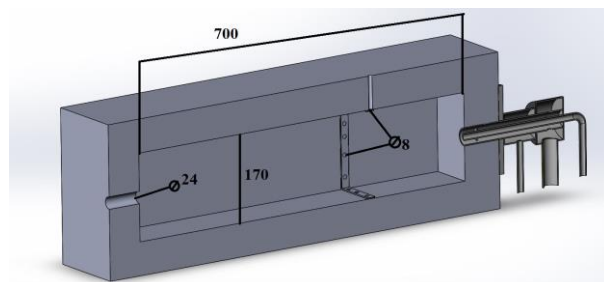


Рис.3 3-D модель лабораторного стенда по исследованию энергохимической аккумуляции

Для моделирования процессов горения и ЭХА использовался программный пакет FLUENT. Решение задачи проводилось по следующим этапам:

Первый этап – импорт модели геометрии твердотельного объекта.

Второй этап – построение расчетной сетки. На основе геометрической модели создается конечно-элементная сетка, с использованием которой выполняется решение уравнений, описывающих физику моделируемого процесса. Для данного объекта исследования построена тетраэдральная сетка, представленная на (рис.4). Этот тип сетки позволяет достаточно точно аппроксимировать сложную

произвольную геометрию изделия, и поэтому часто используется для анализа метода конечных элементов. Сетка была построена в программной платформе Mesh с использованием метода подраздела механики.

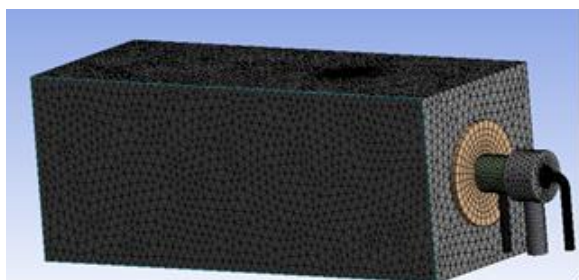


Рис.4 Построение сетки для лабораторного стенда

Третий этап – постановки задачи, на котором определяются физические модели, на основе которых происходит процесс моделирование. Он позволяет определить начальные и граничные условия процесса (входные, выходные параметры). Задание граничных условий (ограничений) – необходимый этап конечно элементного анализа. Число граничных условий для модели должно быть достаточным для расчета распределений всех известных величин. Разработанная в программном комплексе ANSYS Fluent [5] модель стенда по исследованию ЭХА включает в себя уравнения сохранения энергии, импульса, уравнение сохранения массы, уравнения диффузии. При выполнении работы использовалась Standard k-ε-модель турбулентности. Для реализации поставленной задачи используется решатель Relax to chemical equilibrium.

В качестве граничных условий в данной задаче были указаны скорости потоков топлива и окислителя на входе в горелку. Данные о скоростях энергоносителей были получены на основании расчета, при учете характеристик горелок.

Необходимая скорость потока природного газа при проведении процесса энергохимической аккумуляции, рассчитывается по формуле:

$$w_{\Gamma} = \frac{4 V_{\Gamma}}{\pi d_{\Gamma}^2} \quad (1)$$

$d_{\Gamma}$  - диаметр газового канала, мм;

$V_{\Gamma}$  - расход газа при данных условиях, м<sup>3</sup>/с;

Четвертый этап – представление результатов в графическом и расчетном вариантах. Анализ количественных и качественных результатов, полученных в ANSYS FLUENT, выполняется в ANSYS CFD-Post. Это платформа, предназначенная для анализа, визуализации и представления результатов, полученных в ходе решения задачи.

На основании результатов были построены эпюры температуры и состава продуктов реакции, которые представлены на рисунке 5, а также были представлены результаты моделирования значений, соответствующих результатам эксперимента, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты численного моделирование энергохимической аккумуляции

$\Delta CH$	$T_k$	$H_2$	$CO$	$CO_2$	$CH_4$	$N_2$	$O_2$
4							
м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	°C	%	%	%	%	%	4,0 8
0,000	140 0	0	2,28	7,3 0	3,1 5	83,1 9	0,1 6
0,163	116 1	9,50	7,69	6,1 1	0,2 2	76,3 3	0,0 4
0,245	108 3	12,8 8	9,05	5,5 0	0,2 4	73,4 9	0,0 2
0,327	103 6	14,7 7	9,72	5,1 3	0,2 8	71,0 5	0,0 1
0,409	100 7	16,6 5	10,2 7	4,8 7	0,2 8	68,7 5	0,0 1
0,468	100 4	17,9 6	10,8 4	4,4 6	0,2 9	66,3 3	0,0 2

Сравнение значений результатов физического и численного моделирования представлены на рисунках 6 и 7.



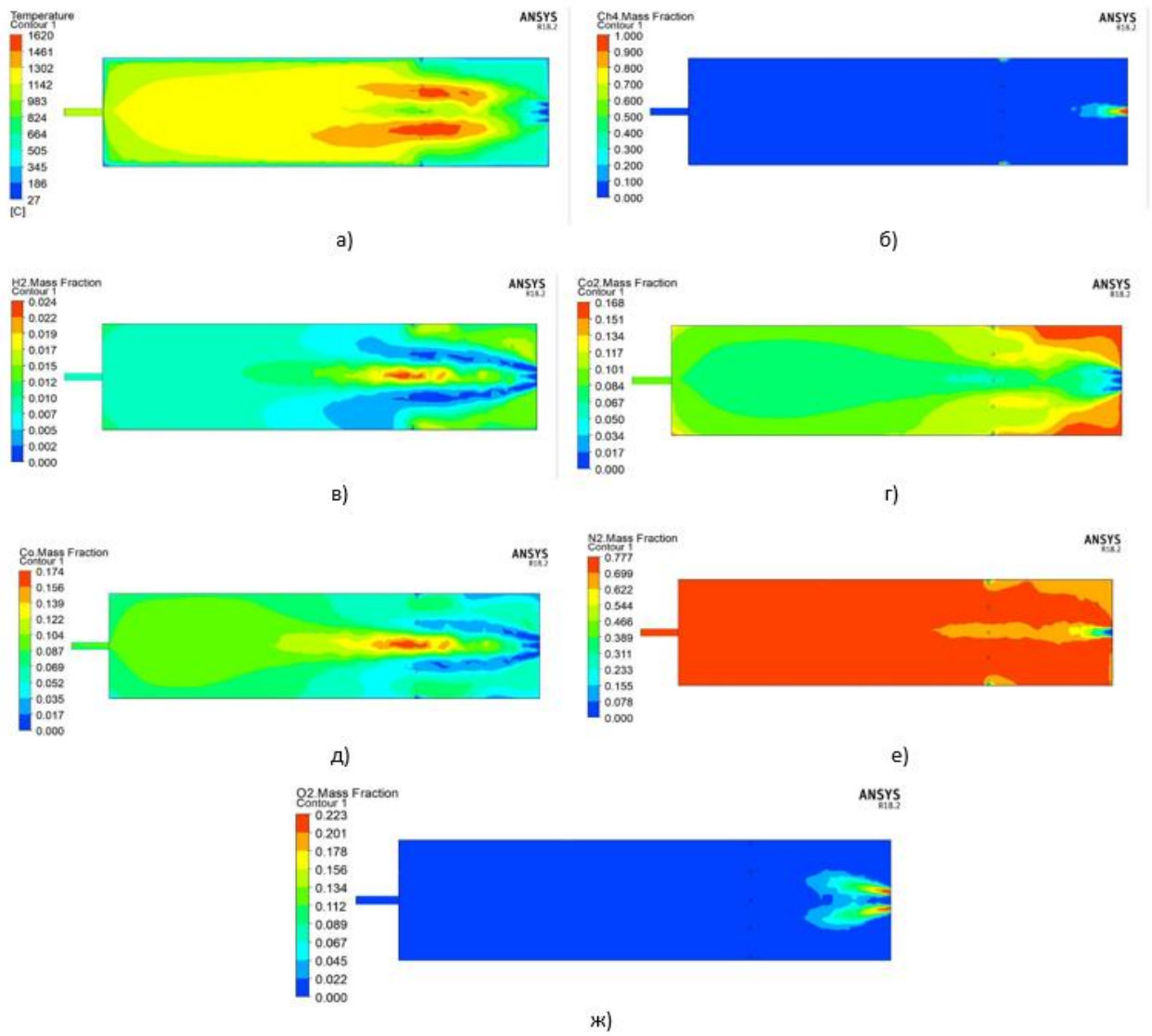


Рис. 5 Состав продуктов ЭХА при расходе газа 0,245 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>: а-температура; б-CH<sub>4</sub>; в-H<sub>2</sub>; г- CO<sub>2</sub>; д-CO; е-N<sub>2</sub>; ж-O<sub>2</sub>

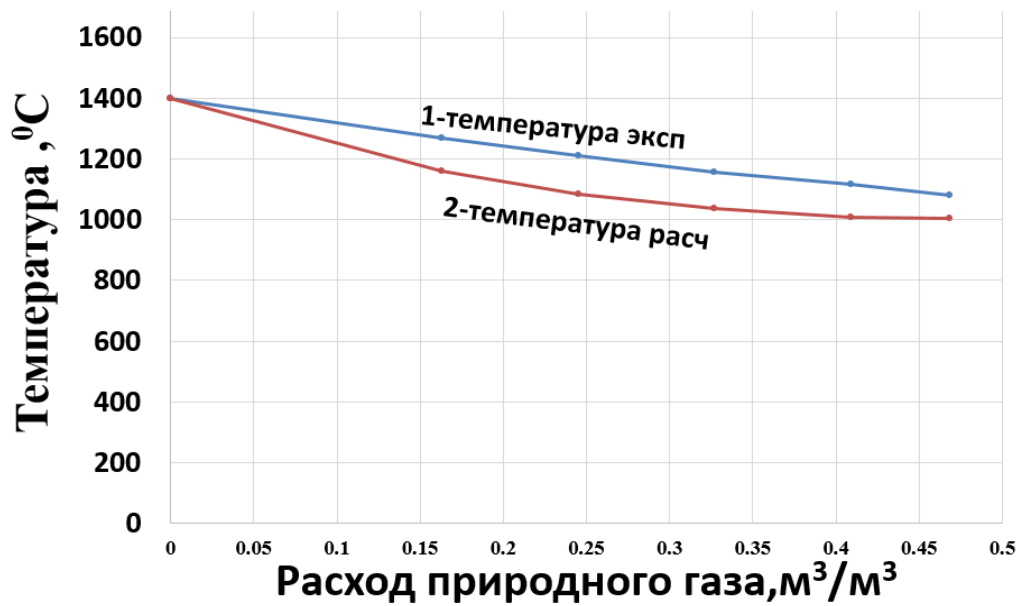
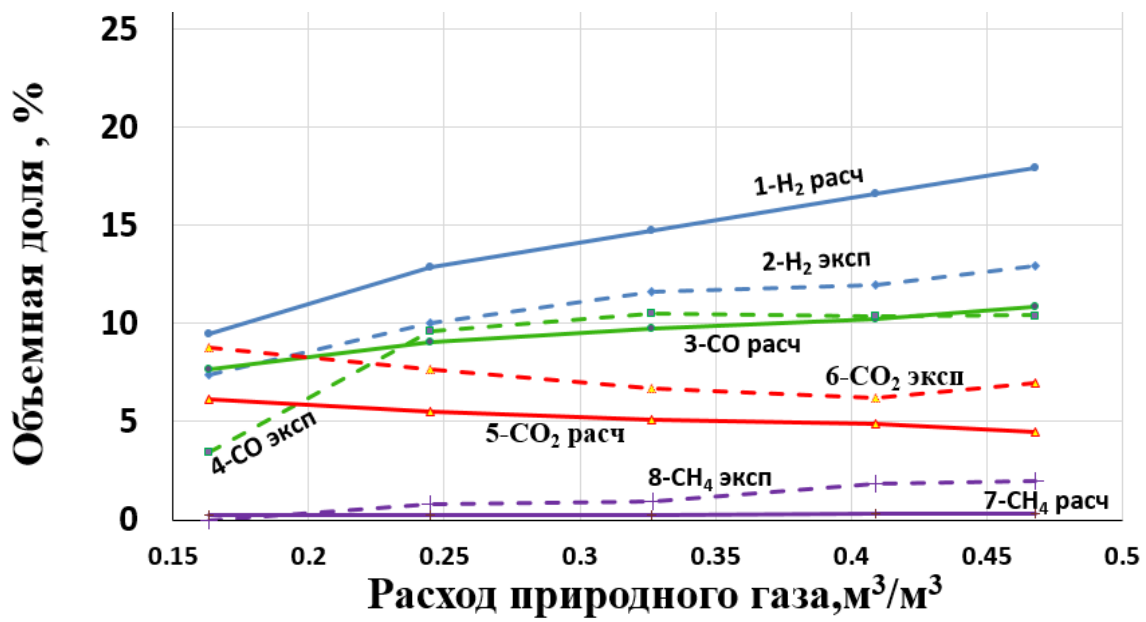
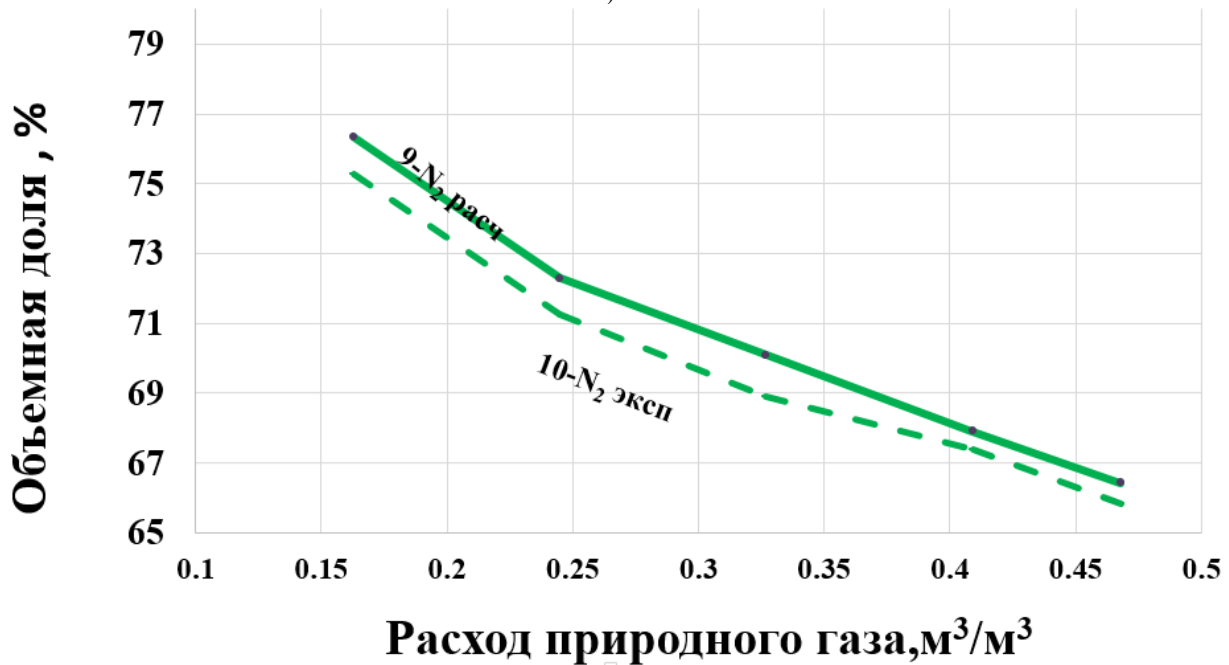


Рис. 6 График зависимости температур энергохимической аккумуляции от расхода природного газа  
1-экспериментальная; 2-расчетная



а)



б)

Рис.7 Графики зависимостей состава продуктов ЭХА от расхода природного газа  
1,3,5,7,9(расчетные) и 2,4,6,8,10(экспериментальные) 1,2-H<sub>2</sub>; 3,4-CO 5,6- CO<sub>2</sub>; 7,8-CH<sub>4</sub>; 9,10-N<sub>2</sub>

В данном разделе предлагается сравнить результаты физического эксперимента, полученных из (табл.1), с результатами автоматического расчёта в программной среде ANSYS (табл.2).

При анализе графиков видно, что показатели имеют разные погрешности, представленные в табл.3

Таблица 3. Погрешности результатов исследования

H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	t <sub>ans</sub>
32,49	4,61	25,19	77,08	1,26	96,22	9,22

Полученное отклонение результатов может быть связано с ограниченным количеством проведенного эксперимента. При разработке методики эксперимента важно правильно обосновать количество опытов, которое гарантирует требуемую точность результата. При количестве испытаний более десяти методика обоснования количества опытов базируется на неравенстве Чебышева (2):

$$P[|x - M(x)| \leq \varepsilon] \leq 1 - \frac{D(x)}{n \cdot \varepsilon^2} \quad (2)$$

Где n-количество проведенных опытов; x-среднее значение случайно измеряемой в ходе эксперимента величины; M(x)- математическое ожидание величины x; D(x)- дисперсия величины x, рассчитанная по результатам n опытов; ε – точность результата.

Неравенство Чебышева имеет следующую формулировку: «Вероятность того, что разница между среднестатистическим и математическим ожиданием M(x) не превысит точность результата ε, равна разности между единицей. Математическое ожидание – это число, относительно которого при неограниченном увеличении числа опытов устойчиво стабилизируется среднее арифметическое значение [9].

На основании приведенных графиков (рис.6 и 7) и сводных таблиц 1 и 2 видно, что результаты в различных расчетных системах получились схожие, это свидетельствует об их корректности, что дает право использовать математическую модель в дальнейших исследованиях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была реализована математическая модель стенда процесса ЭХА с верификацией данных, полученных в ходе физического эксперимента, что позволило убедиться в эффективности применения программного пакета Ansys для моделирования процесса ЭХА.

Проведён анализ экспериментальных данных ЭХА. Для расходов природного газа в диапазоне 0,163 – 0,468 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> подтверждено протекание процессов конверсий.

Разработан алгоритм расчёта процесса ЭХА в Ansys, данные которого соответствуют экспериментальным исследованиям. Средние показатели погрешностей по CO, N<sub>2</sub> и температуре продуктов ЭХА составляют 4,61%, 1,26% и 9,22 % соответственно. Рекомендуется использовать этот алгоритм при различных экспериментах с процессом ЭХА для широкого спектра высокотемпературных реакторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Statistical Review of World Energy 2020 [Электронный ресурс]. Режим доступа [Global energy-related CO<sub>2</sub> emissions by sector – Charts – Data & Statistics – IEA](#) (дата обращения 22.05.2022)
2. Петин, С.Н. Утилизация конвертерных газов с целью получения водорода / С.Н. Петин // Вестник МЭИ. – 2018. – № 1. – С. 29 – 33.
3. Попов, С.К. Патент на полезную модель №140760(РФ), МПК F 27 D 17/00. Устройство для утилизации тепловых отходов процесса конверсии природного газа / С.К. Попов, И.Н. Свистунов. – Заявлено 30.10.2013; опубл. 20.05.2014 г. Бюл. № 14.
4. Попов С.К. Энергохимическая аккумуляция высокотемпературных газовых отходов / С.К. Попов, С.Н. Петин, А.В. Бурмакина, П.А. Стогов // Теплоэнергетика. 2019. №2. С.51– 62.
5. Картавец, С.В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА / С.В. Картавец. – Магнитогорск: МГТУ, 2000
6. Григорьев, П.А., Петин, С.Н., Попов, С.К., Голдобин, Д.Д. Эффективное использование природного газа для производства водорода на металлургических предприятиях. НИУ «МЭИ», Газпром ВНИИГАЗ
7. Королева С.П., Кривцов А.В. Изучение процессов гомогенного горения предварительно несмешанных компонентов в ANSYS Fluent / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им –2013. С.2-45.
8. Орлов А.И. Математика случая. Вероятность и статистика-основные факты Учебное пособие. М.: МЗ-Пресс, 2004.С.110.

*Н.С. Сергиенко<sup>1</sup>, А.Ю. Свеженцева<sup>1</sup>, А.Н. Казаков<sup>2</sup>, Д.В. Блинов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

<sup>2</sup>Объединённый институт высоких температур (ОИВТ РАН),  
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13 стр.2.

## МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ С ФАЗАМИ ЛАВЕСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

### АННОТАЦИЯ

Никель-металлогидридные (Ni-MH) аккумуляторы обладают массой преимуществ для практического применения, такими как высокая удельная плотность хранимой энергии, устойчивость к перезаряду/переразряду, быстрой кинетикой заряд-разряда, экологичностью и безопасностью. Основным компонентом, влияющим на его характеристики, является водородопоглощающий материал. Для повышения механической стабильности и электропроводности используются различные добавки. В данной работе в качестве такой добавки выступал карбонильный никель, добавленный в сплавы АВ<sub>2</sub> типа с массовым соотношением 1:4. Были приготовлены и исследованы электрохимические свойства металлогидридных электродов, такие как активация, максимальная электрохимическая емкость и производительность при высоких плотностях тока, циклическая стабильность.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный рост энергопотребления повышает нагрузку на экосистему, это вынуждает людей создавать альтернативные источники энергии. В качестве такой альтернативы может выступать водород. Водород – универсальный вторичный энергоноситель, его удельная теплота сгорания в разы больше углеводородного топлива, для его производства существуют почти неограниченные ресурсы, он экологически безопасен, за счет того, что продуктом сгорания является вода [1]. Одним из безопасных способов хранения водорода является способ хранения водорода в металлогидридах. Водород в таких соединениях встраивается в кристаллическую решетку металлов, образуя с ними металлическую химическую связь. Такой метод хранения является крайне удобным, т.к. объем системы снижается в 3 раза, по сравнению с объемом хранения в баллонах.

На сегодняшний момент существуют высокоэффективные Ni-MH аккумуляторы, которые обладают массой преимуществ для практического применения, такими как высокая удельная плотность хранимой энергии, устойчивость к перезаряду/переразряду, быстрая реакция заряд/разряда, экологичность, безопасность и производительность металлогидридного электрода при высоких плотностях тока [1]. Сильное влияние на характеристики Ni-MH аккумулятора имеет водородопоглощающий материал, который используется в качестве

анода. Интерметаллические соединения (ИМС) способны обратимо поглощать и выделять водород при нормальных условиях [2]. ИМС для анодных материалов можно представить общей формулой  $A_mB_nH_x$ , где А – металл, образующий стабильный бинарный гидрид (La, Ce, Mm, Ti, Zr, V, Mg), а металл В в обычных условиях с водородом не взаимодействует (Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Al и другие). Согласно соотношению металла А к металлу В ИМС можно классифицировать в нескольких основных типах: АВ<sub>5</sub>, АВ<sub>2</sub>, АВ<sub>3-3.5</sub>, АВ, А<sub>2</sub>В, твердые растворы внедрения Ti, V. Характеристики и свойства каждого типа соединения сильно отличаются по водородной и разрядной емкостям, по активации и стабильности, за счет разного состава и разной кристаллической структуры. Помимо водородопоглощающих свойств ИМС, большое влияние на характеристики Ni-MH аккумулятора имеют параметры приготовления электродов: размеры частиц металлогидридного порошка [3-5], электропроводящие материалы, их массовое соотношение с активным материалом [6, 7], использование связующих компонентов [8], параметры прессования рабочих электродов [9,10].

Основной электропроводящей добавкой является никель, благодаря своей высокой электрокаталитической активности. Различное содержание никеля в металлогидридном электроде сильно влияет его на электрохимические свойства [6]. Для улучшения электрохимических параметров металлогидридных электродов для Ni-MH аккумуляторов, необходимо разработать новые варианты таких электродов.

Целью работы является разработка электродов на основе сплава АВ<sub>2</sub> типа  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  и  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$ , смешанные с карбонильным никелем в соотношении 1:4. А также экспериментальное определение и анализ их электрохимических свойств.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 2.1. Методика изготовления лабораторных образцов сплава

Лабораторные образцы ИМС изготовлены из навесок металлов в стехиометрическом соотноше-

нии. Чистота металла составляла не менее 99,5%. Вылавка проводилась в аргоновой печи с водоохлаждающим медным кристаллизатором. Для достижения высокой гомогенности состава, корольки сплава были проплавлены не менее трех раз.

## 2.2. Методика приготовления рабочих электродов

Для исследования электрохимических свойств металлгидридных электродов, корольки сплава был измельчен в агатовой ступке до фракции с средним размером частиц 45 мкм. Затем был приготовлен порошок с массовым соотношением металлгидридного материала и карбонильного никеля 1:4. Готовые электроды в виде таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм общей массой 0.5 г были приготовлены методом холодного прессования при давлении 25 МПа в течение 3 минут с помощью гидравлического пресса МР24А. Изготовленные таблетки запрессованы между пластинами пеноникеля, которые прикреплены к токоотводу, при давлении 5 МПа в течении одной минуты. Готовые электроды были помещены в трехэлектродную ячейку и активированы.

## 2.3. Методика активации электродов

Активация проводилась в стандартной трехэлектродной ячейке с 6М раствором КОН в качестве электролита и Hg/HgO электродом сравнения. В качестве противоиэлектрода использован коммерчески доступный Ni(OH)<sub>2</sub>/NiOOH с заведомо большей емкостью. Эксперименты проводились на многоканальном потенциостате Р-20Х8.

Для активации металлгидридного электрода было проведено 10 циклов заряда при плотности тока 100 мА/г в течение 4.5 часов и последующего разряда при той же плотности тока до потенциала 0.6 В. Время релаксации между зарядом и разрядом электрода составляло 0.5 часа. Производительность электрода при высоких плотностях тока была измерена в диапазоне плотностей тока разряда 100 – 1200 мА/г. Заряд электрода проводился при плотности тока 100 мА/г в течение 4 часов. Между каждым измерением был проведен единичный цикл заряд-разряд при плотности тока 100 мА/г для контроля состояния электрода. Измерения циклической стабильности проведены при плотности тока 300 мА/г в течение 100 циклов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

### 3.1. Активация металлгидридных электродов

Процесс активации металлгидридных электродов необходим для определения циклов заряда и разряда. Кривую заряда (рис.1.) условно можно разделить на три области. В начальной стадии заряда потенциал резко растет при незначительном увеличении емкости электрода, данная область со-

ответствует образованию α-твердого раствора и внедрению водорода в интерметаллид. Вторая область с практически неизменным равновесным потенциалом заряда (область плато) соответствует образованию и насыщению β-гидридной фазы. В конце процесса на зарядной кривой появляется второе плато с более высоким потенциалом, где происходит выделение водорода на электроде и означает полное насыщение металлгидридного электрода. В ходе разрядного процесса, изображенного на Рис. 2,3 металлгидрид выделяет водород и переходит из β-гидридной фазы в α-фазу.

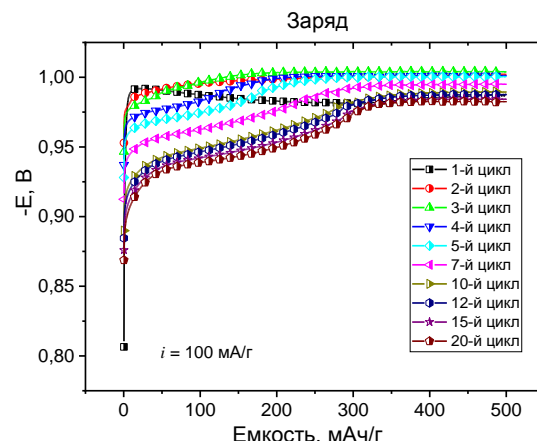


Рис. 1. Зарядные кривые металлгидридного электрода.

По мере полной активации металлгидридного электрода равновесные потенциалы заряда и разряда уменьшаются и увеличиваются, соответственно, тем самым снижается величина гистерезиса. Такой эффект характерен также для газофазной активации металлгидридных порошков [11, 12].

Расчеты разрядной емкости проводились с помощью уравнения:

$$C = I * \frac{t * 1000}{m * 3600}, \quad (1)$$

где  $I$  – сила тока, А,  $t$  – время, ч,  $m$  – масса, гр.

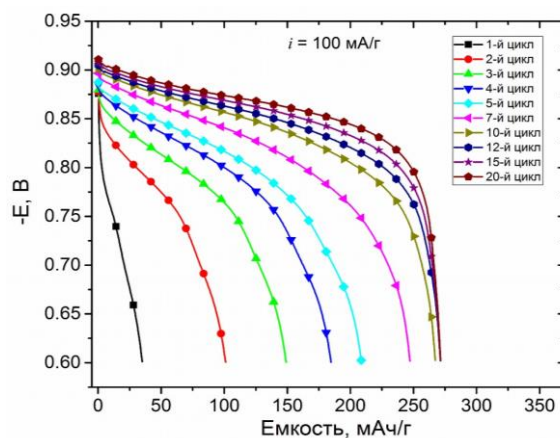


Рис. 2. Разрядные кривые металлгидридного электрода (Zr<sub>0.65</sub>Ti<sub>0.35</sub>Ni<sub>1.3</sub>V<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>Co<sub>0.1</sub>Al<sub>0.1</sub>).



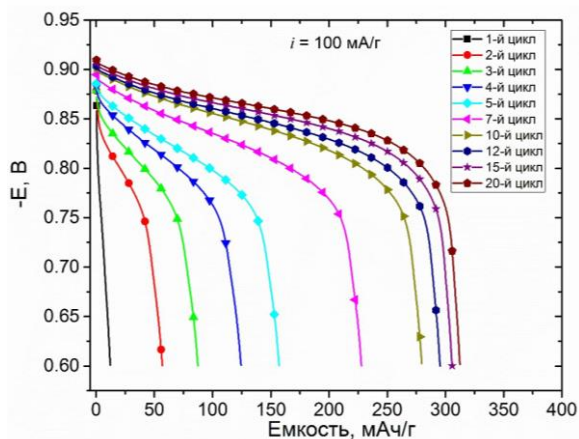


Рис. 3. Разрядные кривые металлгидридного электрода  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$ .

По мере полной активации электрода, максимальная разрядная емкость, также, как и равновесные потенциалы, увеличиваются и становятся постоянными только к концу активации на 12 и 20 цикле, соответственно (Рис. 4).

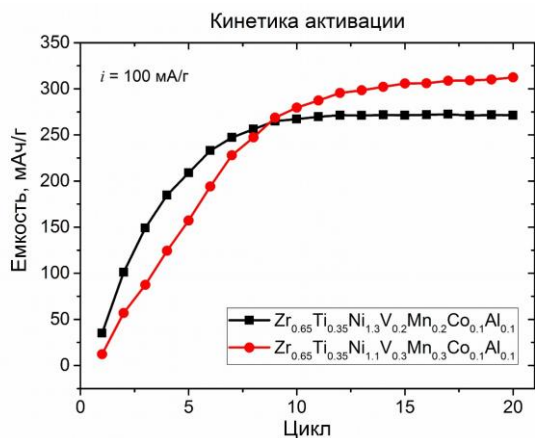


Рис. 4. Кинетика активации металлгидридных электродов.

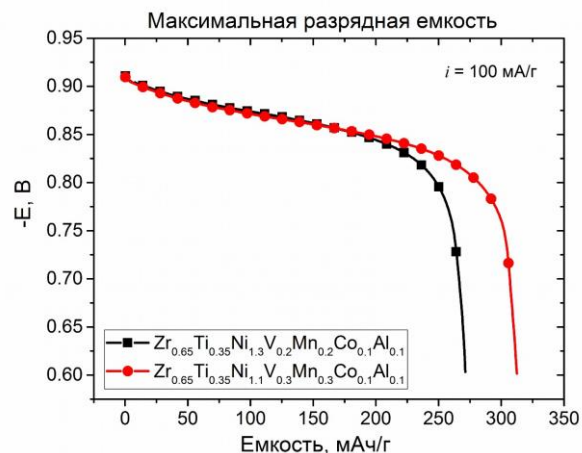


Рис. 5. Максимальные разрядные емкости активированных электродов.

Для второго сплава, где количество никеля меньше, в начале активации прослеживается худ-

шая динамика, за счет того, что никель является хорошим катализатором, однако из-за преобладания ванадия в сплаве, конечная разрядная емкость второго сплава выше и равна 312 мАч/г, когда как для первого сплава 271 мАч/г (Рис. 5).

### 3.2. Разряд металлгидридных электродов при высоких плотностях тока

Производительность металлгидридного электрода (HRD) при высоких плотностях тока является одним из ключевых характеристик при создании Ni-MH аккумуляторов. HRD показывает какую разрядную емкость от начальной может обеспечить металлгидридный электрод на плотностях тока, кратно превышающие рабочие. На Рис. 6 представлены разрядные кривые для плотностей тока от 100 до 1200 мА/г.

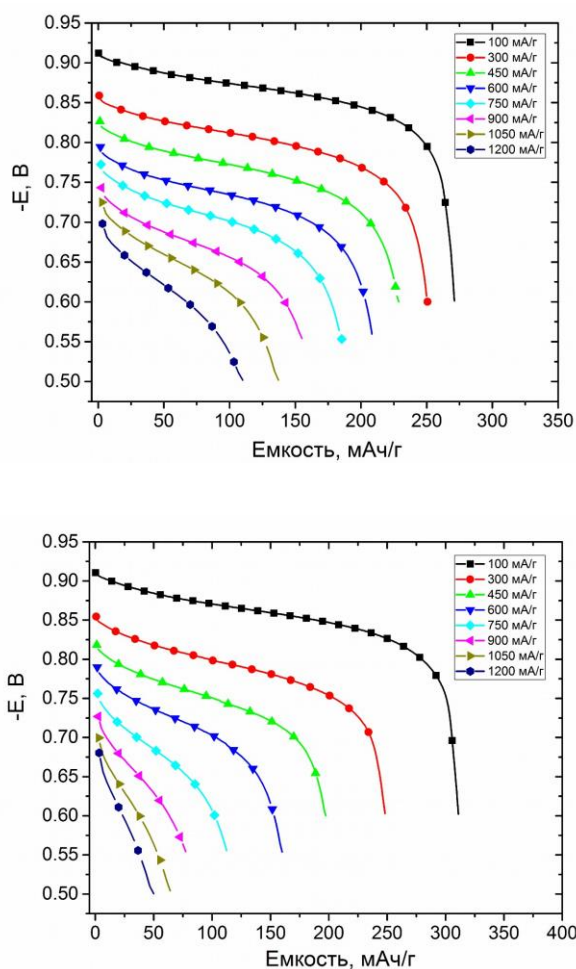


Рис. 6. Производительность металлгидридных электродов ( $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  (сверху),  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$  (снизу)).



Электрохимическая реакция в металлгидридных электродах связана с процессами массопереноса, переноса заряда и диффузии водорода. Перенос заряда на каталитической поверхности и диффузия водорода в объеме протекают одновременно и оба процесса являются лимитирующими в электродных реакциях [13,14]. При низких плотностях тока влияние переноса заряда превалирует над диффузией водорода, это определяет ширину плато равновесного потенциала. При высоких плотностях тока, определяющим фактором является скорость диффузии водорода из объема на поверхность электрода.

Максимальную разрядную емкость при 1200 мА/г показывает  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплав. Образцы показывают значительное снижение разрядной емкости и равновесного потенциала при увеличении плотности тока. Электрод на основе  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплава показывает 27.1% от исходной емкости, когда как электрод на основе  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплава демонстрирует 7.5% от исходной емкости (рис. 7).

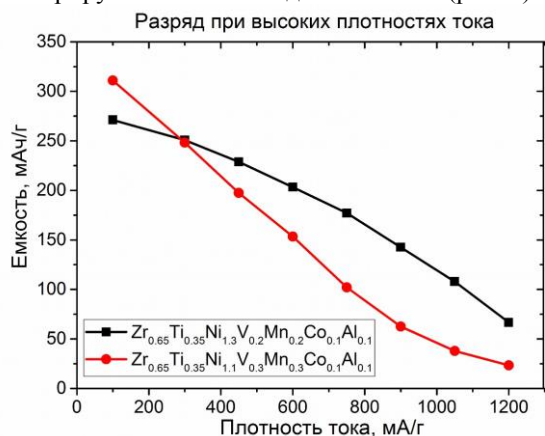


Рис. 7 Производительность металлгидридных электродов при высоких плотностях тока.

### 3.3. Циклическая стабильность металлгидридных электродов

Разрядные кривые для исследованных образцов при циклировании представлены на Рис. 8, 9.

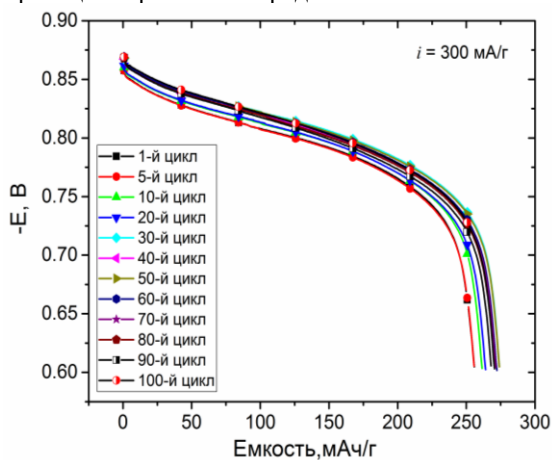


Рис. 8. Разрядные кривые при циклировании при высоких плотностях тока для  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплава.

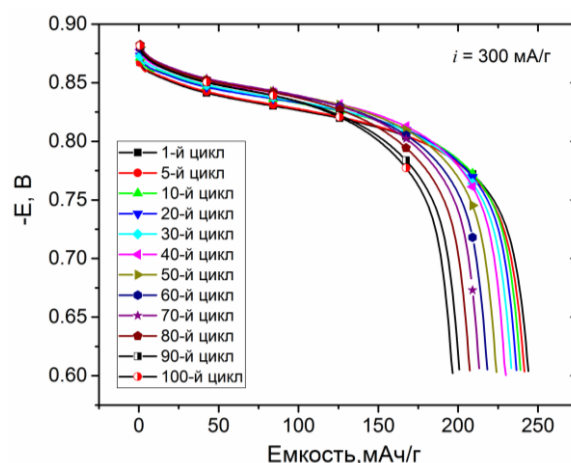


Рис. 9. Разрядные кривые при циклировании при высоких плотностях тока для  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплава.

Электрод на основе  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  сплава показывает высокую циклическую устойчивость при работе до 100 циклов с плотностью тока разряда 300 мА/г. Второй сплав демонстрирует худшую динамику, но при этом обладает более высоким равновесным потенциалом.

На Рис. 10 показана циклическая стабильность сплавов при плотности тока 300 мА/г, где наилучшие характеристики были получены для первого сплава (черная линия), потеря емкости для него после 100 циклов составила 5.7%, когда для второго сплава она равна 19.5%. Явной причиной такого снижения разрядной емкости считается механическая нестабильность изготовленных металлгидридных электродных таблеток, в циклических опытах происходит постепенное разрушение таблеток.

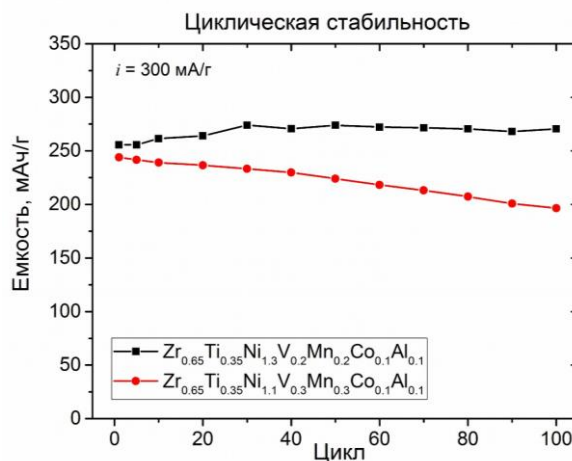


Рис. 10 Циклическая стабильность двух сплавов.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были разработаны металлгидридные электроды на основе сплавов  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  и  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$ . Также были изучены электрохимические свойства данных сплавов.

Анализ результатов показал, что электрод на основе сплава  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.3}V_{0.2}Mn_{0.2}Co_{0.1}Al_{0.1}$  демонстрирует наилучшие циклические характеристики

(потеря емкости после 100 циклов составляет всего 5.7%) и обладает лучшей кинетикой активации (активации происходит на 12 цикле), когда как  $Zr_{0.65}Ti_{0.35}Ni_{1.1}V_{0.3}Mn_{0.3}Co_{0.1}Al_{0.1}$  имеет большую разрядную емкость (составляется 312.4 мАч/г), а также имеет лучшую HRD (при  $i=1200$  мА/г, показывает 27.1 %).

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-01056-22-00).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Ni-MH — никель-металлогидридные аккумуляторы;

ИМС — интерметаллическое соединение;

$i$  — плотность тока, мА/г;

$C_{max}$  — максимальная разрядная емкость, мАч/г;

$I$  — сила тока, А;

$t$  — время, ч;

$m$  — масса, г;

HRD — производительность при высоких плотностях тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lemmon, J.P.**, Energy: Reimagine fuel cells. *Nature*, 2015. 525(7570): p. 447-9.
2. **Sandrock, G. and R.C. Bowman**, Gas-based hydride applications: recent progress and future needs. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003. 356-357: p. 794-799 DOI: [10.1016/s0925-8388\(03\)00090-2](https://doi.org/10.1016/s0925-8388(03)00090-2).
3. **Yuan, H., et al.**, Effect of particle size on the performance of rare earth-Mg-Ni-based hydrogen storage alloy electrode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013. 38(19): p. 7881-7887 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.050>.
4. **Humana, R.M., et al.**, Electrochemical behavior of metal hydride electrode with different particle size. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. 37(19): p. 14966-14971 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.093>.
5. **Gabis, I.E., et al.**, Influence of kinetics of hydrogen transport in a metal hydride anode on the discharge properties of the Ni-MH batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015. 629: p. 242-246 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.111>.

6. **Tian, X., et al.**, Effects of the mass ratio of carbonyl nickel powders to  $Mm_{0.3}M_{10.7}Ni_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$  alloy powders on the electrochemical properties of metal hydride electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009. 484(1): p. 882-885 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.060>.

7. **Lota, K., et al.**, Electrochemical properties of modified negative electrode for Ni-MH cell. *Current Applied Physics*, 2020. 20(1): p. 106-113 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.10.014>.

8. **Rogulski, Z., et al.**, Studies on metal hydride electrodes containing no binder additives. *Journal of Power Sources*, 2010. 195(22): p. 7517-7523 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.12.050>.

9. **Tian, X., et al.**, Effects of compaction pressure on the electrochemical properties of  $Mm_{0.3}M_{10.7}Ni_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.4}Al_{0.3}$  metal hydride electrodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011. 509(5): p. 1734-1738 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.025>.

10. **Thomas, J.E., E.B. Castro, and A. Visintin**, Influence of the compaction pressure on the electrochemical impedance spectroscopy response of the AB5-type electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010. 35(11): p. 5981-5984 DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.12.096>.

11. **Flanagan, T.B. and W.A. Oates**, Some thermodynamic aspects of metal hydrogen systems. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005. 404-406(0): p. 16-23 DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.11.108>.

12. **Flanagan, T.B. and J.D. Clewley**, Hysteresis in metal hydrides. *Journal of the Less Common Metals*, 1982. 83(1): p. 127-141 DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5088\(82\)90176-X](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5088(82)90176-X).

13. **Tliha, M., et al.**, Kinetic and thermodynamic studies of hydrogen storage alloys as negative electrode materials for Ni/MH batteries: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2014. 18(3): p. 577-593 DOI: 10.1007/s10008-013-2300-3.

14. **Ouyang, L., et al.**, Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review. *Materials Chemistry and Physics*, 2017. 200(Supplement C): p. 164-178 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.002>.

*А.Ю. Свеженцева<sup>1</sup>, Н.С. Сергиенко<sup>1</sup>, Д.В. Блинов<sup>1,2</sup>, А.Н. Казаков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

<sup>2</sup>Объединённый институт высоких температур (ОИВТ РАН),  
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13 стр.2.

## РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ $\text{LaNi}_5$ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

### АННОТАЦИЯ

Металлогидридные материалы используются в Ni-MH аккумуляторах, топливных элементах, системах очистки и хранения водорода. Варьирование состава позволяет в значительной степени изменять характеристики ИМС. В данной работе были исследованы водородсорбционные и электрохимические свойства металлогидридных материалов  $\text{AB}_5$  типа:  $\text{La}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$  и  $\text{La}_{0,6}\text{Ce}_{0,2}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с быстрым развитием промышленности и увеличением численности населения, в настоящее время наблюдается значительный рост производства и потребления энергии. Традиционные источники энергии в виде природных жидких и газообразных топлив являются исчерпаемыми, и представляют серьёзную опасность для окружающей среды [1]. Перед мировым сообществом возникает важнейшая цель: разработать и сделать общедоступными системы на основе экологически чистых источников энергии. Водород в качестве вторичного энергоносителя можно использовать в топливных элементах (ТЭ) совместно с нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии, что позволяет приблизиться к достижению поставленной задачи. В качестве таких источников может выступать энергия ветра, солнечная и геотермальная, а также энергия волн океана и биомассы [2].

Перспективным направлением для исследований являются щелочные ТЭ с металлогидридом в качестве водородаккумулирующего материала и анодного катализатора [3]. Они имеют ниже стоимость по сравнению с ТЭ с твёрдым полимерным электролитом, в которых используются дорогостоящие платиновые катализаторы. Также, в отличие от твёрдооксидных ТЭ, в которых из-за экстремально высоких температур возникают термические напряжения в конструкционных материалах, щелочные металлогидридные ТЭ (МГ ТЭ) имеют более высокую манёвренность и не нуждаются в дорогих уплотнениях и соединениях [4]. Поэтому задача по разработке электродов для металлогид-

ридных ТЭ и исследование их свойств является актуальной.

Эффективность МГ ТЭ во многом зависит от характеристик гидридообразующих анодных материалов [5]. Каждый интерметаллический сплав можно описать общей формулой  $\text{A}_n\text{B}_m\text{H}_x$ . В данной формуле буквой А обозначается металл, способный в соединениях образовывать стабильный гидрид (La, Ce, Mm, Ti, Zr, V, Mg), под буквой В стоит металл, который при нормальном давлении и температуре не вступает в реакцию с водородом (как правило переходный металл, например, Fe, Co, Ni, V, Mn, Cr и т.д.), Н- водород. Важное значение в практике имеют гидриды типов  $\text{AB}_5$  (А – редкоземельные металлы, Са),  $\text{AB}_2$  и  $\text{AB}$  (А – элементы подгруппы титана),  $\text{A}_2\text{B}$  (А – обычно Mg) [6]. Сплавы типа  $\text{AB}_5$  по-прежнему остаются самыми популярными материалами благодаря их высокой поверхностной каталитической активности, легкой активации и хорошей стабильности цикла [7].

Целью данной работы является разработка металлогидридных электродов и экспериментальное исследование их водородсорбционных и электрохимических свойств.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 2.1. Методика изготовления ИМС

Выплавление образцов ИМС ( $\text{La}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$  и  $\text{La}_{0,6}\text{Ce}_{0,2}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ ) проводилась в электродуговой печи фирмы Cianflone модели 2701 с нерасходуемым вольфрамовым электродом на водоохлаждаемом медном кристаллизаторе в аргоновой атмосфере. [8].

В исходных навесках использованы металлы с чистотой не менее 99,5%: La, Ce, Ni, Co, Mn, Al для первого сплава и La, Ce, Nd, Ni, Co, Mn, Al для второго в стехиометрических соотношениях. Рабочий вакуум в рабочей камере печи составлял 410–500 Па. Рабочая камера 2–3 раза продувалась аргоном высокой чистоты. Во время проведения плавки аргон подавался в рабочую камеру под давлением 41 кПа для поддержания стабильности ду-

ги. На начальном этапе навеска металлов сплавлялась при силе тока 250 А, полное плавление протекало при силе тока 400 А. Длительность каждого плавления составляла около 50...60 с для снижения испарения легкоплавких металлов. Для достижения однофазности образец переплавлялся не менее трех раз. Изготовленные корольки сплавов массой от 25 до 50 г охлаждались естественным путем в аргоновой атмосфере.

### Методика измерения водородсорбционных свойств

Установка, применяемая для гидрирования интерметаллических сплавов и измерения изотерм давление-концентрация в области давлений 0.001-10 МПа состоит из манометров, коммуникаций, автоклавов, вентилях, стеклянной калиброванной емкости с вакуумметром [9]. Общее значение примесей в газе, используемом в исследовании, составляло не более 0,01%, что говорит о высокой чистоте используемого водорода. В качестве подготовки, навеску образца весом около 3-5 г. очищали на корундовом кругу от поверхностной оксидной пленки, затем взвешивали и помещали в автоклав. С помощью форвакуумного насоса с низкотемпературной ловушкой с жидким азотом автоклав вакуумировался до давления 1 Па. Затем водород с чистотой 99.99% подавался из аккумулятора в буферный автоклав. Происходила фиксация количества водорода в системе. Буферный автоклав соединялся с рабочим. Весь процесс абсорбции водорода интерметаллическим соединением занимал 15-30 мин. После остановки реакции были зафиксированы параметры давления и температуры. Для получения данных изотерм выделения водорода проводился отбор калиброванных порций водорода из рабочего автоклава в вакуумированный сосуд. Равновесие в системе было признано достигнутым, если изменения давления не происходило в течение 20 минут.

### 2.2. Методика изготовления электродов

Полученные корольки были раздроблены на небольшие куски (3-6 мм) и перемолоты в агатовой ступке до размера фракций 40-60 мкм. Данные размеры контролировались при помощи лабораторных сит. Готовые порошки интерметаллических сплавов были взвешены на аналитических весах и смешаны с карбонильным никелем в соотношении 1:4. Карбонильный никель необходим для улучшения электропроводности и контакта материала, а также для компенсации напряжений кристаллической решетки сплава при сорбции-десорбции водорода, которая может достигать 30% по объему. Полученные смеси были спрессованы в гидравлическом прессе под давлением 25 МПа в течение 3 минут в таблетку размерами ( $d = 10$  мм;  $h = 1$  мм). Затем изготовленные таблетки были заключены между двумя пластинами из пеноникеля ( $20 \times 20$

мм) с токоотводом и спрессованы при 5 МПа в течение 1 минуты.

### 2.3. Методика электрохимических измерений

Изготовленные электроды на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  и  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  для проведения исследований электрохимических свойств были погружены в 6М раствор КОН комнатной температуры и подключены к трёхэлектродной ячейке. Электродом сравнения является Hg/HgO электрод, противозлектрод представлен коммерческим  $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$  с заведомо большей емкостью.

Все электрохимические измерения проводились с помощью многоканального потенциостата-гальваностата Р-20Х8 фирмы ElectroChemical Instruments. Активация электродов проводилась при плотности тока заряда-разряда 60 мА/г в течение 7.5 часов. Разряд был ограничен потенциалом -0.6 В. Производительность электродов при высоких плотностях тока проводилась в диапазоне плотностей разрядного тока 300 – 2100 мА/г. Исследования циклической стабильности электродов проводились при плотности тока  $i = 300$  мА/г в течение 60 циклов

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Водородсорбционные свойства ИМС

ИМС  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  и  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  обладают высокой кинетикой активации. Сорбция водорода протекала без предварительной активации. После насыщения водородом корольки сплавов становились мелкодисперсными порошками серого цвета, активными на воздухе. Серии изотерм для ИМС  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  и  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  при температурах 295 – 333 К представлены на Рис. 1-2.

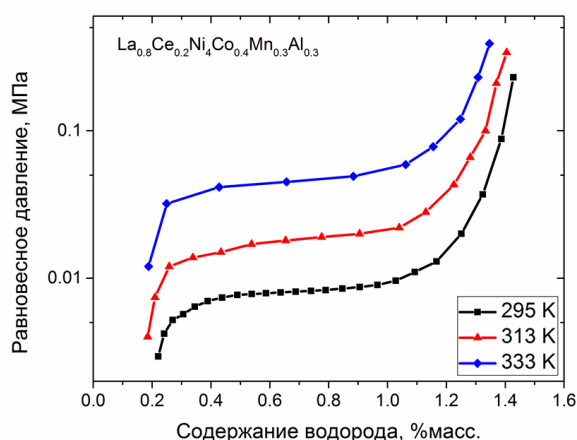


Рис. 1 PCT диаграммы  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

Все подготовленные образцы ИМС показали широкую область равновесного давления и незна-

чительный наклон плато, что важно для практического использования.

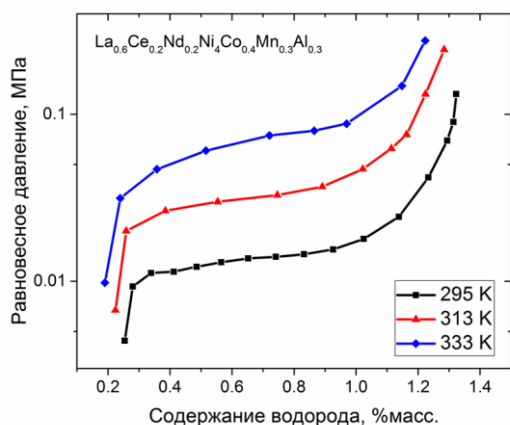


Рис. 2 РСТ диаграммы  $\text{La}_{0,6}\text{Ce}_{0,2}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ .

Равновесные давления десорбции водорода находятся в диапазоне 0,005-0,01 МПа и показывают наличие довольно плоского плато. Наибольшая водородоемкость 1,23 масс.% наблюдается для сплава  $\text{La}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ . Частичное замещение La на Nd несколько снижает массовую концентрацию водорода и повышает равновесное давление водорода. На основании полученных данных была построена диаграмма Вант-Гоффа (Рис. 3).

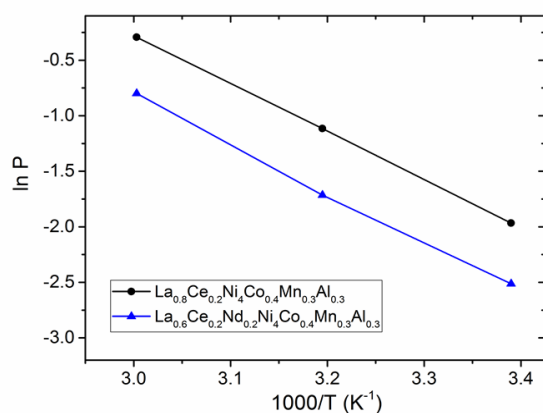


Рис. 3 Диаграмма Вант-Гоффа.

Термодинамические параметры десорбции водорода – изменение энтальпии ( $\Delta H$ ) и энтропии ( $\Delta S$ ) рассчитывают по РСТ изотермам при различных температурах по уравнению Вант-Гоффа. Все исследованные сплавы достаточно стабильны с  $\Delta H$  десорбции водорода около 36 – 37 кДж/моль  $\text{H}_2$  и с  $\Delta S$  порядка 103-105 Дж/моль\*К.

### 3.2. Активация металлгидридных электродов

Металлогидридные электроды были погружены в щелочной раствор на 2 часа для полного смачивания, а затем активированы до полной зарядки в течение 10 циклов при плотности тока 60 мА/г в течение 7,5 часов, а затем разряжены при такой же

плотности тока до напряжения отсечки 0,6 В (Рис. 4-5).

В процессе активации определяется количество циклов заряда/разряда после которых электрод выйдет на рабочую емкость. На графиках (Рис. 4-5) можно наблюдать, как с каждым последующим циклом уменьшается гистерезис.

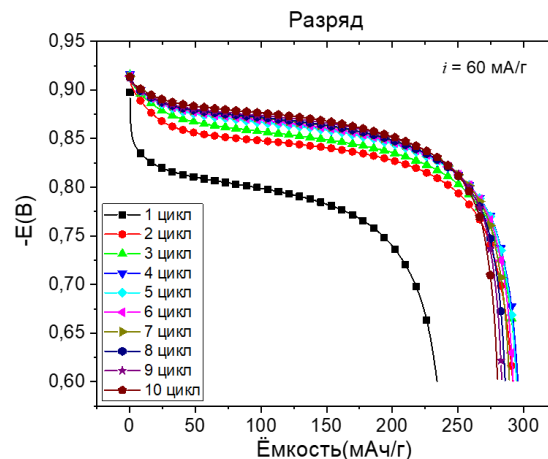


Рис. 4 Разряд электрода на основе  $\text{La}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ .

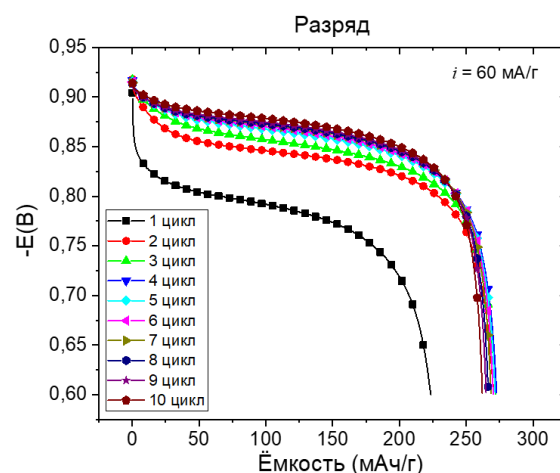


Рис. 5 Разряд электрода на основе  $\text{La}_{0,6}\text{Ce}_{0,2}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$ .

Электрохимические измерения показывают, что электроды на основе  $\text{La}_{0,8}\text{Ce}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$  и  $\text{La}_{0,6}\text{Ce}_{0,2}\text{Nd}_{0,2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0,4}\text{Mn}_{0,3}\text{Al}_{0,3}$  обладают хорошими активационными свойствами, так как образцы быстро активируются во 2-3 цикле, что характерно для данных сплавов [10, 11].

На Рис. 6 можно наблюдать, как меняются значения емкости для двух электродов в течение десяти циклов в процессе разряда.

Значение разрядной емкости (Рис. 7) образца с частичной заменой лантана неодимом составляет  $C_{max} = 272$  мАч/г, тогда как у второго образца без добавления неодима её значение значительно выше и достигает  $C_{max} = 295$  мАч/г.



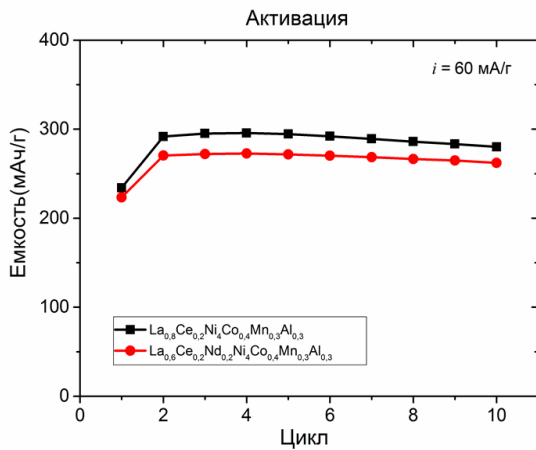


Рис. 6 Активационная эффективность электродов.

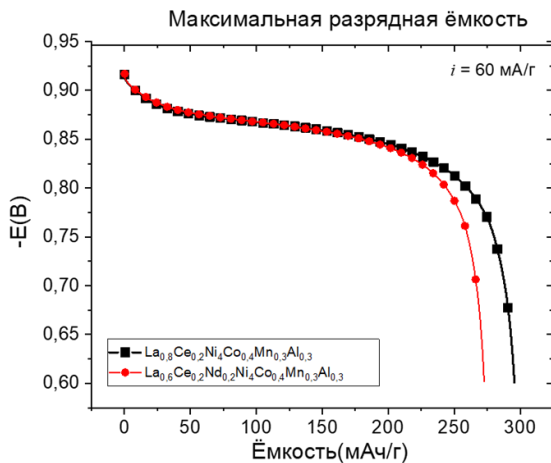


Рис. 7 Максимальная разрядная ёмкость электродов.

### 3.3. Исследование циклической стабильности электродов

Исследования циклической стабильности электродов проводились при плотности тока  $i = 300 \text{ мА/г}$  в течение 60 циклов. По результатам исследований, образец на основе  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  имеет более высокую устойчивость к циклической нагрузке. Результаты измерений отображены на Рис. 8-10.

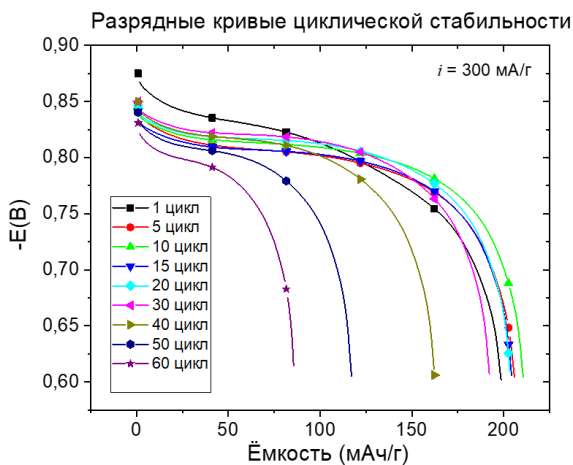


Рис. 8 Циклическая стабильность электрода на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

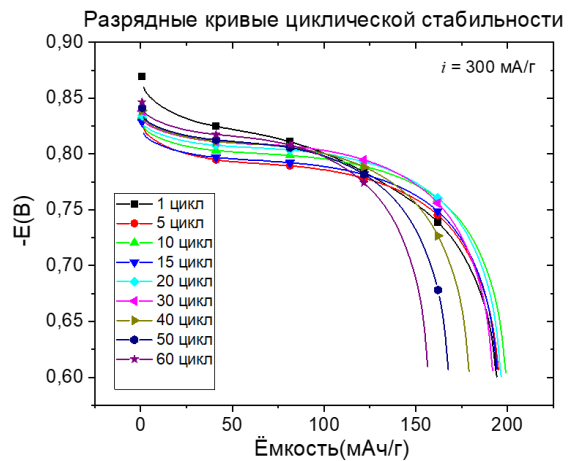


Рис. 9 Циклическая стабильность электрода на основе  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

В течение первых 20 циклов значения ёмкостей образцов электродов практически не изменяются, что говорит о наличии некоторого инкубационного периода. Затем отмечается резкое снижение ёмкости образца без добавления неодима.

Чем выше циклическая стабильность электрода, тем дольше сможет работать аккумулятор. Для образца на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  потери ёмкости в течение 60 циклов составили 56,9%, когда как для образца на основе  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  всего 19,5%.

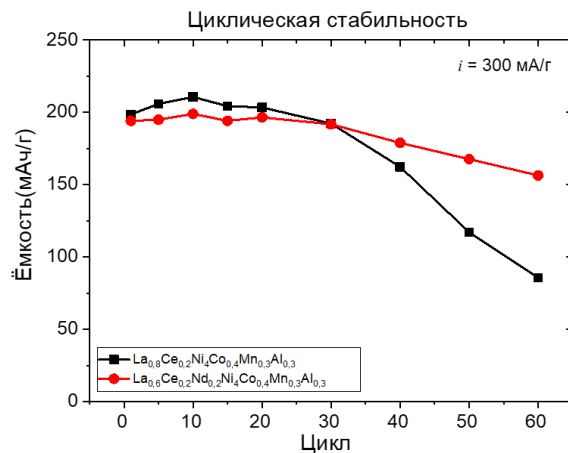


Рис. 10 Циклическая стабильность электродов.

### 3.4. Исследование производительности при высоких плотностях тока

Производительность металлгидридного электрода при высоких плотностях тока (HRD) является одной из важнейших характеристик при создании Ni-MH аккумуляторов. HRD показывает какую разрядную ёмкость от начального значения может обеспечить МГ электрод на плотностях тока,кратно превышающие рабочие. Перенос заряда на каталитической поверхности и диффузия водорода в объеме протекают одновременно и оба процесса являются лимитирующими в электродных реакциях [6, 12].



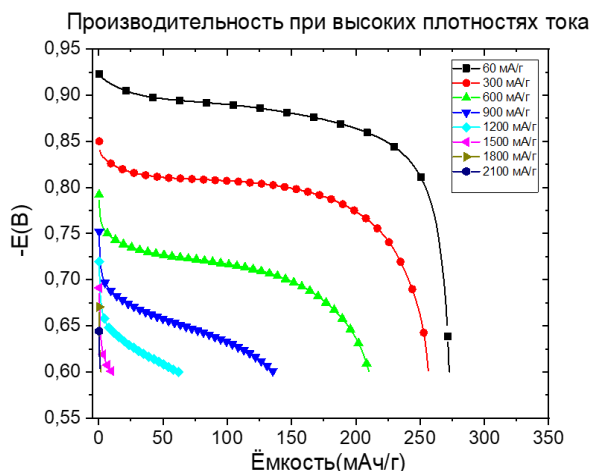


Рис. 11 Производительность при высоких плотностях тока электрода на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

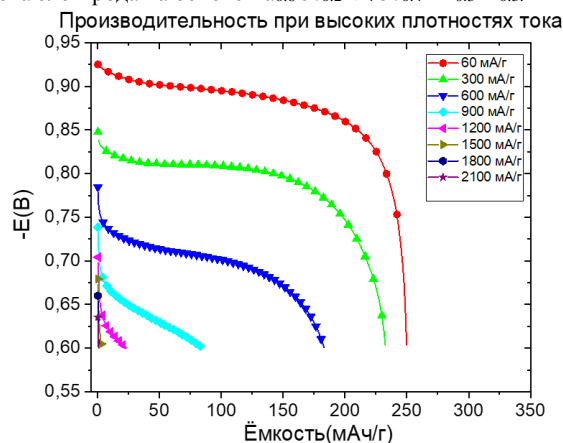


рис. 12 производительность при высоких плотностях тока электрода на основе  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

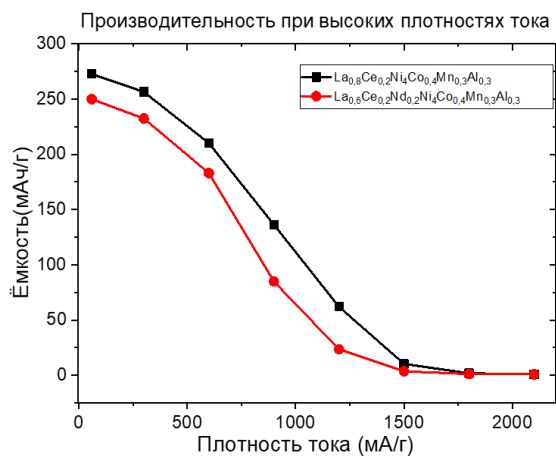


Рис. 13 Производительность при высоких плотностях тока.

При увеличении плотности тока разряда наблюдается снижение разрядной емкости и равновесного потенциала обоих образцов. Равновесный потенциал при повышении плотности тока разряда снижается в значительной степени (Рис. 11, 12). На момент окончания измерения при потенциале  $-0.6$  В для разрядных кривых с плотностью тока свыше  $900$  мА/г наблюдается недоразряд электрода, что в конечном итоге приводит к занижению емкостных характеристик.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были разработаны электроды на основе интерметаллических сплавов  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  и  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  и исследованы их водородсорбционные и электрохимические свойства.

Частичное замещение лантана неодимом в интерметаллических сплавах, используемых для изготовления металлгидридных электродов, незначительно снизило максимальные водородную и разрядную емкости. Электроды на основе сплава  $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  имеют более низкую максимальную разрядную емкость  $272$  мАч/г, однако в испытаниях циклической стабильности показывают лучшие результаты  $80,5\%$  от начальной емкости после  $60$  циклов по сравнению с электродами на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-01056-22-00).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИМС — интерметаллическое соединение;  
ТЭ — топливный элемент;  
МГ — металлгидрид;  
 $i$  — плотность тока, мА/г;  
 $C$  — разрядная емкость, мАч/г;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abdelkareem, M. A., Elsaid, K., Wilberforce, T., Kamil, M., Sayed, E. T., and Olabi, A.,** Environmental aspects of fuel cells: A review, *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 752, p. 141803.
2. **Larcher, D. and J.M. Tarascon,** Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, 2015. 7(1): p. 19-29 DOI: 10.1038/nchem.2085.
3. **Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Логоцкий М.В., Яртысь В.А.** Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2005. № 12. С. 14 – 37.
4. **Lehmann, J.P.,** Energy: Reimagine fuel cells. *Nature*, 2015. 525(7570): p. 447-9.
5. **Тарасов, Б.П., М.В. Логоцкий, and В.А. Яртысь,** Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулирования водорода. *Российский Химический Журнал*, 2006. L(6): p. 34.
6. **Ouyang, L., et al.,** Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review. *Materials Chemistry and Physics*, 2017. 200(Supplement C): p. 164-178
7. **Råde, I. and B.A. Andersson,** Requirement for metals of electric vehicle batteries. *Journal of Power Sources*, 2001. 93(1): p. 55-71.
8. **А. Н. Казаков, Д. О. Дуников, В. И. Борзенко:** Разработка методики изготовления и исследования образцов интерметаллических соединений для систем хранения и очистки биоводорода // *Теплофизика и ядерная энергетика*. УДК 621.039.533.6. 2013
9. **С. П. Малышенко. И. А. Романов.** “Исследование термодинамических свойств водородпоглощающего сплава  $\text{LaFe}_{0.1}\text{Mn}_{0.3}\text{Ni}_{1.8}$  для систем аккумулирования и очистки водорода”. *TBT*. 52:3 (2014), 415–422; *High Temperature*. 52:3 (2014). 404–411
10. **Lota, K., et al.,** Electrochemical properties of modified negative electrode for Ni-MH cell. *Current Applied Physics*. 2020. 20(1): p. 106-113
11. **Rogulski, Z., et al.,** Studies on metal hydride electrodes containing no binder additives. *Journal of Power Sources*, 2010. 195(22): p. 7517-7523
12. **Tiiba, M., et al.,** Kinetic and thermodynamic studies of hydrogen storage alloys as negative electrode materials for Ni/MH batteries: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2014. 18(3): p. 577-593

*Т.А. Гатауллин<sup>1,2</sup>, А.Н. Казаков<sup>1</sup>, Д.О. Дуников<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Россия

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ АВ<sub>5</sub> ТИПА

### АННОТАЦИЯ

Металлогидридные материалы активно используются в качестве анодных материалов для Ni-MH аккумуляторов. Для повышения электропроводности, механической стабильности электродов используется отжиг анодного материала. В данной работе приготовлены и исследованы металлогидридные электроды на основе сплава АВ<sub>5</sub> типа, смешанные с карбонильным никелем из неотожженного и отожженного металлогидрида. Изучены электрохимические свойства приготовленных электродов, такие как активация, максимальная электрохимическая емкость, производительность при высоких плотностях тока и циклическая стабильность.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование традиционных видов топлива вызывает общемировую обеспокоенность из-за загрязнения атмосферы “парниковыми газами” и климатических изменений. Мировое общество находится в поиске экологически чистых, энергоэффективных и возобновляемых источников энергии. Переход от традиционных энергоносителей к возобновляемым, энерго- и ресурсосберегающим технологиям производства энергии поднимает ряд задач, среди которых одним из ключевых является разработка и создание эффективных систем аккумулирования энергии. Аккумулирование энергии является ключевой технологией в модернизации энергетического сектора во всем мире. Электрохимическое хранение энергии является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений. Электрохимические аккумуляторы могут быть использованы не только как источники питания для мобильных и портативных устройств, но и для гибридных и электрических автомобилей, выравнивания нагрузки в электросетях основе ВИЭ [1].

Никель-металлогидридные (Ni-MH) аккумуляторы обладают рядом преимуществ для практического применения, такими как высокая удельная плотность хранимой энергии, устойчивость к перезаряду/перезаряду, быстрой кинетикой заряд-разряда, экологичностью и безопасностью. Основным компонентом Ni-MH аккумуляторов, влияющим на их характеристики, является водородпоглощающий материал, используемый в качестве анода. Интерметаллические соединения (ИМС) способны обра-

тимо поглощать и выделять водород при нормальных условиях [2]. Интерметаллические соединения для анодных материалов можно представить общей формулой  $A_mB_nH_x$ , где А – металл, образующий стабильный бинарный гидрид (La, Ce, Mm, Ti, Zr, V, Mg), а металл В в обычных условиях с водородом не взаимодействует (Ni, Co, Fe, Mn, Cr, Al и другие). В зависимости от соотношения металла А к металлу В ИМС можно классифицировать в нескольких основных типах: АВ<sub>5</sub>, АВ<sub>2</sub>, АВ<sub>3-3.5</sub>, АВ, А<sub>2</sub>В, твердые растворы внедрения Ti, V. Характеристики каждого типа сплавов в значительной степени отличаются по водородной емкости, разрядной емкости, активации и стабильности из-за различного состава и кристаллической структуры [3]. Для использования металлогидридных материалов в электрохимических источниках энергии необходимо, чтобы они обладали высокой обратимой водородной емкостью (>1 %масс), высокой каталитической активностью, устойчивостью к коррозии в электролите и механической стабильностью, длительным сроком службы [4]. Одним из способов улучшения электрохимических свойств электродов является термический отжиг образцов ИМС [5, 6].

Целью настоящей работы является исследование влияния термического отжига на электрохимические свойства металлогидридных электродов на основе ИМС АВ<sub>5</sub> типа.

Для достижения цели работы будут решены следующие задачи:

- Изготовление лабораторного образца ИМС методом дугового плавления и выполнение термического отжига в аргоновой атмосфере;
- Анализ фазового состава и кристаллической структуры приготовленных образцов;
- Исследование водородсорбционных свойств образца ИМС методом Сиверта;
- Изготовление металлогидридных электродов, противоэлектродов и сборка трехэлектродной электрохимической ячейки, ознакомление с методиками проведения измерений на потенциостат-гальваностате Р-20Х8;
- Исследование электрохимических свойств электродов из исходного и отожженного образцов ИМС.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ИМС АВ5 типа  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  приготовлено в электродуговой печи фирмы Cianfloce модели 2701 с нерасходуемым вольфрамовым электродом на водоохлаждаемом медном кристаллизаторе в аргоновой атмосфере. Чистота исходных металлов составляет не менее 99.5%. Первым шагом в создании сплава является приготовления стехиометрической навески металлов, после чего она погружается в рабочую камеру. Далее происходит вакуумирование и продув аргоном, после чего сплав проплавляется не менее 50-60 секунд до четырех раз для достижения высокой однородности состава. После выплавки поверхность королька ИМС очищена от оксидной пленки, корольки раздроблены на небольшие куски (5-7 мм). Навеска обернута в молибденовую фольгу, запаяна в ампулу с порошком титана в аргоновой атмосфере и подвержена термическому отжигу в трубчатой электропечи ПТК-1,2-40 при 1173 К в течение 20 часов с последующей закалкой в ледяной воде.

Кристаллическая структура и фазовый состав исходного и отожженного образцов были определены методом рентгеновской дифракции на диффрактометре Bruker's D8 ADVANCE с медным излучением. Порошки для рентгеновского анализа получены механическим растиранием в агатовой ступке. Измерения  $2\theta$  углов проводилось в диапазоне  $15 - 80^\circ$ , шаг измерения составлял  $0.02^\circ$ , время экспозиции в точке – 1 с. Обработка диффракционных данных проведен с помощью программного обеспечения Jana2006 и Crystal Impact Match с использованием рентгенографических баз данных JCPDS PDF-2.

Для приготовления рабочих электродов и исследования их электрохимических свойств исходный и от образцов был измельчен до состояния порошка. Далее приготовлен из порошковой фракции с размерами частиц 40 – 50 мкм, таким образом средний размер частиц предполагается равным 45 мкм. Электрод в виде таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм общей массой 0.5 г, состоящий из металлгидридного порошка и карбонильного никеля в соотношении 1:4, приготовлен методом холодного прессования при давлении 25 МПа в течение 3 минут. Затем изготовленная таблетка запрессована между пластинами пеноникеля, прикрепленных к токоотводу.

Электрохимические измерения проводились в стандартной трех-электродной ячейке с 6М раствором КОН в качестве электролита и ртуть-оксидным электродом сравнения. В качестве противоиэлектрода использован коммерчески доступный  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  с заведомо большей емкости. Эксперименты проводились на многоканальном потенциостате Р-20Х8.

Для активации металлгидридного электрода проведено 10 циклов заряда при плотности тока 100 мА/г в течение 4.5 часов и последующего разряда при той же плотности тока до потенциала 0.6 В. Время релаксации между зарядом и разрядом электрода составляло 0.5 часа. После активации последовательно проведены измерения производительности электрода при высоких плотностях тока и циклической стабильности. Производительность электрода при высоких плотностях тока была измерена в диапазоне плотностей тока разряда 300 – 1050 мА/г. Заряд электрода проводился при плотности тока 100 мА/г в течение 4 часов. Циклическая стабильность исследовалась в течении 100 циклов. Зарядка происходила при 300 мА/г, а разрядка происходила при той же плотности тока до потенциала 0.6 В.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Статья I. 3.1 Анализ фазового состава и водородпоглощающие свойства

Отожженный образец был отправлен на рентгенографию. Фазовый состав и кристаллическая структура сплавов определялась рентгенофазовым методом анализа с помощью диффрактометра D8 ADVANCE (Bruker) (Рис. 1). Уточнение параметров элементарной ячейки проводилось методом Ритвельда с использованием программы для обработки полученных результатов Jana2006. Теоретическая диффрактограмма для полнопрофильного уточнения рассчитывалась на основе структурных данных, взятых из литературных источников.

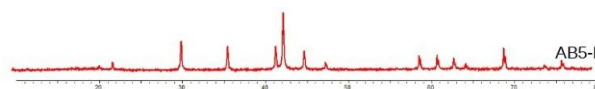


Рис. 1. Диффрактограмма для отожженного сплава АВ5.

Для определения перспективности полученного сплава оценивают параметры, такие как равновесное (эквивалентное) давление, протяженность и наклон плато сорбции-десорбции водорода, а также термодинамические параметры образования и разложения гидридов (энтальпия, энтропия).

Водород-сорбционные свойства сплава исследовали с помощью газовой РСТ (давление-концентрация-температура) установки типа Сивертса (Рис. 2). Образец сплава загружали в термостатируемый реактор. Перед началом измерений образец был активирован в вакууме при температуре  $300^\circ\text{C}$  в течении одного часа. Затем были выполнены три цикла полной абсорбции-десорбции при разных температурах, после которого проводились измерения.

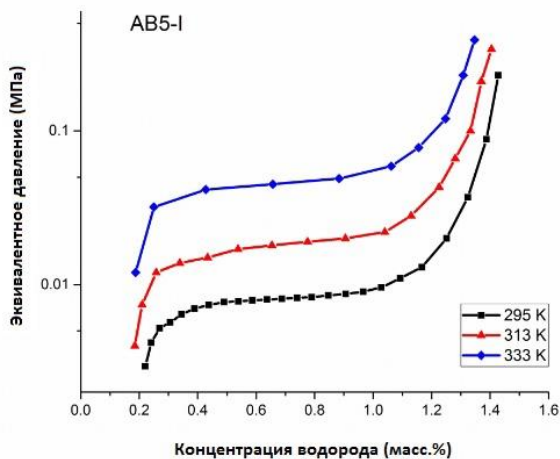


Рис. 2. PCT-диаграмма для отожженного сплава по методу Сиверта.

В результате анализа PCT-диаграммы было выявлено, что равновесное давление входит в установленный предел давлений (0.001-0.1 МПа) и при атмосферном давлении массовая концентрация составила больше 1%, следовательно, полученный отожженный сплав оказался перспективным, то есть его можно в дальнейшем исследовать на электрохимические свойства.

### Статья II. 3.2 Исследование электрохимических свойств сплавов

Эффективность активации металлгидридного электрода исходного неотожженного сплава типа AB<sub>5</sub> с составом La<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Ni<sub>4</sub>Co<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.3</sub>Al<sub>0.3</sub> показана на рис.3 и рис.4. Отмечено, что сплав легко активируется в течение 2-3 циклов, что свидетельствует о хорошей активационной способности полученного сплава. Потенциал заряда-разряда достигает равновесия на 6-7-м цикле.

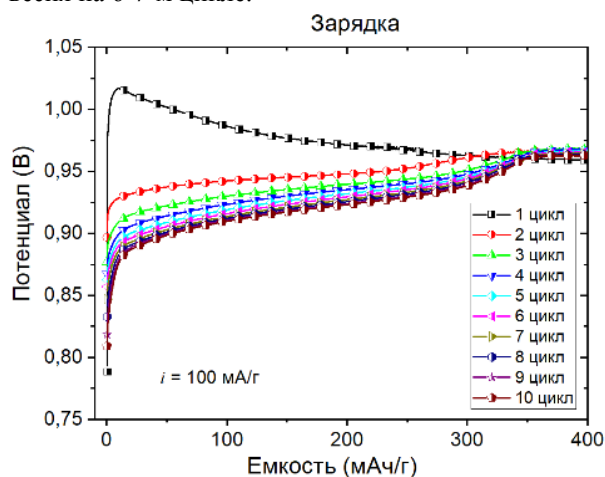


Рис. 3. Активационные зарядные характеристики неотожженного металлгидридного электрода La<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Ni<sub>4</sub>Co<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.3</sub>Al<sub>0.3</sub>.

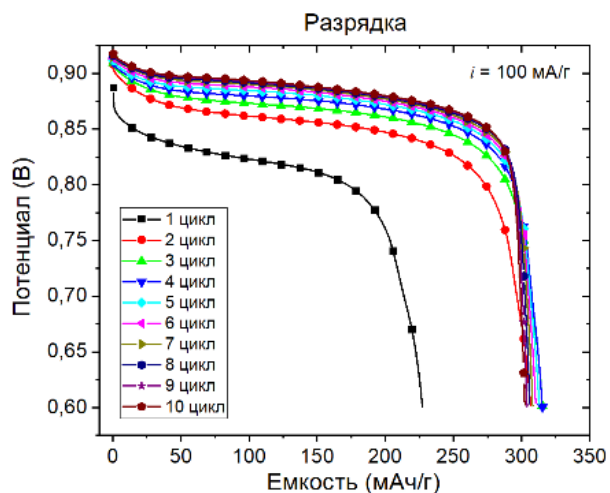


Рис. 4. Активационные разрядные характеристики неотожженного металлгидридного электрода La<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Ni<sub>4</sub>Co<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.3</sub>Al<sub>0.3</sub>.

Как видно из Рис.4, максимальную разрядную емкость образец достигает на четвертом цикле. Максимальная разрядная емкость  $C_{max} = 318$  мАч/г.

При исследовании отожженного сплава было отмечено, что активационная способность незначительно медленнее, чем у неотожженного, так как сплав активировался в течении 4-5 циклов (Рис. 5 и Рис. 6). Потенциал заряда-разряда достигает равновесия на 8-9 цикле.

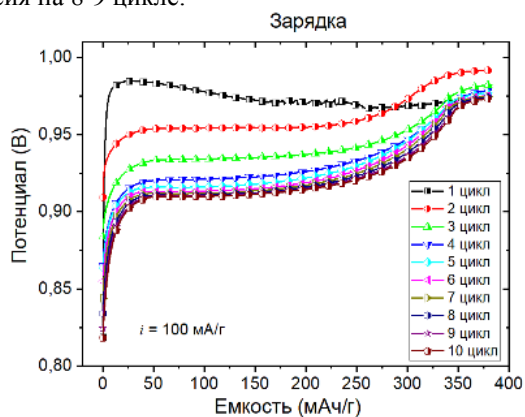


Рис. 5. Активационные зарядные характеристики отожженного металлгидридного электрода La<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Ni<sub>4</sub>Co<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.3</sub>Al<sub>0.3</sub>.

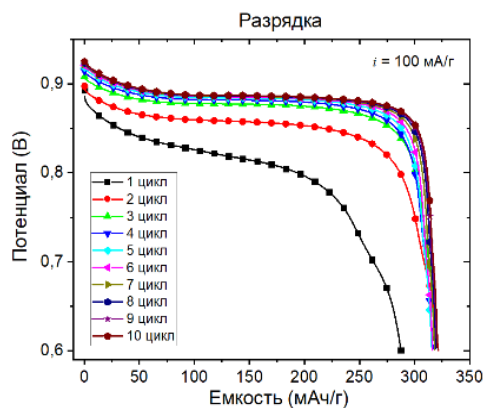


Рис. 6. Активационные разрядные характеристики отожженного металлгидридного электрода La<sub>0.8</sub>Ce<sub>0.2</sub>Ni<sub>4</sub>Co<sub>0.4</sub>Mn<sub>0.3</sub>Al<sub>0.3</sub>.

При этом максимальная разрядная емкость увеличилась с 318 до 325 мАч/г, а максимальная емкость достигалась так же на 4 цикле.

Проанализировав потенциалы заряда и разряда для двух электродов, было выявлено, что при примерно одинаковой емкости (150 мАч/г) разность потенциала заряда и потенциала разряда больше у отожженного сплава (заряд – 0.92 В, разряд – 0.88 В) чем у неотожженного (заряд – 0.918 В, разряд – 0.889 В). Это говорит о том, что при отжиге гистерезис заряд-разрядных кривых увеличивается.

Также на основании рисунка 7, можно сделать вывод, что отжиг незначительно увеличил максимальную разрядную емкость, после этапа активации.

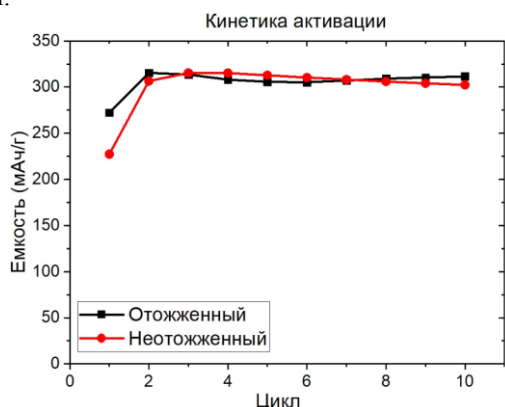


Рис. 7. Активация отожженного и неотожженного металлгидридных электродов  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

Производительность металлгидридного электрода при высоких плотностях тока является одним из ключевых характеристик при создании Ni-MH аккумуляторов. HRD показывает какую разрядную емкость от начального может обеспечить металлгидридный электрод на плотностях тока, кратно превышающие рабочие.

На рисунке 8 и рисунке 9 представлены полученные разрядные кривые при различных плотностях тока для неотожженного образца и сравнительную характеристику для неотожженного и отожженного образцов.

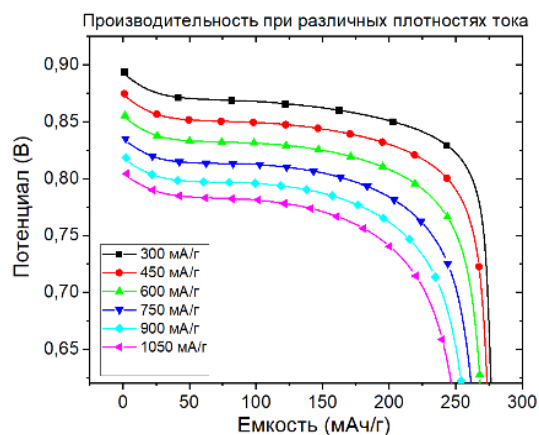


Рис. 8. Производительность при высоких плотностях тока для неотожженного металлгидридного электрода  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ .

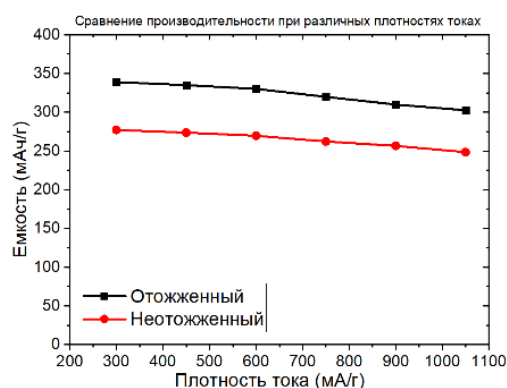


Рис. 9. Сравнение разрядных кривых для неотожженного и отожженного металлгидридного электрода  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  для опыта на производительность при высоких плотностях тока.

Повышение плотности тока закономерно ведет к снижению равновесного потенциала разряда и максимальной разрядной емкости. Данное явление связано с тем, что при высоких плотностях тока определяющим фактором становится скорость диффузии водорода из объема на поверхность электрода. Оба образца достаточно стабильны при плотностях тока до 1050 мА/г. Снижение разрядной емкости составляет всего 10.65% и 10.31% для отожженного и неотожженного образцов, соответственно. В то же время абсолютные значения разрядных емкостей выше для отожженного образца.

На рисунке 10 были отображены результаты исследования циклической стабильности. Было замечено, что разрядная емкость была значительно выше в случае отожженного анодного материала. После 100 циклов заряд-разряда снижение разрядной емкости составило 33.05% и 71.07% для отожженного и неотожженного электродов, соответственно. Резкое снижение разрядной емкости для неотожженного образца, вероятно, связано с механической нестабильностью спрессованной таблетки электрода, так как после всех испытаний на дне электрохимической ячейки обнаружен нерастворимый осадок.

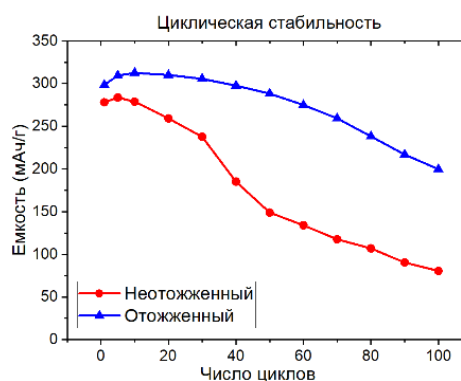




Рис. 10. Сравнение изменения разрядных емкостей для неотожженного и отожженного металлгидридного электрода  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  от количества проведенных циклов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для отожженного и неотожженного анода, изготовленных из металлгидридных материалов на основе  $\text{La}_{0.8}\text{Ce}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$  были исследованы на электрохимические свойства. В результате анализа экспериментальных данных, было установлено, что отжиг для данного металлгидридного материала положительно влияет на электрохимические свойства электрода.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИМС – интерметаллическое соединение;  
 $C_{\text{max}}$  — максимальная разрядная емкость, мАч/г;  
HRD – производительность при высоких плотностях тока;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dunn, B., H. Kamath, and J.-M. Tarascon, *Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices*. Science, 2011. **334**(6058): p. 928.
2. Sandrock, G. and R.C. Bowman, *Gas-based hydride applications: recent progress and future needs*. Journal of Alloys and Compounds, 2003. **356-357**: p. 794-799.
3. Ouyang, L., et al., *Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review*. Materials Chemistry and Physics, 2017. **200**(Supplement C): p. 164-178.
4. Тарасов, Б.П., М.В. Лотоцкий, and В.А. Яртысь, *Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумулярования водорода*. Российский Химический Журнал, 2006. **L**(6): p. 34.
5. Young, K., et al., *Annealing effects on Laves phase-related body-centered-cubic solid solution metal hydride alloys*. Journal of Alloys and Compounds, 2016. **654**: p. 216-225.
6. Lin, H.C., et al., *Effects of annealing and NaOH pretreatment on an  $\text{LaNi}_{3.65}\text{Al}_{0.34}\text{Mn}_{0.27}\text{Co}_{0.74}$  hydrogen storage alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 2003. **358**(1-2): p. 281-287.
7. Tliha, M., et al., *Kinetic and thermodynamic studies of hydrogen storage alloys as negative electrode materials for Ni/MH batteries: a review*. Journal of Solid State Electrochemistry, 2014. **18**(3): p. 577-593.
8. Тарасов, Б.П., et al., *Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов*. Альтернативная энергетика и экология, 2005. **12**: p. 14-37.
9. Yartys, V., D. Noreus, and M. Latroche, *Metal hydrides as negative electrode materials for Ni-MH batteries*. Applied Physics A, 2016. **122**(1): p. 43.
10. Råde, I. and B.A. Andersson, *Requirement for metals of electric vehicle batteries*. Journal of Power Sources, 2001. **93**(1): p. 55-71.
11. Kleperis, J., et al., *Electrochemical behavior of metal hydrides*. Journal of Solid State Electrochemistry, 2001. **5**(4): p. 229-249.
12. Liu, Y., et al., *Advanced hydrogen storage alloys for Ni/MH rechargeable batteries*. Journal of Materials Chemistry, 2011. **21**(13): p. 4743-4755.
13. Zhou, Z., et al., *Effect of annealing treatment on structure and electrochemical performance of quenched  $\text{MmNi}_{4.2}\text{Co}_{0.3}\text{Mn}_{0.4}\text{Al}_{0.3}\text{Mg}_{0.03}$  hydrogen storage alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 2010. **501**(1): p. 47-53.
14. Yang, S., et al., *Effects of annealing treatment on the microstructure and electrochemical properties of low-Co hydrogen storage alloys containing Cu and Fe*. Rare Metals, 2011. **30**(5): p. 464.



И.Д. Карпилов<sup>1</sup>, Р.М. Мустафин<sup>1</sup><sup>1</sup>Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПОДОГРЕВЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ РЕГЕНЕРАТИВНЫМ МЕТОДОМ

### АННОТАЦИЯ

Темпы производства и потребления в современной экономике неуклонно растут, а в доступных углеводородных месторождениях неуклонно снижаются запасы сырья. Следовательно, эффективная реализация топлив является очень важной задачей для современной энергетики. Внедрение термохимической рекуперации в высокотемпературные установки способно сэкономить миллиарды рублей. Приведенное в настоящей работе исследование позволяет сделать процесс ещё более эффективным и привлекательным для практического внедрения в промышленность. Исследованы основные характеристики процесса: распределение реагентов в ходе эндотермических реакций и распределение температурного поля в процессе охлаждения и нагрева вставки.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной экономике производство продукции осуществляется с помощью преобразования энергии, которая может быть получена различными способами. Основными способами получения энергии являются: сжигание органического топлива (газ, нефть, уголь и др.) и использование альтернативных источников энергии (энергия воды, ветра, солнца, геотермальных источников и др.). В 21 веке наблюдается постоянный рост потребления энергоресурсов [1].

Как известно, низкая степень утилизации горячих отходящих дымовых газов является причиной повышенного энергопотребления и пониженной энергетической эффективности технологических установок. Дымовые газы с температурой выше 600 градусов относят к высокотемпературным вторичным энергоресурсам (ВЭР), которые покидают рабочее пространство огнетехнических агрегатов и поэтому уносят с собой значительное количество тепла. Основными источниками данных ВЭР являются черная и цветная металлургия, химическая и нефтехимическая промышленность, промышленность строительных материалов, стекловаренная промышленность и т.д. Потери тепла с уходящими газами таких агрегатов могут составлять 20 - 80%. Как известно, существуют методы, с помощью которых данные ресурсы можно использовать для повышения энергоэффективности.

Одним из таких способов является использование отходящего тепла дымовых газов для частичного риформинга природного газа. Сущность этого процесса заключается в использовании теплоты газов для проведения эндотермической реакции исходного топлива (природного газа). В результате этой реакции образуется новое синтетическое топливо, обладающее большей теплотой сгорания за счет химически связанного тепла и состоящее из водорода и синтез-газа, обогащенного монооксидом углерода. Этот метод получил название термохимической рекуперации (ТХР) [2].

На рис.1 наглядно представлено применение термохимической рекуперации в промышленной печи, работающей на природном газе. После сжигания газо-воздушной смеси в печи образовавшиеся дымовые газы подаются в риформер. В риформере смесь исходного топлива (газ) и пара поглощает тепло дымовых газов в ходе реакции паровой конверсии метана. На выходе из риформера образуется синтез-газ, состоящий в основном из непрореагировавшего метана, водорода, пара, монооксида и диоксида углерода [3]. Далее полученный синтез-газ направляется в топку сжигания печи, где он сжигается вместе с природным газом и воздухом. После риформера дымовые газы обычно удаляются, однако в [4] приведена схема ТХР с направлением охлажденных дымовых газов в конденсатор. Пар либо предварительно полученный, либо произведенный в результате теплообмена в конденсаторе, направляется в эжектор, где смешивается с исходным топливом. Из эжектора смесь пара и метана подается в риформер.

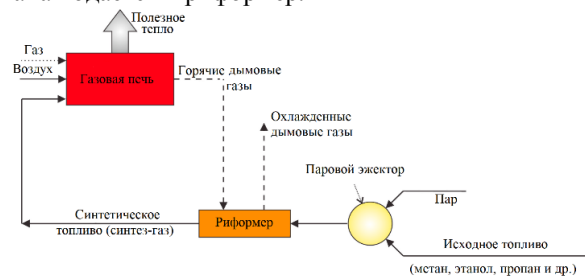


Рис.1 Схематичный процесс сжигания газа в печи с применением термохимической рекуперацией теплоты

ТХР применяют в самых разных отраслях. В последние годы особое внимание уделяется вопро-

су применения ТХР в газотурбинных установках (ГТУ). Carapelucci в своей статье [5] исследовал эффективность ГТУ при внедрении термохимического рекуператора для утилизации тепла отходящих дымовых газов за счет реакции паровой конверсии метана. Им было определено, что установка одного риформера под давлением могла бы повысить КПД ГТУ с 38,3% до 52,4%, а мощность установки с 183 МВт до 288,4 МВт. К тому же автор сообщает, что установка рекуператора не влечет за собой технологических проблем. При улучшении схемы процесса возможна установка 2 риформеров, позволяющих ещё сильнее увеличить эффективность установки: повысить КПД до 53,8% и мощность до 292,9 МВт. Однако, в схеме необходимо было оптимизировать параметры работы ТХР. Пашенко Д. определил оптимальные параметры работы термохимического рекуператора [6]. Им было определено, что рабочие параметры, такие как температура, состав входящей реакционной смеси и давление, оказывают значительное влияние на энергоэффективность процесса. Увеличение доли пара в подаваемой реакционной смеси увеличивает энтальпию реакции парового риформинга метана и, как следствие, увеличивает значение энтальпии выхлопных газов, которая преобразуется в химическую энергию нового синтетического топлива.

Во всех приведенных выше случаях рассматривалась термохимическая рекуперация теплоты. В случае рекуперации происходит теплообмен через стенку, в процессе которого тепло от дымовых газов отдается стенке рекуператора. Далее тепло распределяется по никелевому катализатору по закону теплопроводности. А затем оно поглощается в результате нагрева смеси и протекания эндотермической реакции. Основным недостатком рекуперации - низкий коэффициент теплоотдачи дымовых газов к стенке, который приводит к неэффективному съему тепла.

Однако, существует альтернативный способ - термохимическая регенерация теплоты. Основное отличие заключается в технологической схеме процесса. При рекуперации имеется один или несколько риформеров, работающих параллельно. В случае компоновки риформеров по регенеративному принципу осуществляется иной цикл. Впервые этот цикл был описан в патенте японским ученым Kobayashi [7]. Тепло горячих дымовых газов, образующихся в процессе сгорания, в течение первого цикла поглощается материалом каталитической вставки регенератора, а во время последующего цикла вставка действует как термохимический регенератор. Часть тепла, накопленного внутри вставки регенератора, рекуперируется в виде тепла, необходимого для эндотермической реакции.

Исследование тепломассообменных процессов представляется важным преимущественно из-за улучшения рабочих параметров в риформере. Так как реакция паровой конверсии метана происходит

при довольно высоких температурах, то, сначала, осуществляется подогрев смеси на катализаторах, а затем происходит эндотермическое поглощение теплоты. Эффективный съем теплоты с катализатора во время нагрева смеси позволяет уменьшить общее количество частиц каталитической вставки. Чтобы повысить эффективность этого процесса, необходимо исследовать параметры, влияющие на съем теплоты катализаторов нагретой смесью. В обычном случае данная задача не представляет трудности и может быть полностью решена аналитически при помощи уже известных законов тепломассообмена. В рамках данной задачи осуществляется эндотермическая реакция, которая оказывает значительное влияние на распределение температур, а, следовательно, и теплового потока внутри риформера. Поэтому в ходе этого исследования был проведен анализ тепломассообменных характеристик ТХР в риформере, работающему по регенеративному принципу.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

### 2.1. Геометрия и сетка модели

В качестве расчетной геометрии был выбран один из риформеров, наполненный цилиндрическими катализаторами. Трехмерная модель была построена во встроенной в ANSYS программе Design Modeller. Первым этапом было создание риформера, который представляет собой цилиндрическую трубку длиной 283мм с диаметром 14мм (Рис.2). Затем в трубку помещаются 10 никелевых катализаторов на алюминиевой подложке. Цилиндрические катализаторы имеют диаметр частицы 10мм, высота частицы также составляет 10мм. Они насыпаны в трубку произвольно, поэтому угол поворота отличается. Заполненная катализаторами трубка и отдельная частица катализатора представлена на Рис. 2.

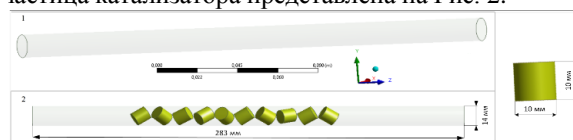


Рис. 2. Расчетная геометрия.

Для решения систем уравнений конечно-элементным методом, необходимо расчетную область дискретизировать на более мелкие элементы или иными словами, построить расчетную сетку. Такая задача была выполнена с помощью встроенной в Ansys Fluent программы Mesher. Расчетные ячейки решено было выполнить в виде четырехугольных элементов, так как такое разбиение расчетной области позволяет получить структурированную сетку. Эта структура эффективна с точки зрения использования расчетных возможностей компьютера, так при меньшем количестве узлов ячеек достигается большая точность решения. К другим преимуществам структурированной сетки над неструктурированной относится лучшая сходимость решения и простота построения переход-

ных зон от ячеек с большими элементами к малым. Ограничение в расчетных мощностях с одной стороны и требование точности с другой, побудили создать геометрическую модель всего с 10 частицами катализатора. В результате, созданная сетка состоит из небольших элементов оптимальной формы. В зонах вблизи цилиндрических частиц был уменьшен размер ячеек. Это является необходимым из-за интенсивного теплообмена, перехода жидкости из одной среды в другую и процесса интенсивной химической реакции на самих катализаторах. Полученная расчетная сетка состоит из 1 700 579 элементов и 1 721 714 узлов, разрез сетки по среднему сечению представлен на рис. 3.

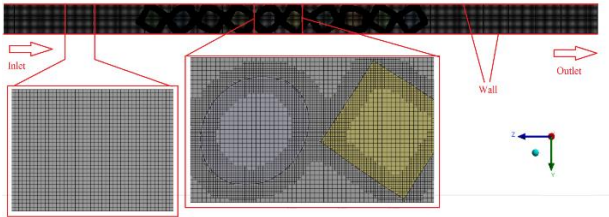


Рис. 3. Расчетная сетка.

Смесь из воды и метана подается в реформер слева, для обозначения входа смеси в программе был выбран параметр «inlet». Выход смеси находится на правой границе области и обозначен как «outlet». Стенка реформера - это внешняя поверхность цилиндра, ей присвоено название «wall». Как видно на рис. 3, в реформере есть пустое пространство до и после катализаторов. Пространство перед каталитической вставкой необходимо для окончательного формирования профиля потока, зона реформера за каталитической вставкой необходима для диссипации вихрей.

## 2.2. Основные уравнения

Для всех потоков ANSYS Fluent решает уравнения сохранения массы и количества движения. Для сжимаемых потоков, включающих теплообмен, дополнительно решается уравнение сохранения энергии. Если в потоке происходит смешение компонентов или протекают химические реакции, то решается уравнение сохранения компонентов смеси. Дополнительные уравнения переноса также решаются при турбулентном потоке.

Уравнение сохранения массы или уравнение неразрывности записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  - скорость, м/с;  $t$  - время, с.

Уравнение (1) является общей формой уравнения сохранения массы и справедливо как для несжимаемых, так и для сжимаемых потоков.

Уравнение сохранения движения представлено в форме:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (2)$$

где  $(\bar{\tau})$  - тензор напряжений, который описан ниже.  $\rho \vec{g}$  и  $\vec{F}$  - гравитационная сила и внешняя сила (например, возникающие при взаимодействии с дисперсной фазой) соответственно.  $\vec{F}$  также содержит другие источники, зависящие от модели, таких как пористая среда и источники, заданные пользователем.

Тензор напряжений  $\bar{\tau}$  имеет вид:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3)$$

где  $\mu$  - молекулярная вязкость,  $I$  - единичный тензор, а второй член в правой части - это эффект от увеличения объема.

При высокой скорости потока необходимо активировать модель турбулентности. Выбранная модель должна не только адекватно предсказывать распределение скоростей внутри реформера, но и давать точные значения о местонахождении всех компонентов смеси, так как скорость реакции зависит от перемешивания и физического переноса компонентов. От стандартной модели  $k-\omega$ , SST отличается улучшенной пристеночной функцией, которая позволяет более детально моделировать поток вблизи стенок реформера и катализатора без создания дополнительного пристеночного слоя в сетке.

Уравнения модели  $k-\omega$  SST, описывающие турбулентный поток весьма схожи с уравнениями  $k-\omega$  standard (стандартная модель) и выражаются для  $k$  и  $\omega$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

В этих уравнениях  $G_k$  - возникновение кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости,  $G_\omega$  представляет собой генерацию  $\omega$ .  $\Gamma_k$  и  $\Gamma_\omega$  выражают эффективный коэффициент диффузии  $k$  и  $\omega$ , соответственно,  $Y_k$  и  $Y_\omega$  представляют турбулентную диссипацию  $k$  и  $\omega$ .  $D_\omega$  - член перекрестной диффузии, а  $S_k$  и  $S_\omega$  - функции, определяемые пользователем. Приведенные компоненты уравнений (9) и (10) представляют собой достаточно сложные и объемные функции, поэтому они не расписаны подробно в рамках этой работы и могут быть найдены в инструкции по использованию Ansys.

В данной работе катализаторы являются пористой средой. Для расчета используется катализатор Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со следующим химическим составом: NiO = 14,5%; SiO<sub>2</sub> = 0,2%; подложка состоит из CaO-MgO-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такой катализатор является достаточно распространенным и широко используется в промышленности [8]. Остальные свойства: плотность 870 кг / м<sup>3</sup>; средняя пори-

стость частиц катализатора составляет около 44%. Модель пористости используется на катализаторах для задания сопротивления среды. В турбулентных потоках слои вставки моделируются с использованием как проницаемости, так и коэффициента инерционных потерь. Один из методов получения соответствующих констант включает использование уравнения Эргуна [9], полуэмпирической корреляции, применимой в широком диапазоне чисел Рейнольдса и для многих типов каталитических вставок:

Уравнение Эргуна:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150\mu(1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} + \frac{1.75\rho(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} \quad (6)$$

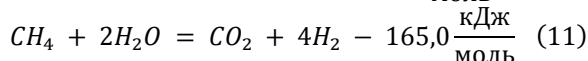
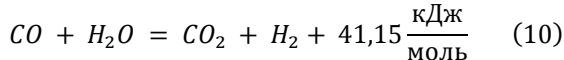
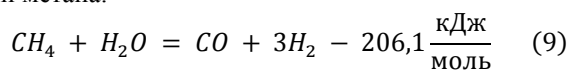
где  $|\Delta p|$  - перепад давления;  $\mu$  - вязкость жидкости;  $D_p$  - средний диаметр частицы;  $L$  - длина слоя, а  $\epsilon$  - доля пустот, определяемая как объем пустот, деленный на объем области уплотненного слоя.

Коэффициент проницаемости и инерционных потерь в каждом направлении внутри катализатора определяется как:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (7)$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} \quad (8)$$

В данной работе были рассмотрены три основные реакции, протекающие в ходе паровой конверсии метана:



### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1 Граничные условия

Расчеты велись в два этапа, на первом этапе на предварительно нагретые катализаторы с температурой 926°C подавалась смесь метана и водяного пара с температурой 426°C. Граничные условия на входе были заданы в виде скоростного потока с фиксированной скоростью, которая изменялась от 1.5 до 6 м/с. Состав смеси на входе был постоянен для всех расчетов, так объемная доля воды составляла 66.7%, а объемная доля метана 33.3%. Такое соотношение также можно выразить, как H<sub>2</sub>O:CH<sub>4</sub> = 2:1, оно было выбрано исходя из исследований оптимального соотношения компонентов смеси для реакции парового риформинга [35]. Граничные условия на выходе были заданы в виде «pressure-outlet» (название внутри Fluent), которое позволяет смоделировать истечение потока из риформера с возникновением обратных токов в результате отрицательного перепада давления. Такое поведение жидкости зачастую наблюдается в турбулентном потоке при образовании вихрей. Давление в рифо-

мере было задано атмосферным. Также было принято допущение, что стенки являлись адиабатными. Конечно, в реальной установке потери через стенки присутствуют, но в отличие от рекуперативного обмена, при регенеративном стенка изолируется специальным материалом. Плотность газа подчинялась закону идеального газа, а теплоемкость задавалась с зависимостью от температуры смеси. Теплопроводность и вязкость смеси были заданы постоянными значениями: 0,0454 Вт/м·К и 1,72 · 10<sup>-5</sup> кг/м·с соответственно.

На втором этапе моделировалось подогревание остывших в результате первого цикла катализаторов нагретыми дымовыми газами. Для этого вычислялась средняя температура по объему каждого катализатора в конце первого цикла. В начале второго цикла эти температуры задавались непосредственно на сами катализаторы. Средняя температура всех катализаторов в результате первого цикла была равна 682°C. Температуры горячих дымовых газов была задана 977°C, и расчет велся до подогрева катализаторов до исходной температуры первого цикла - 926°C. Скорость дымовых газов менялась в диапазоне 4-14 м/с.

#### 3.2 Результаты моделирования цикла с паровой конверсией

Ниже представлены результаты моделирования, полученные в ходе первого цикла. Катализаторы были подогреты и охлаждались за счет эндотермической реакции паровой конверсии метана и физического нагрева смеси. Предполагается, что предшествующей операцией был долговременный нагрев катализаторов дымовыми газами. В результате, температура каждого катализатора одинакова и равняется 926°C. Каждому катализатору присвоен номер для упрощения обработки результатов, таким образом, вход жидкости находится слева и первый катализатор, встречающий поток, - это катализатор №10.

Далее проводился расчет до тех пор, пока средняя температура всех катализаторов стала равняться 682°C. Такое значение температуры было выбрано исходя из данных, что паровая конверсия метана протекает наиболее интенсивно при температурах 600°C и выше [10]. Как итог, катализаторы охлаждались в среднем на 245°C. Далее вдоль оси в центре риформера была помещена плоскость, которая позволила анализировать полученные результаты как внутри катализаторов, так и между ними. На рис. 4 представлен контур температур, полученный в конечный момент времени - 35,9с при скорости смеси на входе 1,5м/с. Слева изображена шкала значений температуры, на контуре красным цветом обозначены максимальные значения, а синим - минимальные. На этом контуре представлено графическое отображение полученных значений, численные данные приведены на



графиках ниже. Температура смеси газов постепенно возрастает от 10 катализатора к 1.

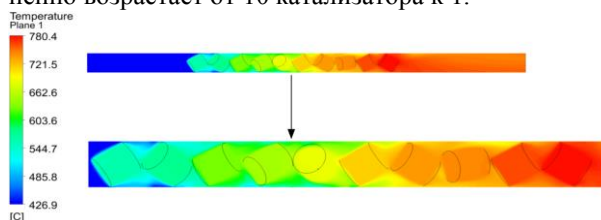


Рис.4 Контурные распределения температуры в конечный момент времени ( $v=1.5$  м/с)

На первых катализаторах (10 и 9 катализатор) происходит интенсивный нагрев смеси. Так, их температура отличается незначительно и практически все тепло, передаваемое смеси уходит на нагрев. Это утверждение подтверждается распределением метана в катализаторах, которое показано на рис.13. Видно, что на 10 и 9 катализаторе концентрация метана меняется крайне незначительно, что свидетельствует о низкой конверсии. После наиболее активного нагрева на первых катализаторах смесь нагревается на последующих катализаторах все менее интенсивно. Из-за отвода теплоты в результате эндотермической реакции, нагрев смеси резко снижается, и дальнейшая теплота расходуется на проведение паровой конверсии метана. Таким образом, перепад температур на катализаторах 10-6 больше перепада температур на катализаторах 1-5 приблизительно в 2,5 раза.

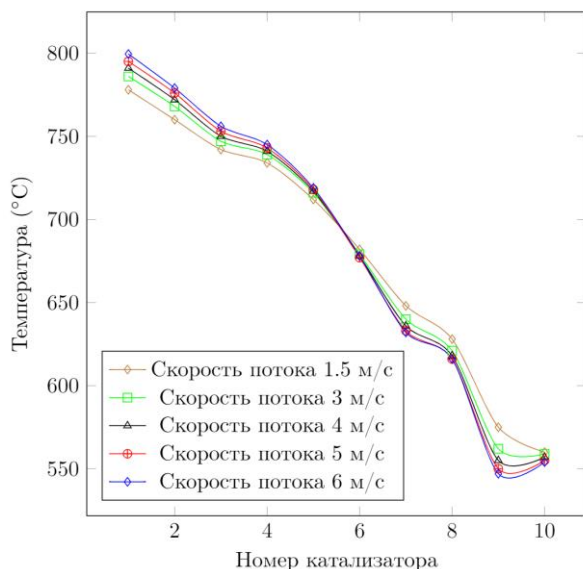


Рис.5 Средняя температура по объему каждого катализатора

Значения средней по объему температуры внутри каждого катализатора при разных скоростях потока в конечный момент времени представлены на рис.5. Температура катализатора 10 одинакова практически во всех случаях, так как происходил один и тот же процесс - нагрев смеси. Далее на катализаторе 9 при низких скоростях потока температура значительно выше, чем при высоких скоростях потока. Такая зависимость показывает, что процесс съема теплоты с катализаторов происходит

эффективнее при более высокой скорости потока, ведь чем больше теплоты поглощает смесь, тем ниже падает температура на катализаторе. Похожее поведение, но с уменьшающейся разницей наблюдается на катализаторах с 10 по 6. Затем начиная с 5 катализатора происходит обратный процесс - температура на катализаторах становится выше при увеличении скорости потока. Самая существенная разница наблюдается на катализаторе 1, где происходит наиболее интенсивная конверсия метана вследствие более высокой температуры катализатора. Возможное объяснение такого явления состоит в том, что чем ниже скорость внутри катализатора, тем дольше происходит эндотермическая реакция. Продолжительная эндотермическая реакция поглощает большое количество теплоты. Следовательно, при низких скоростях потока поглощение теплоты в результате эндотермической реакции становится доминантным. Интенсивная конверсия метана наблюдается, начиная с 5 катализатора. При доминантном процессе нагрева смеси на 10-6 катализаторе, поглощение теплоты эффективнее при высокой скорости, а при доминантном процессе эндотермической реакции на катализаторах 5-1, поглощение теплоты эффективнее при более низких скоростях потока.

На рис. 6 представлен график распределения объемной доли каждого вещества смеси. На первых пяти катализаторах можно наблюдать постепенное увеличение продуктов реакции. Затем на 6 катализаторе ( $x=0,5$ ) происходит переломный момент, когда температура смеси внутри катализатора становится более  $700^{\circ}\text{C}$ . В этот момент концентрация водорода возрастает резко примерно на 30%. Хотя, как было отмечено ранее, скорость реакции становится значительной уже при  $600^{\circ}\text{C}$ , для активного течения реакции требуется значительное время соприкосновения с катализатором. В данном случае при использовании цилиндрических катализаторов довольно большого размера (10 мм диаметр и высота) для активного течения реакции требуется нагрев как минимум до  $700^{\circ}\text{C}$ . После резкого роста скорости реакции на 5 катализаторе, скорость реакции продолжает постепенно увеличиваться по мере движения к катализаторам с большей температурой. Это наблюдение свидетельствует о том, что к концу времени цикла риформинга, остается только 5 активных катализаторов или 50% каталитической подложки все ещё является активной.

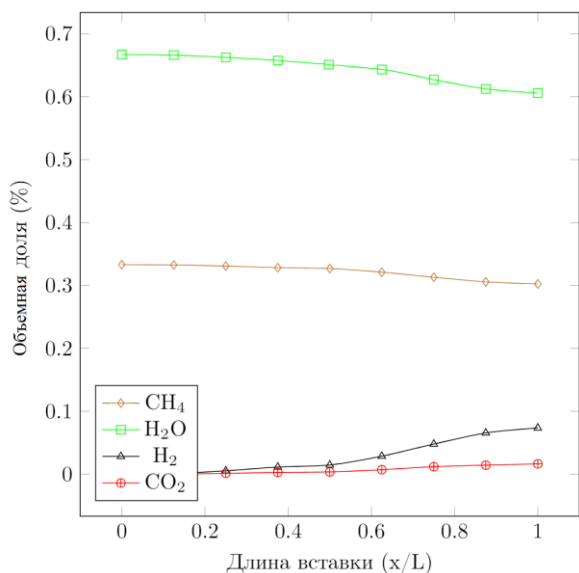


Рис.6 Объемная концентрация реагентов и продуктов реакции внутри вставки ( $v=1.5$  м/с)

### 3.2 Результаты моделирования цикла с нагревом дымовыми газами

Большой интерес представляет распределение температур в процессе нагрева катализатора. Контур температур на рис.7 показывает нагрев катализаторов в конечный момент времени. Горячие газы при соприкосновении с катализаторами постепенно отдают свое тепло на нагрев катализаторов и вследствие этого постепенно охлаждаются. В конечный момент времени разница между температурой дымовых газов на входе и на выходе составляет  $108^{\circ}\text{C}$ . Средняя по объему температура всех катализаторов равна  $926^{\circ}\text{C}$ . Сильнее всех нагрет 10 катализатор, непосредственно встречающий поток горячих газов, а слабее всех нагрет 1 катализатор, находящийся ближе всего к выходу. Если сравнивать перепад температур в начальный и конечный момент времени, то на 1 катализаторе она составляет  $62.1^{\circ}\text{C}$ , а на 10 она равна  $415^{\circ}\text{C}$ . Можно предположить, что такой эффект обусловлен большей разницей температур в начальный момент времени между потоком горячего газа и катализаторами, расположенными ближе ко входу. В начале цикла основное тепло газов уходит на нагрев первых катализаторов, а последние катализаторы уже охлаждаются остывшими газами. Затем первые 5 катализаторов (№10-6) достаточно прогреваются и тепла дымовых газов хватает на подогрев последних (№1-3) катализаторов.

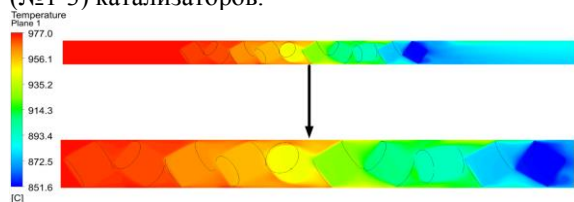


Рис.24 Контуры распределения температуры дымовых газов ( $v=4$  м/с)

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы подробно проанализированы все основные характеристики процесса: распределение температуры, реагентов, продуктов реакции, скорости и давления. В результате была получена зависимость времени цикла от начальной скорости смеси при двух последовательных процессах: нагреве катализаторов дымовыми газами и их охлаждении при течении эндотермических реакций. Полученные результаты могут быть использованы для практической реализации цикла регенеративного подогрева и охлаждения каталитической вставки с помощью проведения реакций паровой конверсии метана.

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТХР — термохимическая регенерация;  
 ВЭР— вторичные энергоресурсы;  
 $T_{ср}$  — средняя температура, К;  
 $v$  — составляющая скорости вдоль оси  $Ox$ , м/с;  
 ГТУ – газотурбинная установка;  
 КПД – коэффициент полезного действия;  
 $t$  – время, с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.  
 Индексы:  
 $i$  — порядковый номер орта системы координат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ansari D. et al.** Energy outlooks compared: Global and regional insights. – DIW Berlin, German Institute for Economic Research, 2019. – №. 1837.
2. **Pashchenko D.** First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming //Energy. – 2018. – Т. 143. – С. 478-487.
3. **Yi Q. et al.** A feasibility study for CO<sub>2</sub> recycle assistance with coke oven gas to synthetic natural gas //Applied Energy. – 2017. – Т. 193. – С. 149-161.4.
4. **Popov S. K. et al.** The use of thermochemical recuperation in an industrial plant //Energy. – 2017. – Т. 127. – С. 44-51.
5. **Carapellucci R., Milazzo A.** Thermodynamic optimization of a reheat chemically recuperated gas turbine //Energy conversion and management. – 2005. – Т. 46. – №. 18-19. – С. 2936-2953.
6. **Pashchenko D.** Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit //Energy Conversion and Management. – 2018. – Т. 171. – С. 917-924.
7. **Kobayashi H.** Thermochemical regenerative heat recovery process : пат. 6113874 США. – 2000.
8. **Pashchenko D.** Pressure drop in the thermochemical recuperators filled with the catalysts of various shapes: A combined experimental and numerical investigation //Energy. – 2019. – Т. 166. – С. 462-470.
9. **Ergun S.** Fluid flow through packed columns //Chem. Eng. Prog. – 1952. – Т. 48. – С. 89-94.
10. **Pashchenko D.** A heat recovery rate of the thermochemical waste-heat recuperation systems based on experimental prediction //Energy. – 2020. – Т. 198. – С. 117395.



## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В УСТАНОВКАХ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ЗА СЧЕТ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА**

### **АННОТАЦИЯ**

В условиях роста цен на энергоресурсы и ухудшающейся экологической обстановки принимаются решения по повышению энергетической эффективности работы крупных предприятий. Существует множество решений, позволяющих сэкономить энергию на предприятии, одним из перспективных является термохимическая регенерация (ТХР) теплоты отходящих дымовых газов. Эта технология позволяет преобразовать исходное углеродное топливо в новое синтетическое с высоким содержанием водорода и повышенной теплотой сгорания. В работе исследуется технология ТХР с внедрением конденсационной установки. Полученные результаты показывают, что применение конденсационной установки в системе ТХР теплоты отходящих дымовых газов позволяет экономить на подготовке окислителя, необходимого для проведения паровой конверсии метана. Применение технологии ТХР позволяет повысить эффективность работы высокотемпературных установок на 20-35%.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня развитие энергетического комплекса находится на пороге значительных перемен. Многие страны двигаются в направлении сокращения выбросов CO<sub>2</sub> из-за угрозы глобального потепления. Поэтому многие промышленные производители, нефте- и газодобывающие компании, уделяя внимание экологии, постепенно переходят на использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Перенасыщение рынка энергоресурсами, в частности нефтью, стимулирует разработку проектов, направленных на улучшение качества получаемого сырья, а не на увеличение его количества.

Многие процессы в промышленности, связанные со сжиганием топлива, сопровождаются большими потерями тепла и выбросами вредных веществ. Сейчас в условиях экономической нестабильности и кризиса, спада производства, роста цен на природное топливо остро встает вопрос экономии энергоресурсов, оптимизации производства и усовершенствования технологического процесса. Даже для гигантов современной тяжелой индустрии - металлургической промышленности - не просто конкурировать в современных жестких условиях рынка. В связи с чем, активно разрабатываются и внедряются методы повышения энергетической эффективности и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

Современные исследования технико-экономической возможности увеличения эффективности работы тепловых схем и оборудования

ТЭЦ промышленных предприятий и выработки электрической мощности можно добиться, в основном, следующими путями:

- Оптимизацией режимов работы существующего оборудования станции.
- Оптимизацией и усовершенствованием с заменой котельного оборудования.
- Установкой новых, современных турбин.
- Полным или частичным замещением (или/и модернизацией) тепловой схемы.

Большой интерес представляет модернизация тепловой схемы, к примеру, внедрение в технологическую схему ТЭЦ утилизационных установок вторичных источников низкопотенциальной теплоты (ВИНТ), что позволит полезно использовать потенциал ВИНТ, сократив нагрузку на окружающую среду и уменьшив себестоимость теплоты и электрической энергии.

Одним из наиболее перспективных способов в качестве системы утилизации является использование термохимической регенерации (ТХР) теплоты отходящих дымовых газов. Сущность ТХР теплоты отходящих дымовых газов заключается в использовании их физического тепла для предварительной эндотермической переработки исходного углеводородного топлива, которое при этом получает большой запас химически связанной энергии в виде возросшей теплоты сгорания. Если в традиционных высокотемпературных установках (ВТУ) энергия топлива превращается в теплоту в одну стадию путем его непосредственного сжигания, то в установках с ТХР процесс превращения энергии топлива разбивается на две стадии. Первая стадия - нагрев реакционной смеси и проведение эндотермических реакций конверсии исходного топлива, в результате чего происходит увеличение его теплоты сгорания. Вторая - сжигание продуктов реакции, т.е. конвертированного газа, имеющего большую теплоту сгорания по сравнению с исходным топливом.

За счет использования термохимической регенерации теплоты предполагается увеличение КПД промышленных огнетехнических установок (ОТУ) до 90-95%. Необходимое условие осуществимости процесса ТХР - температура отходящих дымовых газов должна быть не менее 700-800°C. Продукты конверсии природного газа содержат горючие компоненты (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), которые могут быть использованы как энергетическое топливо этой ОТУ, снижая при этом потребление исходного топлива.

Кроме того, горючие компоненты могут быть использованы в химической технологии для производства аммония, метанола и других веществ органического синтеза, а также водорода [1].

В статье С.К. Попова и соавторов «The use of thermochemical recuperation in an industrial plant» [2], исследованы варианты стеклоплавильных агрегатов с ТХР отходящих газов в рекуперационном реакторе. Схемы, представленные на рис. 1, различаются по составу окислителя для процесса конверсии: либо водяной пар (схема I), либо рециркулируемые отработавшие газы (схема II), либо смесь пара и рециркулирующих отработавших газов (схема III).

В схеме III предусмотрена возможность регулирования соотношения  $\text{CO} / \text{H}_2$  в составе синтез-газа и генерации синтез-газа в количествах, превышающих потребности промышленной печи. В таком случае избыточный синтез-газ можно использовать в связанных технологиях в качестве источника энергии или сырья. Здесь и далее объемы природного газа и других газов измеряются при обычных стандартных условиях 273,15 К и 101325 Па.

В схемах II и III часть выхлопных газов характеризуется объемной долей рециркулируемых выхлопных газов, которые используются в качестве окислителя для процесса конверсии. Этот поток смешивается с природным газом и попадает в реактор конверсии.

На схеме III часть выхлопных газов и водяного пара составляют смесь, которая является окислителем для процесса конверсии.

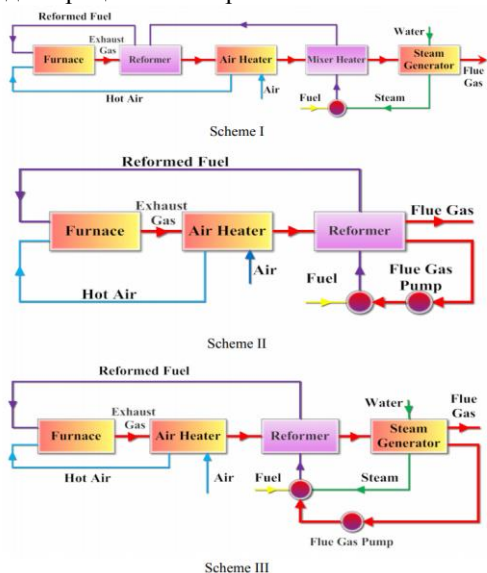


Рис. 1. Схемы ТХР из статьи Попова.

После проведения расчетов в Mathcad и Aspen Plus, авторами было показано, что зависимость расхода топлива и затрат первичной энергии от объемной доли рециркулируемых выхлопных газов, используемых в качестве окислителя в процессе конверсии, немонотонна. Это очень важно для решения проблемы энергосбережения. В промышленной печи с конверсией метана на основе рециркуляции отходящих газов переход на оптимальную схему считается энергосберегающим, что снижает

расход топлива на 16% и снижает загрязнение окружающей среды.

Одной из основных проблем ТХР теплоты отходящих дымовых газов является производство и использование водяного пара. Для преобразования метана в синтез газ необходимо большое количество окислителя, в роли которого используется водяной пар. Его обычно берут из отборов с турбины, если таковая имеется, или производят в испарителе куда падают воду из источника сырой воды. Однако после производства синтез газа и его последующего сжигания в дымовых газах содержится много воды, которую можно сконденсировать и вернуть в цикл. Также при конденсации выделяется скрытая теплота конденсации, которая может покрыть тепло, необходимое для производства пара.

В настоящей работе предлагается внедрить в схему III конденсатор для извлечения воды из отходящих дымовых газов и скрытой теплоты конденсации. Эту воду можно полезно использовать и вернуть в цикл, а скрытую теплоту конденсации использовать в испарителе для получения пара, который необходим для конверсии метана.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ

### 2.1. Термодинамический анализ

При проектировании технологических процессов важное место занимают термодинамические химические реакции. Цель термодинамического анализа заключается в определении принципиальной возможности проведения химической реакции в данных условиях, в выборе условий проведения процесса, в расчете теплового эффекта реакции, что необходимо для составления теплового баланса.

На рис. 2. изображена принципиальная схема ТХР теплоты отходящих газов с конденсационной установкой. В высокотемпературную установку (ВТУ) изначально подается природный газ, для производства полезного тепла. Далее отходящие дымовые газы, имеющие высокую температуру, идут в термохимический регенератор, где протекает процесс паровой конверсии метана и образуется синтетическое топливо:

- 1)  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$
- 2)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Полученное топливо подается в ВТУ, где сжигается, и в отходящих дымовых газах появляется дополнительное количество водяных паров. Дымовые газы, после термохимического реактора, поступают в регенератор (парогенератор) для осуществления процесса парообразования.

Далее, уже охлажденные газы поступают в конденсатор, где из них конденсируется вода, необходимая для проведения процесса паровой конверсии метана. В идеале возможна конденсация всей необходимой воды.

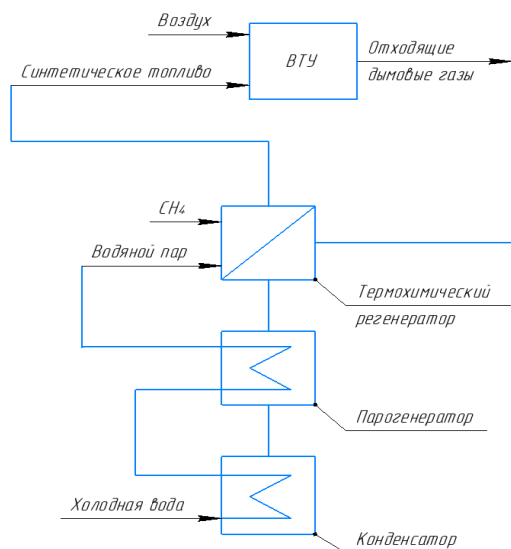


Рис. 2. Схема ТХР с использованием конденсатора.

## 2.2. Построение схемы в Aspen Hysys

Для проведения термодинамического анализа схемы ТХР отходящих газов используется программный комплекс Aspen Hysys, который позволит построить технологическую схему со всеми рабочими элементами.

Aspen HYSYS (или просто HYSYS) - это симулятор химических процессов, используемый для математического моделирования химических процессов, от единичных операций до полных химических заводов и нефтеперерабатывающих заводов. HYSYS может выполнять многие из основных расчетов химической инженерии, включая те, которые связаны с балансом массы, балансом энергии, парожидкостным равновесием, теплопередачей, массопереносом, химической кинетикой, фракционированием и падением давления. HYSYS широко используется в промышленности и научных кругах для стационарного и динамического моделирования, проектирования процессов, моделирования производительности и оптимизации.

Для построения расчетной схемы в Aspen Hysys задаются все компоненты участвующие в технологическом процессе: метан ( $\text{CH}_4$ ), водород ( $\text{H}_2$ ), вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ), кислород ( $\text{O}_2$ ), азот ( $\text{N}_2$ ), монооксид углерода ( $\text{CO}$ ) и диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ).

Далее выбирается пакет свойств, в котором включены основные расчетные уравнения. Выбирается пакет свойств Пенга-Робинсона, т.к. в нем находятся, необходимые для задачи, уравнения и он наиболее сбалансирован для выбранных компонентов.

На вкладке реакций задаются все реакции, используемые в технологической схеме.

Реакции конверсии метана:

- 1)  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$
- 2)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Реакции горения топлива:

- 1)  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 2)  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$
- 3)  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$

Далее проводится сам процесс моделирования и построения технологической схемы. Сначала задаются потоки, необходимые для проведения конверсии метана, это исходная вода и метан с давлением 2,5 МПа, т.к. это необходимое давление для проведения конверсии. Далее вода подается на испаритель, где она нагревается до  $225^\circ\text{C}$  и ее агрегатное состояние меняется на пар. После чего потоки метана и пара смешиваются в миксере. На рис. 3. изображена схема подогрева воды и смешения ее с метаном.

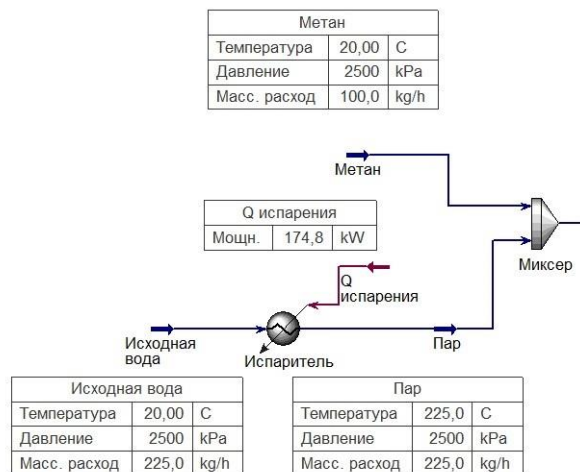


Рис. 3. Схема подготовки воды и метана.

На схеме приведены основные параметры потоков, температура, давление, массовый расход и тепловые потоки. Далее смесь метана и пара подается на подогрев перед конверсией, это необходимо для снижения нагрузки в реформере т.к. это облегчает процесс конверсии метана в синтез газ. На рис. 4 представлена схема подогрева смеси перед подачей в реформер.

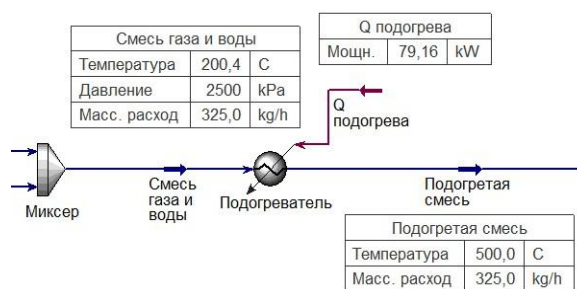


Рис. 4. Схема подготовки смеси.

Далее потоки идут в реформер рис. 5., где происходит процесс конверсии метана, по приведенным выше реакциям.

После реформера получается синтез газ, который впоследствии сгорает в горелке. Состав синтез газа приведен на рис. 6. Видим, что в составе синтез газа присутствует также непрореагировавший метан, вследствие нехватки окислителя, т.е. водяного пара. На вход подавалось соотношение метан: водяной пар 1:2, далее будет изменяться соотношение и проводится анализ влияния окислителя на процесс конверсии.

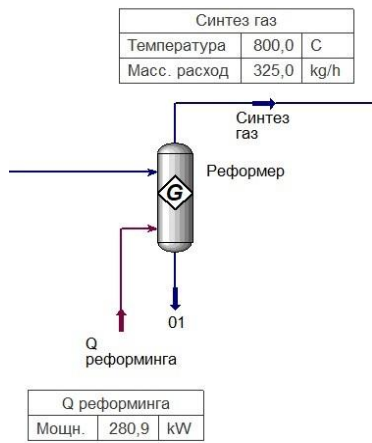


Рис. 5. Реформер.

	Мольные доли
Methane	0.1095
Hydrogen	0.4578
H2O	0.2986
Oxygen	0.0000
Nitrogen	0.0000
CO	0.0787
CO2	0.0554

Рис. 6. Состав синтез газа.

Полученный синтез газ вместе с воздухом необходимого избыточного давления 2 кПа подается в горелку рис. 7, где происходит процесс горения по приведенным выше реакциям. На выходе из горелки образуются дымовые газы с температурой 1000°C. Необходимое давление газа перед горелкой взято из источника [3].

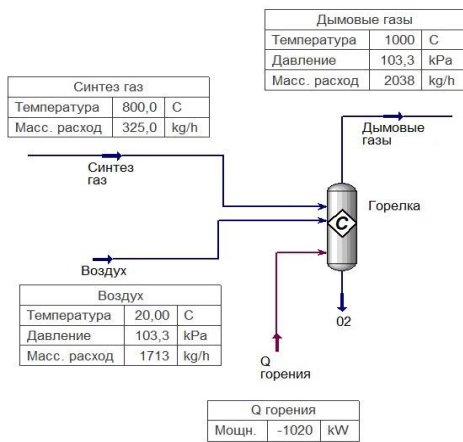


Рис. 7. Горелка.

Далее дымовые газы после горелки отправляются на регенератор рис. 8., где у них отбирается полезное тепло, которое можно подать в реформер для совершения паровой конверсии метана. После регенератора охлажденные дымовые газы идут в конденсатор, где происходит конденсация водяных паров и возвращение их в цикл технологической схемы, а также забирается тепло необходимое для испарения воды. После чего конденсат направляется в сепаратор (рис. 9.), где вода отделяется от уходящих газов.

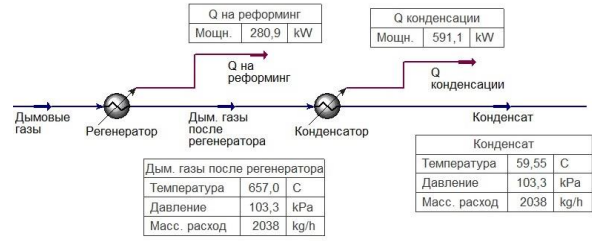


Рис. 8. Регенерация.

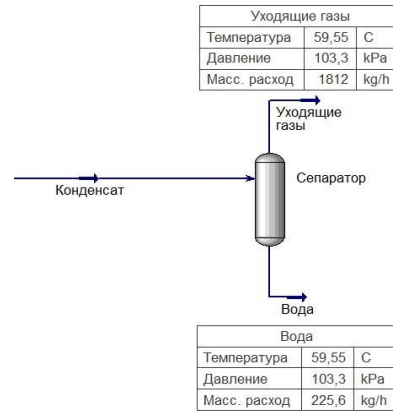


Рис. 9. Сепаратор.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТХР ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ С КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКОЙ

#### 3.1. Исследование влияния температуры на ТХР теплоты отходящих газов с конденсацией

В работе проведено исследование влияния температуры на ТХР теплоты отходящих газов с конденсацией, для этого изменяется температура дымовых газов в диапазоне от 600°C до 1300°C и соответственно температура конверсии от 550°C до 1250°C, т.к. обычно температура конверсии берется на 50 градусов меньше температуры отходящих газов, для составления правильного баланса [4].

Для наглядности сравнивается теплота при сжигании синтез газа и при сжигании чистого метана. Для этого построена отдельно горелка, работающая на метане рис. 10.

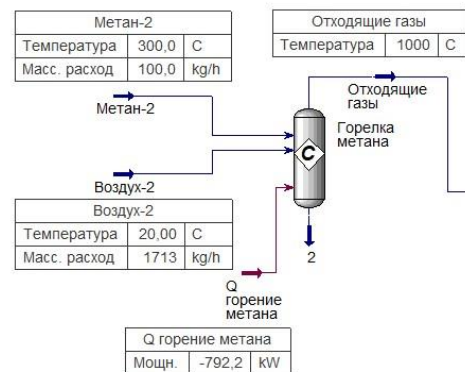


Рис. 10. Схема горелки, работающей на метане.

На рис. 11. представлена зависимость теплоты от температуры газов при соотношении  $2\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ . Здесь изображены линия теплоты, которая идет на

парообразование, линия теплоты, которая идет на конверсию и в нее входит парообразование и подготовка смеси перед конверсией. Также изображены линии теплоты, полученных при сжигании метана и при сжигании синтез газа. Как видно из графика, при сжигании одного лишь метана появляется дефицит теплоты из-за которого появляется необходимость дополнительного подвода тепла в реформер. При сжигании синтез газа такого дефицита не возникает, однако можно избежать нехватки теплоты с помощью конденсации водяных паров из дымовых газов, т.к. при этом выделится необходимая теплота для парообразования.

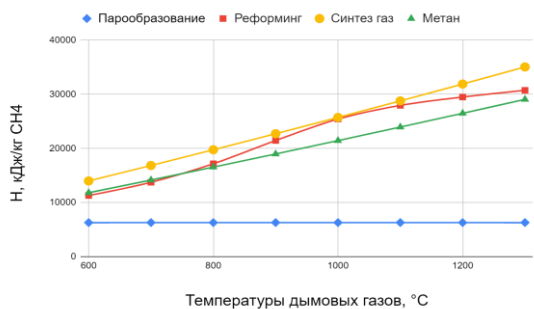


Рис. 11. Зависимость теплоты от температуры дымовых газов, при соотношении  $2\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ .

На рис. 12, представлена зависимость теплоты от температуры газов при соотношении  $2\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ . Видно, что дефицит теплоты относительно дымовых газов при сжигании метана сильно возрастает и даже появляется нехватка теплоты от сжигания синтез газа.

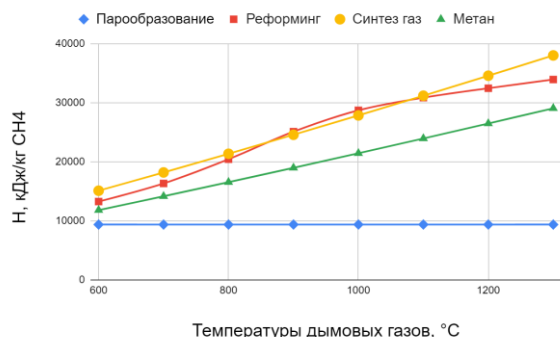


Рис. 12. Зависимость теплоты от температуры дымовых газов, при соотношении  $3\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ .

### 3.2 Исследование влияния соотношения $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ на ТХР теплоты отходящих газов с конденсацией

Проводится исследование зависимости конверсии метана от соотношения окислителя, т.е. водяного пара к метану ( $\text{H}_2\text{O}:\text{CH}_4$ ). Для исследования взяты следующие соотношения:

- 4)  $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4$
- 5)  $2\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4$
- 6)  $3\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4$
- 7)  $4\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_4$

Применены соотношения в мольных величинах, для понимания переведем их в массовые соотношения и получим:

- 1)  $113\text{кг H}_2\text{O} : 100\text{кг CH}_4$

- 2)  $225\text{кг H}_2\text{O} : 100\text{кг CH}_4$
- 3)  $337\text{кг H}_2\text{O} : 100\text{кг CH}_4$
- 4)  $450\text{кг H}_2\text{O} : 100\text{кг CH}_4$

Результаты показывают, что при добавлении воды конверсия метана увеличивается, при этом уменьшается количество монооксида углерода и увеличивается количество воды в синтез газе. Это также подтверждается статьями [5], [6], [7]. На рис. 13, представлена диаграмма зависимости количества метана в синтез газе от количества окислителя.



Рис. 13. Диаграмма зависимости конверсии метана от количества окислителя.

### 3.3 Исследование влияния давления в реакторе на паровую конверсию метана

Исследуя зависимость паровой конверсии метана от рабочего давления, изменяется давление исходной смеси в диапазоне от 1 атм до 20 атм.

Выбор режима паровой конверсии ограничен расходом пара, температурой и давлением. Максимально достижимая температура процесса зависит от качества стали, диаметра реактора, допустимых теплонапряжений поверхности реакционных труб и особенно от давления процесса. На большинстве современных установках температура процесса поддерживается в пределах  $830\text{--}880^\circ\text{C}$ . При более низкой температуре трудно получить водород требуемого качества, а ниже  $750^\circ\text{C}$  процесс паровой конверсии вести неэффективно. В интервале  $750\text{--}800^\circ\text{C}$  паровую конверсию можно осуществлять при низком давлении, однако проведение процесса при давлении ниже 1,0 МПа признано нецелесообразным (только на старых установках ведут процесс при низком давлении). Выбор давления обусловлен прежде всего возможностью использовать тепло конденсации непрореагировавшего водяного пара для регенерации раствора в системе очистки газа от  $\text{CO}_2$ . При давлении ниже 0,7-1,0 МПа использовать это тепло практически невозможно. Кроме того, повышение давления производится с целью снижения расхода энергии на сжатие. Сжатие сырья, по сравнению с компримированием водорода, позволяет сократить расход энергии пропорционально извлечению объема газа в процессе паровой конверсии. Повышение давления интенсифицирует массообмен и теплопередачу в реакторах и теплообменниках установки производства водорода. Обычно паровую конверсию метана проводят при давлении 1,2-3,0 МПа, несмотря на то, что повышение давления смещает равновесие ре-



акции паровой конверсии метана в неблагоприятную сторону.

Для достижения требуемой концентрации водорода при увеличении давления повышают температуру процесса и увеличивают расход пара (особенно, если стремятся получить 98%-ный  $H_2$ ). Однако повышение и давления, и температуры приводит к необходимости применения реакционных труб из высоколегированной стали. В связи с этим производство водорода в настоящее время ведут при давлении не выше 2,5 МПа.

На рис. 14 представлен состав синтез газа и зависимость его от разных давлений в реакторе. Видно, что при повышении давления снижается степень конверсии метана, что соответствует действительности.

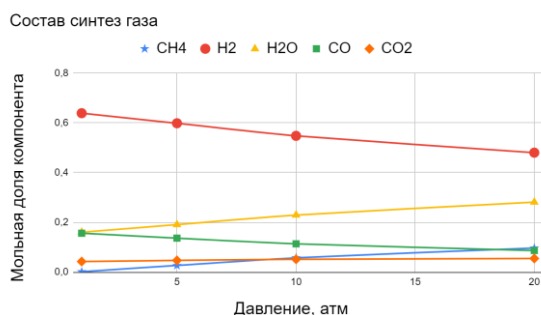


Рис. 14. Зависимость состава синтез газа от давления в реакторе.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам термодинамического расчета технологической схемы сделаны следующие выводы:

1) Установка конденсатора в схему ТХР отходящих дымовых газов представляет большую выгоду, т.к. возможно сконденсировать всю необходимую для паровой конверсии метана воду, также отобранное тепло в конденсаторе можно использовать для производства пара, что исключит нехватку теплоты.

2) Наиболее выгодное соотношение окислителя к метану это  $2H_2O:CH_4$ , т.к. горение произведено-

го синтез газа выделяет наибольшее количество полезного тепла.

3) Применение технологии ТХР позволяет повысить эффективность работы высокотемпературных установок на 20-35%, по сравнению со стандартным способом использования топливосжигающих технологий.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТХР – термохимическая регенерация;  
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;  
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;  
ВИНТ – вторичные источники низкопотенциальной теплоты;  
ВТУ – высокотемпературные установки;  
ОТУ – огнетехнические установки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пащенко Д.И.** Использование термохимической регенерации теплоты в огнетехнических установках // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2009. С. 232-234.
2. **Popov S.K., Svistunov I.N., Garyaev A.B., Serikovb E.A., Temyrkanova E.K.** The use of thermochemical recuperation in an industrial plant // Energy, 2017. С. 127: 44-51.
3. **Груздев В. Н., Груздева Т. В.** ГАЗОВАЯ ГОРЕЛКА И ФРОНТОВОЕ УСТРОЙСТВО ГАЗОВОЙ ГОРЕЛКИ. – 2004.
4. **Pashchenko D.** First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming // Energy. – 2018. – Т. 143. – С. 478-487.
5. **Pashchenko D.I.** How to choose endothermic process for thermochemical waste-heat recuperation? // International Journal of Hydrogen Energy, 2020. С. 45: 18772-74.
6. **Christian Gaber, Martin Demuthb, Christoph Schlucknera, Christoph Hochenauera** Thermochemical analysis and experimental investigation of a recuperative waste heat recovery system for the tri-reforming of light oil // Energy Conversion and Management, 2019. С. 195: 302-12.
7. **Poran A., Thawko A., Eyal A., Tartakovsky L.** Direct injection internal combustion engine with high-pressure thermochemical recuperation – Experimental study of the first prototype // International Journal of Hydrogen Energy, 2018. С. 43(27): 11969-80.



*В.Н. Кулешов<sup>1</sup>, С.В. Курочкин<sup>1</sup>, А.А. Гаврилюк<sup>1</sup>, М.А. Климова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОДНО-ДИАФРАГМЕННЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЁРОВ ВОДЫ

### АННОТАЦИЯ

Современные щелочные электролизные батареи, обладающие низким удельным энергопотреблением, возможно создавать с использованием технологии электродно-диафрагменных блоков. В отличие от конструкции с межэлектродным зазором – электродно-диафрагменные блоки уменьшают падение напряжения, приводя к росту энергоэффективности щелочных электролизёров воды, в том числе и при работе на высоких плотностях тока. Дополнительное модифицирование электродов современными высокоэффективными катализаторами электродных процессов снизит перенапряжение выделения водорода и кислорода. Для увеличения чистоты генерируемых газов при «нулевом» межэлектродном зазоре требуется провести изменения в структуре диафрагмы, синтезируемой из полимерных материалов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный рост интереса отечественной промышленности к использованию и планомерному внедрению водородных технологий резко ограничен изоляционной политикой ряда стран в отношении Российской Федерации. Что ограничивает доступ к рынку самых современных технологических решений в области электролизной генерации водорода. В связи с этим требуется ускоренными темпами активизировать работы по разворачиванию большого числа всесторонних исследований в данной области. Одним из таких направлений безусловно является получение водорода методом электролиза воды [1]. Данная технология уже известна более ста лет, причём до 1950-ых годов – когда появились первые электролизные батареи с твёрдополимерной мембраной Nafion от компании Du Pont, шло повсеместное использование и активное развитие только щелочных электролизёров воды. Одновременно с этим на рубеже 30-ых годов отечественная промышленность смогла успешно освоить выпуск электролизёров типа ФВ с номинальной производительностью 500 нм<sup>3</sup> водорода в час, а в начале 50-ых годов на основе электролизёров типа ЭФ появились наиболее массовые отечественные электролизёры типа СЭУ. Отечественные электролизёры данных серий имели конструкцию с межэлектродным зазором. Это обуславливало высокие значения энергопотребления, более 5,3 кВт·час/нм<sup>3</sup> водорода. При этом диафрагменный

материал, выполненный из хризотилового асбеста не позволял работать на плотностях тока свыше 350 мА/см<sup>2</sup> – ввиду недостаточной газоплотности данного диафрагменного материала.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

#### 2.1. Синтез диафрагмы на основе полимерных материалов

При поджатии электродов к поверхности диафрагмы возникает проблема отвода генерируемых электролизных газов. Наличие зазора между электродом и диафрагмой позволяло осуществлять эффективный газоотвод как с фронтальной, так и с тыльной стороны электрода. Но отсутствие данного зазора вынуждает газы, получаемые со стороны диафрагмы, покидать электродную камеру, проходя через тело электрода. Данный вариант газоотведения увеличивает градиент давления на всю поверхность диафрагмы, одновременно возрастает вероятность пробоя газов из катодной камеры в анодную и наоборот.

Для нивелирования данного негативного фактора требуется создать полимерную диафрагму из коммерчески доступного полимера, серийно производимого на территории Российской Федерации. Данный полимер должен быть щелочестойким в растворах щелочей. Полифениленсульфон обладает рядом необходимых качеств – что бы быть основой разрабатываемой полимерной диафрагмой. Технология создания полимерных диафрагм на основе полисульфона уже многократно описана в работах [2].

При замене полисульфона на полифениленсульфон не потребовалось менять его органический растворитель – диметилацетамид или тетрагидрофуран. В качестве гидрофильного наполнителя использовался диоксид циркония (ZrO<sub>2</sub>). Важно отметить что порошок диоксида циркония последовательно измельчали до размера не более 2 мкм. Сначала крупные фракции порошка измельчали в планетарной мельнице Fritsch 7. В дальнейшем измельчённую фракцию порошка отделяли на вибрационном грохоте Sieve Shaker M100 с ситами, способными отделять фракцию порошка вплоть до 2 мкм. Полученный порошок добавляли к полифениленсульфону, растворённому в диметилацетамиде, и длительное вре-

мя гомогенизировали с помощью ультразвукового гомогенизатора Sonicator Q700.

Затем в приготовленный раствор помещали полиамидную сетку и с помощью метода фазовой инверсии получали полотно диафрагмы, путём замены органического растворителя на неорганический в структуре полимера.

## 2.2. Изготовление сетчатых никелевых электродов

Вторым ключевым элементом технологии электродно-диафрагменных блоков, необходимым для создания конструкции с «нулевым» зазором, являются электроды. Электрод должен обладать высоким параметром скважности, что позволит генерируемым электролизным газом свободно отводиться с его тыльной стороны. Что даст возможность снизить роста газонаполнения на границе электрод/диафрагма. При этом электрод должен обладать достаточной механической прочностью – чтобы избежать деформации при его поджатии к диафрагме. Такими свойствами обладают просечно-вытяжные никелевые сетки с толщиной порядка 0,5 мм и более. Но чрезмерно высокая цена коммерчески-доступных никелевых сеток большой толщины не позволяет их использовать для создания относительно-недорогих отечественных щелочных электролизных модулей.

Для решения данной проблемы были проведены лабораторные работы по созданию технологий электроосаждения никелевых сеток с требуемой геометрической формой, скважностью и толщиной. Подробно работы по данной технологии описаны в [3]. Для тестирования опытной электролизной ячейки были получены никелевые электроды с рабочим диаметром в 68 мм и толщиной 0,5 мм.

## 4. НАНЕСЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

С целью развития активной электрохимической поверхности поверхность никелевых электродов была покрыта никелевым порошком марки ПНК. Для электроосаждения никелевого порошка готовили электролит следующего состава:

- сульфат никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) – 150 г/л;
- сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) – 50 г/л;
- хлорид натрия ( $\text{NaCl}$ ) – 10 г/л;
- борная кислота ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) – 25 г/л;
- никелевый порошок – 75 г/л.

Процесс электроосаждения проводили при температуре 45°C, плотности тока не более 70 мА/см<sup>2</sup>, а рН электролита за всё время нанесения порошка поддерживался на уровне 4,5. В гальваническую ванну помещались устройства для постоянного барботирования раствора электролита воздухом, что позволяло перемешивать никелевый порошок по всему объёму гальванической ванны и поднимать осевший на дне порошок. Процесс электроосаждения продолжался в течение 2 часов [4].

## 3. СБОРКА ТЕСТОВОЙ ЯЧЕЙКИ С ЭЛЕКТРОДНО-ДИАФРАГМЕННЫМ БЛОКОМ

Корпус электродных рам был также выполнен из полисульфона. Для этого стержень из полисульфона, изготовленный методом экструзии, разрезался на отдельные сегменты с толщиной 20 мм. Фото тестовой электролизной ячейки представлено рис. 1 и рис 2.



Рис. 1. Собранная электролизная ячейка (анодная сторона)



Рис. 2. Собранная электролизная ячейка (катодная сторона)

В электродных рамах были выточены электродные камеры глубиной 12 мм и диаметром 69 мм. Для стягивания электродных рам было просверлено 8 отверстий диаметром 12 мм, в которые вставлялись стяжные болты.

Для герметизации ячейки были выточены две уплотнительные прокладки из кислотощелочестойкой резины толщиной 1 мм. Электроды с нанесённым никелевым порошком помещались в электрод-

ные рамы и приваривались к токоподводам, выполненными из никелевых стержней диаметром 6 мм.

После окончания процесса сборки ячейки началось формирование электродно-диафрагменных блоков. Толщина синтезируемой диафрагмы составляла 0,5 мм. Собранный элемент надёжно фиксировался в неподвижном положении, затем начинался процесс поджатия электродов к диафрагме с помощью динамометрического ключа. Равномерный момент затяжки и контроль глубины расположения стержней токоподводов относительно края электродной рамы давали возможность прижать анод и катод с одинаковым усилием к диафрагме.

#### 4. ТЕСТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ С ЭЛЕКТРОДНО-ДИАФРАГМЕННЫМ БЛОКОМ

Для включения ячейки в работу она подключалась к системе подвода и отвода щелочного электролита. К концам токоподводов подключался источник постоянного тока, рассчитанный на обеспечение рабочей плотности тока не менее 900 мА/см<sup>2</sup>. С помощью системы термостатирования электролит нагревали до температуры 95 °С.

Результаты испытаний показали, что удельные энергозатраты на производство электролизного водорода составили не более 4,1 кВт·час/нм<sup>3</sup> при плотности тока в диапазоне от 250 до 300 мА/см<sup>2</sup>. При дальнейшем росте плотности тока – вплоть до 500 мА/см<sup>2</sup> данный показатель составил уже значение в 4,5 кВт·час/нм<sup>3</sup>.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые работы по созданию электродно-диафрагменных блоков показали значительное снижение удельного энергопотребления щелочной

электролизной ячейки. Дальнейшие работы в данном направлении по инициативе авторов должны быть направлены на масштабирование данной технологии, что в перспективе позволит создавать полностью отечественные щелочные электролизные модули с энергопотреблением на уровне самых современных их иностранных аналогов.

Полученные электродно-диафрагменные блоки позволяют снизить контактное сопротивление, возникающее на границе электрод/диафрагма.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01429, <https://rscf.ru/project/22-29-01429/>

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Dovbysh S.A., Grigoriev S.A., Kurochkin S.V. and Millet P.** Development and performances of a 0.5 kW high-pressure alkaline water electrolyser // *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, p. 29441
2. **Kuleshov N.V., Dovbysh S.A., Kurochkin S.V., Slavnov Yu.A. and Udris E.Ya.** Polysulfone-based polymeric diaphragms for electrochemical devices with alkaline electrolyte, *Russ. J. Appl. Chem.*, 2018, vol. 91, p. 928
3. **Kuleshov V.N., Kuleshov N.V., Kurochkin S.V., Fedotov A.A., Sleptsova E.E., Blinov D.V. Gavruluk, A.A. and Zhmurko I.E.** Water electrolyzer for renewable energy systems // *E3S Web of Conferences*, 2021, vol. 289. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128905004>
4. **Kuleshov N.V., Dovbysh S.A., Kurochkin S.V. and Slavnov Yu.A.** High-pressure alkaline water electrolyzer for renewable energy storage systems // *Proc. 3rd Conf. "Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy (REPS-GIE)"*, IEEE, Casablanca, Morocco, 2018.

*А.В. Бездудный<sup>1</sup>, Д.В. Блинов<sup>1,2</sup>, В.И. Борзенко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН)  
Россия, 125412 Ижорская д. 13 стр. 2

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная д. 14

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ РЕАКТОРЕ ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлен краткий обзор проблематики, связанной с актуальностью комплексных энергосистем на базе возобновляемых источников энергии. Приведен краткий обзор различных принципов реализации систем хранения тепловой энергии, их преимущества и недостатки. Дан краткий сравнительный анализ представленных типов систем хранения тепловой энергии. Описаны термохимические системы хранения энергии на базе металлгидридной технологии и возможные области их применения. Представлены методика проведения и результаты экспериментальных исследований процессов в одноступенчатом реакторе хранения тепловой энергии на базе низкотемпературных металлгидридов. Проведена оценка полученных экспериментальных данных и результатов для практической применимости системы и предложены дальнейшие пути развития.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В связи с уменьшением запасов ископаемых ресурсов, ростом обеспокоенности о глобальном потеплении и увеличивающимся спросом на электроэнергию, эффективное использование возобновляемых источников энергии становится все более актуальным. В идеальном сценарии возможен полный переход с традиционных ископаемых энергоносителей к возобновляемой энергии, причем будет задействовано лишь 23% от общего установленной мощности [1], что потребует продолжения инноваций и улучшения технологий возобновляемой энергетики.

Солнечная энергия, стоящая в одном ряду с другими источниками возобновляемой энергии, является относительно простой для практического использования [2]. В основном, в качестве систем получения энергии из солнца, используются объединения солнечных фотоэлектрических преобразователей (солнечные панели) и солнечные коллекторы (концентраторные солнечные установки) [3].

К концу 2017 года, установленная мощность всех концентраторных солнечных установок превысила 5 ГВт [4]. Солнечные коллекторы, наряду с солнечными батареями, сильно зависят от сезонных и географических характеристик облучения поверхности Земли солнечной радиацией. Эти характеристики могут существенно колебаться в пределах одного солнечного дня, ограничивая область эффективной генерации энергии в пределах 7-8 часов в сутки [5-9].

Одним из методов компенсации неравномерности генерации энергии этих установок является интеграция в состав солнечного коллектора системы хранения тепловой энергии (ХТЭ), что обеспечит устойчивую выработку энергии всей энергоустановкой в течение 24-часов. Дезидери и Кампана [10] в своём сравнительном исследовании солнечных концентраторных установок и солнечных панелей показали, что системы на основе солнечных коллекторов, интегрированные с устройствами ХТЭ, могут быть оптимальны по стоимости и могут обеспечивать непрерывное производство электроэнергии даже в отсутствии солнечного излучения. Кроме того, внедрение высокоэффективной подсистемы ХТЭ позволит существенно уменьшить капитальные затраты на всю солнечную энергоустановку в целом. Концепция интеграции системы ХТЭ с солнечной энергостанцией находит всё больше практического применения: если на текущий момент около 47% всех энергостанций на солнечных коллекторах применяют интегрированную систему ХТЭ, то свыше 72% уже строящихся энергостанций сконструированы с применением промежуточных подсистем хранения тепла, а в перспективных проектах этот показатель доведен до 77% [11].

Следует отметить, что фокус применения систем ХТЭ именно в концентраторных установках связан с принципиальными особенностями работы подобных систем. Например, в случае интеграции системы ХТЭ в энергоустановку на базе солнечных панелей, понадобятся дополнительные меры по конвертации полученной электроэнергии в хранимое тепло и обратно, что снизит общий КПД такой подсистемы (меньше 50%). Для таких систем наиболее подходящей промежуточной подсистемой хранения энергии всё еще являются электрические батареи, КПД которых находится в диапазоне 80-100%. Интеграция ХТЭ в установку, где первичным источником энергии является не электричество, получаемое в результате фотоэлектрического преобразования в панелях, а само солнечное излучение, позволяет, путем прямого накопления энергии последнего, достичь КПД хранения тепла в диапазоне 50-100% в зависимости от конструкции и режимов работы подсистемы [12].

## 2. ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И СИСТЕМЫ

### 2.1. Типы теплоаккумулирующих систем

Системы аккумулирования тепловой энергии применяются для компенсации несовпадений между потреблением солнечной энергии и постоянной выработки электричества в общую сеть. Работа таких систем составляет собой как минимум три этапа: накопление тепла, хранение и разрядка.

Теплоаккумулирующие системы циклического действия подразделяются на теплоемкостные, термохимические и фазопереходные. Наиболее распространенные системы ХТЭ в основном используют принцип фазового перехода (ФП) [13-14] или теплоемкость массивов из стали, бетона, керамики (кирпичей) и прочих материалов.

В **теплоёмкостных** системах ХТЭ солнечная энергия в ходе этапа зарядки используется для прямого нагрева жидкости или твердого вещества (носитель), увеличивая его внутреннюю энергию. После этого, носитель хранится при температуре этапа зарядки системы. Когда энергию необходимо извлечь из подсистемы хранения (этап разрядки), температура носителя уменьшается. Теплоёмкостное хранение тепловой энергии напрямую связано с увеличением или уменьшением температуры вещества-носителя.

В **фазопереходных** системах солнечная энергия может быть использована для инициации процесса зарядки, обеспечивая необходимое тепло для начала процесса фазового перехода вещества-носителя (чаще всего, в качестве носителя выступают различные соли). После чего, вещество в своей новой фазе хранится при температуре зарядки (этап хранения). Во время разрядки такой системы, фаза вещества-носителя возвращается в своё первое состояние (до процесса зарядки). Под запасённой энергией подразумевается энергия фазового перехода. Системам на фазовом переходе уделено существенное внимание в научных публикациях и литературе [15-21].

### 2.2. Термохимические системы хранения тепла и их особенности

В термохимических системах энергия запасается в ходе обратимой эндотермической реакции (зарядка) и расходуется в ходе обратимой экзотермической. Эффективность термохимической системы напрямую связана с энтальпией химической реакции веществ, используемых в качестве носителей энергии. В ходе процесса зарядки, тепловая энергия солнечной радиации используется для диссоциации химического реагента (А) на продукты (В) и (С). Эти реагенты хранятся при температуре окружающей среды или при необходимой рабочей температуре по отдельности, до момента, пока не потребуются выработка тепла. В этом случае осуществляется экзотермическая реакция синтеза изначального вещества (А) из реагентов (В) и (С) с выработкой тепла.

В качестве примера можно привести солнечную

энергоустановку с параболической концентраторной тарелкой, в который в качестве вещества (А) выступает жидкий аммиак, а веществ (В) и (С) водород и азот соответственно. В данной установке аммиак разлагается в присутствии катализатора на составляющие в объеме реактора, расположенного под прямым воздействием солнечного излучения, сконцентрированного параболическим зеркалом. Продукты реакции – водород и азот хранятся в промежуточной ёмкости. При необходимости выработки энергии, продукты реакции подаются в реактор синтеза, в котором, также в присутствии катализатора, происходит экзотермическая реакция синтеза, тепловую энергию которой через теплообменник можно пустить на выработку электроэнергии паровым циклом [22]. Принципиальная схема подобной установки приведена на рис. 1.

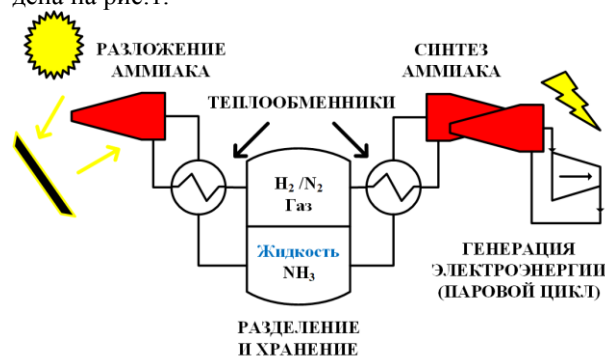


Рис. 1. Параболическая солнечная установка совмещенная с системой ХТЭ.

Для сравнения трех различных типов систем хранения тепловой энергии рассмотрены шесть параметров: плотность хранения энергии (объемная и массовая), температура хранения, длительность хранения, транспортабельность материалов, технологическая зрелость системы хранения энергии и сложность связанных с ней технологий. Данные по каждому из ключевых параметров приведены в **Таблице 1**.

Ключевые преимущества обратимых термохимических систем ХТЭ можно обобщить в следующем:

- более высокая плотность энергии, сравнительно с теплоёмкостными и фазопереходными системами – в 5 и 10 раз соответственно благодаря химической природе связывания тепла;
- химические соединения обладают термодинамической стабильностью хранения тепловой энергии при обычных («комнатных») температурах окружающей среды без потери своих свойств, обеспечивая длительное хранение;
- могут быть перевезены на большие расстояния;
- регенерация запасённого тепла возможна без потерь.

В то же время, одним из факторов, лимитирующих повсеместное внедрение термохимических систем, является небольшой опыт реальной эксплуатации таких систем в солнечных энергоустановках и высокая наукоёмкость производства [23].

Таблица 1. Ключевые сравнительные параметры типов систем ХТЭ

	Теплоёмкостные системы ХТЭ	Фазопереходные системы ХТЭ	Термохимические системы ХТЭ
Плотность хранения энергии (объемная/массовая)	~ 50 кВт/ч * м <sup>-3</sup> материала	~ 100 кВт/ч * м <sup>-3</sup> материала	~ 500 кВт/ч * м <sup>-3</sup> материала
	~ 0.02-0.03 кВт/ч * кг <sup>-1</sup> материала	0.05-0.1 кВт/ч * кг <sup>-1</sup> материала	~ 0.5-1 кВт/ч * кг <sup>-1</sup> материала
Температура хранения	Температура зарядки	Температура зарядки	Температура окружающей среды или рабочая температура
Длительность хранения	Ограниченно (тепловые потери)	Ограниченно (тепловые потери)	Теоретически неограниченно
Транспортировка	Небольшие расстояния	Небольшие расстояния	Дистанция теоретически неограниченна
Зрелость технологии	Промышленное производство	Опытное производство	Лабораторное и опытное производство
Технологичность	Простая	Средняя	Сложная

### 2.2.1. Водородные термохимические системы на базе металлгидридной технологии

Металлогидридные системы, рассматриваемые в качестве обратимых систем хранения тепла, способны запасать тепловую энергию с массовой плотностью до 2 МДж/кг [24]. Полезное тепло высвобождается при подаче водорода в объем металлгидридной системы. При работе металлгидридного устройства в качестве системы ХТЭ водород находится внутри замкнутого контура, поэтому его можно использовать в большом количестве циклов заряда-разряда для хранения тепловой энергии. Тепловая мощность металлгидридной системы и её температурные режимы могут быть скорректированы изменением параметров расхода газа и давления в газовой подсистеме. Регенерация системы производится при наличии внешнего источника тепла, путём нагрева металлгидрида для обеспечения реакции десорбции водорода в газовую подсистему.

Теплота реакции металлгидридной системы зависит от применяемого сплава. Такие сплавы подразделяются на высокотемпературные – на базе Mg, Ti и др. с теплотой реакции порядка 75 кДж/моль H<sub>2</sub> [25] и низкотемпературные – сплавы типа AB<sub>5</sub>, AB<sub>2</sub> на базе La, Ni, Al и др. с теплотой реакции порядка 20-35 кДж/моль H<sub>2</sub> [26].

Высокотемпературные металлгидриды обеспечивают во время процесса сорбции такие температуры теплоносителя, которые достаточны для преобразования тепловой энергии в механическую, а потом и в электрическую посредством применения цикла Карно в тепловой машине. Подобные свойства позволяют использовать высокотемпературные металлгидриды в паре низкотемпературными. В данном случае высокотемпературный металлгидрид будет использован в качестве системы ХТЭ, а низкотемпературный гидрид будет использоваться в качестве подсистемы хранения водорода [27].

Бао и др. [28] предложили упрощенную одноступенчатую схему, состоящую из реактора на высокотемпературном металлгидриде (NaMgH<sub>3</sub>) и баллона хранения водорода. Численные исследования тепловых процессов при зарядке/разрядке по-

казали зависимость температуры теплоносителя от его расхода, при этом режим однократной зарядки оказался менее эффективным по сравнению с зарядкой в несколько этапов, когда водород из баллона подавался в реактор порционно.

Основные научно-технические вопросы разработки и конструирования эффективных металлгидридных устройств связаны с особенностями процессов теплопереноса внутри объема металлгидрида [29-31]. Неэффективные решения по обеспечению теплопереноса внутри засыпки из интерметаллического сплава (ИМС), наряду с высокой теплотой реакции (экзотермическая при сорбции водорода и эндотермическая при десорбции), приводят к так называемому кризису теплопереноса, который характеризуется резким замедлением динамики термохимической реакции в системе [29-31].

Таким образом, интенсификация теплообмена между ИМС и системой охлаждения является важнейшей задачей для обеспечения максимально возможной тепловой мощности.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Системы ХТЭ, в том числе на базе металлгидридной технологии, наибольшее распространение получают именно в области возобновляемой энергетики, связанной с эксплуатацией солнечной энергии в том или ином виде. Причем, по причинам, озвученным выше, в качестве материалов в основном рассматриваются высокотемпературные металлгидриды, тогда как низкотемпературным гидридам отведена ниша промежуточной подсистемы хранения водорода, либо элемента системы охлаждения, благодаря возможности определенных сплавов охлаждаться до низких температур в процессе десорбции водорода [32].

В представленной работе были проведены исследования одноступенчатой термохимической системы ХТЭ на базе низкотемпературного металлгидрида с целью определить потенциал данного класса материалов в качестве основы для создания низкотемпературных реакторов, способных работать в диапазоне температур 0-100°C. Требовалось



оценить диапазон рабочей ёмкости реактора при заданных условиях, циклическую стабильность, динамику реакции и рабочие давления.

### 3.1. Материалы и металлгидридный реактор

Варьирование состава ИМС позволяет получить сплав, удовлетворяющий необходимым требованиям по параметрам давления сорбции/десорбции в температурной области от 0 до 100°C, которые обеспечивают функционирование системы хранения тепловой энергии в заданных параметрах. Сплав состава  $\text{LaFe}_{0.1}\text{Mn}_{0.3}\text{Ni}_{4.8}$  был выбран на основе подходящих параметров давление-концентрация-температура (РСТ-диаграммы): давление в системе не более 13 атм. при комнатной температуре и температурные параметры системы охлаждения/нагрева 20-90°C.

### 3.2. Порядок проведения и результаты экспериментов

Основной задачей в ходе проведения экспериментальных работ было определение достижимости циклической стабильности работы одноступенчатой металлгидридной системы ХТЭ с замкнутой газовой подсистемой. Подача водорода в металлгидридный реактор (МГ-реактор) (режим выделения тепла) осуществлялась из газовой подсистемы (40 л. баллон), реактор охлаждался жидким теплоносителем (вода) через замкнутый контур с расширительным баком на 20 литров, при этом начальная температура воды составляла 20°C. Разрядка МГ-реактора в газовую подсистему (регенерация системы хранения тепла) проводилась при температуре хладагента (воды) 90°C. Была проведена серия заряда-разряда МГ-реактора.

По результатам эксперимента можно судить о принципиальном достижении циклической стабильности системы ХТЭ, ёмкостные параметры которой совпадают с расчетными при данных температурах теплоносителя.

На Рис.2 показаны РСТ-диаграммы сплава  $\text{LaFe}_{0.1}\text{Mn}_{0.3}\text{Ni}_{4.8}$  с наложенной на диаграмму схемой циклической работы установки.

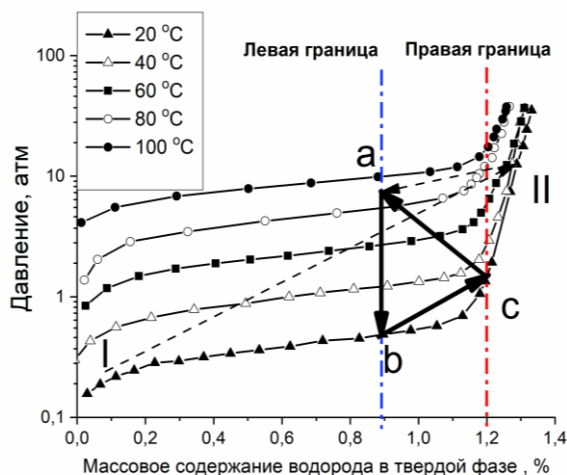


Рис. 2. РСТ-диаграммы сплава  $\text{LaFe}_{0.1}\text{Mn}_{0.3}\text{Ni}_{4.8}$  при различных температурах  
I → II – начальная стадия (полная зарядка МГ-реактора)  
II → a – первоначальная разрядка МГ-реактора в баллон

a → b – температурная релаксация системы  
b → c – генерация тепловой энергии (зарядка реактора)  
c → a – регенерация системы (разрядка реактора)

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При заданных параметрах была достигнута циклически стабильная ёмкость системы в 24% от номинального объема МГ-реактора по водороду.

Динамика реакции может быть существенно улучшена путем внедрения более эффективных решений по обеспечению теплообмена между засыпкой ИМС и хладагентом. Так как активированный работающий металлгидрид представляет собой мелкодисперсный порошок с очень низкой эффективной теплопроводностью, то для интенсификации теплообмена возможно внедрение в объем засыпки пеноматериалов из высокотеплопроводных металлов (медь, алюминий), уменьшение толщины сорбирующего слоя металлгидрида в реакторе, добавление внутреннего оребрения теплообменника, при котором рёбра будут проникать внутрь засыпки ИМС, либо комплексное применение всех вышеперечисленных методов. Использование пеноматериалов осложняется проблемой первичного равномерного распределения частиц ИМС по объему пеноматрицы внутри реактора, для преодоления которой нужно использовать вибростенды, что едва ли практично для потенциальных реакторов большого объема из-за затруднений, связанных с их размерами и весом. Применение внутреннего оребрения связано со сложностью в конструировании и стоимости подобных типов МГ-реакторов. Наиболее доступной для реализации остаётся уменьшение толщины сорбирующего слоя и использование теплообменников типа труба в трубе.

Как видно из рис. 2, циклический объем системы (масса водорода, участвующая в цикле a-b-c) зависит от равновесного давления сплава при температурах близких к 100°C (точка a), которое определяет левую границу заполненности реактора ( $C=0.9\%$ ) при максимально возможной разрядке в баллон. Равновесное давление сорбции (точка c) определяет правую границу заполненности реактора. Поэтому работа одноступенчатой металлгидридной системы ХТЭ с замкнутой газовой подсистемой ограничена довольно небольшой ёмкостью сплава, участвующей в реализации хранения тепла.

Соответственно, необходимо расширить температурный диапазон работы установки для обеспечения большей циклической ёмкости при том же количестве сплава. Для этого можно использовать хладагент с температурой ниже 20°C перед началом генерации тепла.

Необходим также поиск и подбор нового состава ИМС, более подходящего для предполагаемых температурных диапазонов работы установки, который позволит существенно увеличить циклическую ёмкость металлгидридной системы ХТЭ.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ХТЭ – хранение тепловой энергии,  
ИМС – интерметаллический сплав,  
МГ – металлгидридный  
РСТ – pressure-concentration-temperature, давление-  
концентрация-температура,

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00927, <https://rscf.ru/project/22-29-00927/>»

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Peng X**, Root TW, Maravelias CT. Storing solar energy with chemistry: the role of thermochemical storage in concentrating solar power. *Green Chem* 2017;19:2427–38.
2. **Abbott D**. Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs? *Proc IEEE* 2010;98(1):42e66.
3. **Desideri U**, Campana PE. Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Appl Energy* 2014; 113:422–33.
4. **Solar PACES**. CSP News Briefs; 2018. <<https://www.solarpaces.org/category/latest-in/csp-news-briefs/>>[accessed July 11, 2018].
5. **Datong Gao** et al, Seasonal-regulatable energy systems design and optimization for solar energy year-round utilization, *Applied Energy* 322 (2022) 119500
6. **Shi Su**, Hai Lu et al, Solar energy utilization patterns for different district typologies using multi-objective optimization: A comparative study in China, *Solar Energy* 155 (2017) 246–258
7. **Mahmoud Ouria**, Harun Sevinc, Evaluation of the potential of solar energy utilization in Famagusta, Cyprus, *Sustainable Cities and Society* 37 (2018) 189–202
8. **Dhanis Woro Fittrin**, Determining Optimal Schedule and Load Capacity in the Utilization of Solar and Wind Energy in the Microgrid Scheme: A Case Study, *Energy Procedia* 65 ( 2015 ) 48 – 57
9. **Huawei Chang**, Yuting Liu et al, Experimental study on comprehensive utilization of solar energy and energy balance in an integrated solar house, *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 967–976
10. **Desideri U**, Campana PE. Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. *Appl Energy* 2014; 113:422–33.
11. **U. Pelay**, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou , M. Rood , Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017) 82–100.
12. **P. Denholm**, J. C. King, C. F. Kutcher, P.P.H. Wilson, Decarbonizing the electric sector: Combining renewable and nuclear energy using thermal storage, *Energy Policy* 44 (2012)301–311.
13. **Farid MM**, Khudhair AM, Razack SAK, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage materials and applications. *Energy Convers Manag* 2004;45:1597e615.
14. **Jinjia W**, Yasuo K, Satoshi H, Hiromi T. Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply. *Int J Appl Thermal Eng* 2005;25:2903e20.
15. **Kenisarin MM**. High temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renew Sust Energy Rev* 2010; 14:955–70.
16. **Francis Agyenim**, Neil Hewitt, Philip Eames, Mervyn Smyth, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 615–628
17. **Belen Zalba**, Jose M Marin, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003) 251–283
18. **Nasiru I. Ibrahim**, Fahad A. Al-Sulaiman, Saidur Rahman, Bekir S. Yilbas, Ahmet Z. Sahin, Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017) 26–50
19. **Kun Du**, John Calautit, Zhonghua Wang, Yupeng Wu, Hao Liu, A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges, *Applied Energy* 220 (2018) 242–273
20. **Atul Sharma**, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 318–345
21. **Abhishek Anand**, Amritanshu Shukla, Anil Kumar, D. Buddhi, Atul Sharma, Cycle test stability and corrosion evaluation of phase change materials used in thermal energy storage systems, *Journal of Energy Storage* 39 (2021) 102664
22. **Darkwa K**. Thermochemical energy storage in inorganic oxides: an experimental evaluation. *Appl Therm Eng* 1998; 18(6):387–400.
23. **P. Pardo**, A.Deydiera, Z.Anxionnaz-Minvielle, S.Rougé, M.Cabassud, P.Cognet. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renew Sust Energy Rev* 32 (20149); 591-610.
24. **Reiser A**, Begdavonic B, Schliche K. The application of Mg based metal hydrides as heat energy storage systems. *Int J Hydrogen Energy* 2000; 25:425e30
25. **Zaluska, A.**; Zaluski, B.; Ström-Olsen, J. O. Nanocrystalline magnesium for hydrogen storage. *J.Alloys Comp.* 1999, 288, 217-225.
26. **Bowman, R.C.**; Fultz, B. Metallic hydrides I: Hydrogen storage and other gas-phase applications. *MRS Bulletin* 2002, 27, 688-693.
27. **Corgnale C**, Hardy B, Motyka T, et al. Metal hydride based thermal energy storage system requirements for high performance concentrating solar power plants. *Int J Hydrogen Energy* 2016; 41:20217–30.
28. **Bao ZW**, Yuan SY. Performance investigation of thermal energy storage systems using metal hydrides adopting multi-step operation concept. *Int J Hydrogen Energy* 2016; 41:5361–70.
29. **Dunikov D**, Borzenko V and Malysenko S 2012 Influence of impurities on hydrogen absorption in a metal hydride reactor *International Journal of Hydrogen Energy* 37 13843-8.
30. **Borzenko V**, Blinov D and Glagoleva A 2018 Stand-Alone, Logistics - Free kW-Scale Hydrogen Energy Storage System. In: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018
31. **Borzenko V I**, Romanov I A, Dunikov D O and Kazakov A N 2019 Hydrogen sorption properties of metal hydride beds: Effect of internal stresses caused by reactor geometry *International Journal of Hydrogen Energy* 44 6086-92.
32. **Fenil Desai**, Sunku Prasad Jenne, P. Muthukumar, Muhammad Mustafizur Rahman. Thermochemical energy storage system for cooling and process heating applications: A review. *Energy Conversion and Management* 229 (2021) 113617

*И.В. Пушкарева<sup>1,2</sup>, М.А. Соловьев<sup>1,2</sup>, М.В. Козлова<sup>1,2</sup>, С.И. Бутрим<sup>1,2</sup>, Д.А. Симкин<sup>2</sup>, А.С. Пушкарев<sup>1,2</sup>, Н.В. Кулешов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ВОДЫ С АНИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

Низкотемпературные электролизеры воды на основе анионообменных мембран являются многообещающими источниками «зеленого» водорода высокой чистоты. Метод спектроскопии электрохимического импеданса позволяет определить распределение компонентов напряжения МЭБ электролизера воды с АОМ, а также их зависимость от плотности тока и ряда эксплуатационных параметров: рабочей температуры, скорости циркуляции электролита и его концентрации. Рассмотренный подход позволит разработать способы повышения производительности и долговечности МЭБ электролизера воды с АОМ.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Для реализации будущего перехода к низкоуглеродной экономике необходимо широкое внедрение подходов к получению «зеленого» водорода, важнейшим из которых является электролиз воды [1]. Необходимость разработки подходов к средне- и долгосрочному хранению энергии, получаемой от возобновляемых и атомных источников (установленная мощность которых во всем мире непрерывно растет), либо энергии, невостребованной потребителями (стабилизация сети, выравнивание графика нагрузки), также стимулирует интерес к низкотемпературному электролизу воды. Многообещающими являются низкотемпературные мембранные электролизеры воды, которые позволяют получать водород (и кислород) высокой чистоты с высокой производительностью [2]. Например, электролизеры воды с протонообменной мембраной (ПОМ) характеризуются высокой эффективностью и маневренностью по нагрузке, компактностью, высокой удельной мощностью, длительным ресурсом работы и достаточно высоким уровнем взрывопожаробезопасности [3]. Еще одним важнейшим преимуществом мембранных электролизеров является возможность получать водород при высоких давлениях (до нескольких сотен бар), что позволяет полностью/частично отказаться от компрессоров при получении компримированного водорода, необходимого, например, для заправки систем хранения водородного транспорта [2], [4]. Хотя водород и является достаточно

востребованным продуктом в различных сферах экономики, цена водорода, полученного методом электролиза, оказывается достаточно велика из-за высоких капитальных затрат на электролизеры воды с ПОМ в силу использования в их составе дорогостоящих материалов (благородных металлов, титана) и недостаточно высокого ресурса работы [5]. Другой вид мембранных электролизеров – электролизеры воды с анионообменной мембраной (АОМ) [6] – характеризуется всеми основными преимуществами традиционного щелочного электролиза воды, например позволяет использовать катализаторы на основе неблагородных металлов и недорогие конструкционные материалы (в отличие от электролиза воды с протонообменной мембраной) [4]. Применение АОМ обеспечивает дополнительные преимущества: возможность использовать раствор с низкой концентрацией щелочи – ок. 1 моль/л КОН [7] (или даже раствор  $K_2CO_3$  [8]), что существенно замедляет карбонизацию электролита. При этом электролизеры воды с АОМ сочетают в себе и преимущества технологии на основе ПОМ: высокие рабочие плотности тока, чистоту газов, возможность получать водород под давлением, и др. [9].

Недостаточно высокая стабильность анионообменных полимеров (используемых как в качестве АОМ, так и в качестве связующего в составе активных слоев) является основным препятствием широкому внедрению электролизеров воды на основе АОМ [10]. Разработка МЭБ электролизеров воды с АОМ, характеризующихся высокой производительностью и долговечностью, требует глубокого понимания распределения составляющих напряжения МЭБ. Анализ распределения указанных составляющих в зависимости от времени эксплуатации, влияния стрессоров (плотность тока, напряжение, давление, температура и др. [11]) и рабочих параметров позволит определить механизмы деградации, а также разработать способы повышения долговечности МЭБ электролизера воды с АОМ.

В данной работе представлено исследование характеристик мембранно-электродного блока (МЭБ)

электролизера воды с АОМ. Использование метода спектроскопии электрохимического импеданса позволило определить распределение составляющих напряжения МЭБ электролизера воды с АОМ и их зависимость от плотности тока, температуры, концентрации и скорости циркуляции электролита.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Подготовка компонентов МЭБ

Для формирования мембранно-электродных блоков (МЭБ) электролизера воды с АОМ была использована мембрана Sustainion® X37 (Dioxide Materials, США) [9]. Никелевая пена (ООО «ОмЛиберСайнс», Россия) использовалась в качестве материала пористых транспортных слоев (ПТС), которая предварительно обрабатывалась давлением. Толщина ПТС составляла ок. 0,3 мм. В качестве электрокатализатора реакции выделения водорода (РВВ) использовался Pt/C (ПМ-40, Прометей-РД), а для реакции выделения кислорода (РВК) – наноструктурный NiO (II) [12].

Формирование активных слоев на поверхности ПТС осуществлялось методом распыления чернил (гомогенной суспензии, состоящей из необходимого количества катализатора, раствора связующего и изопропилового спирта) в потоке воздуха [13]. В качестве связующего использовался Nafion® (Ion Power, США), который хотя и не является анионным проводником, обеспечивает стабильность морфологии активных слоев [9]. Содержание связующего в анодном и катодном активных слоях составляет 10,0 и 29,5 масс.%, соответственно. Загрузка Pt на катоде составляла 0,8 мг/см<sup>2</sup>, а NiO на аноде – 3,0 мг/см<sup>2</sup>.

Анод, катод и мембрана зажимались между фланцами стальной лабораторной ячейки с интегрированной системой каналов для подвода и отвода реагентов и продуктов реакций. МЭБ формировался методом «самосвязывания» [13] в ходе оптимизированной процедуры приработки МЭБ при периодическом контроле поляризационной характеристики до достижения стационарного состояния. Площадь рабочей поверхности МЭБ составляет 7,29 см<sup>2</sup> (2,7 x 2,7 см).

### 2.2. Исследование характеристик МЭБ

Электрохимические исследования характеристик МЭБ электролизера воды с АОМ проводились на экспериментальном стенде, схема которого приведена рис. 1. Для поддержания постоянной концентрации раствора (1М КОН), подаваемого на анод и катод, использовался расширительный бак. Для обеспечения циркуляции раствора КОН между расширительным баком и ячейкой использовался двухканальный перистальтический насос, который обеспечивал одинаковый расход 1–15 мл/мин через анодную и катодную камеры экспериментальной ячейки. Равномерная циркуляция раствора электролита с двух сторон необходима для обеспечения равномерного увлажнения анионообменной мембраны для поддержания максимальной ионной

проводимости в ней и прилежащих активных слоях. В связи с тем, что часть раствора уносилась выходящими из экспериментальной ячейки кислородом и водородом, применение сепараторов позволяло отделить большую часть раствора от выходящих газов.

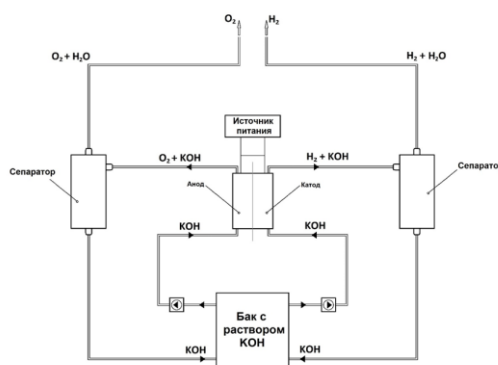


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования характеристик МЭБ электролизера с АОМ.

В качестве источника питания использовался потенциостат Solatron 1280 (АМТЕК, США), оснащенный высокочастотным модулем для измерений методом спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ) и усилителем тока и напряжения с предельными значениями напряжения и тока 12 В и 20 А, соответственно. Измерения проводились при температуре 60 °С и прокачке через анод и катод 1М раствора КОН (расход 1–15 мл/мин). Поляризационная кривая (вольтамперная характеристика) измерялась в потенциодинамическом режиме с минимально возможной скоростью развертки (1 мВ/с) в диапазоне напряжений 1,4–2,3 В.

Для компонентов напряжения МЭБ (по крайней мере омического и полного поляризационного сопротивления [9], [13], [14]) проводились измерения методом СЭИ при характерных значениях напряжения, соответствующих различным областям вольтамперной характеристики (кинетическому, омическому, либо транспортному контролю суммарного процесса). Измерения проводились в потенциостатическом режиме в диапазоне частот 0,1 Гц – 20 кГц с амплитудой синусоидального сигнала 20 мВ. Измерениям методом СЭИ предшествовал этап стабилизации тока при заданном значении напряжения в течение 300–900 с

Анализ спектров электрохимического импеданса проводился на основе предложенной эквивалентной цепи (рис. 2), включающей паразитную составляющую ( $R_1/L_1$ ) [15]), омическое сопротивление МЭБ  $R_2$  (включающее собственно омическое и ионное сопротивление компонентов МЭБ), а также поляризационное сопротивление, представленное в виде двух элементов Фойгта: высокочастотного ( $R_3/CPE_3$ ) и низкочастотного ( $R_4/CPE_4$ ) [16]. Как правило, R представляет собой сопротивление переноса заряда (например, электрохимической реакции), а емкость характеризует двойной электрический слой соответствующей границы раздела.

В данном случае емкость (C) заменена элементом постоянной фазы (CPE: constant phase element), который учитывает неоднородность активного слоя в электролизере воды и неравномерность распределения активных центров [17].

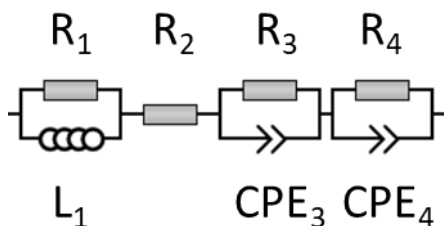


Рис. 2. Эквивалентная цепь, использованная для исследования характеристик МЭБ электролизера с АОМ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 представлена поляризационная характеристика МЭБ электролизера воды с АОМ при 60 °С, которая является интегральной характеристикой МЭБ и складывается из суммы равновесной разности потенциалов и всех потерь напряжения, включая омические, поляризационные и транспортные [13]. Анализ отдельных составляющих напряжения затруднен, поэтому необходимо использование дополнительных методов исследований, например СЭИ.

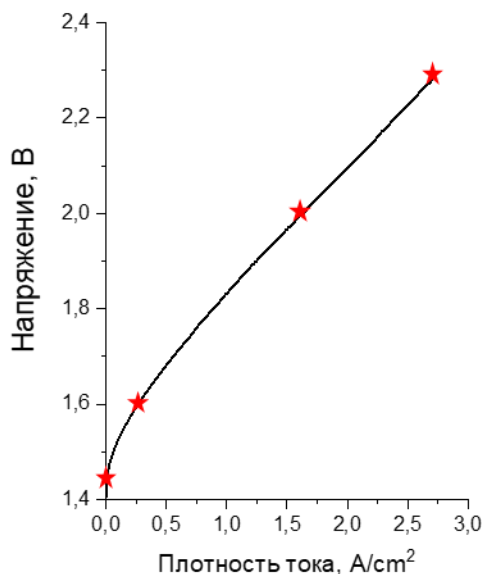


Рис. 3. Поляризационная (вольтамперная) характеристика МЭБ электролизера с АОМ (звездочками отмечены величины напряжения, при которых измерен спектр электрохимического импеданса)

На рис. 4 приведены годографы электрохимического импеданса, соответствующие измерениям при характерных значениях напряжения. Традиционно, из годографа электрохимического импеданса, не прибегая к моделированию, можно определить омическое сопротивление МЭБ – оно равно значению на действительной оси в месте ее пересечения с годографом в области высоких частот ( $10^3$ – $10^4$

Гц) [14], [18], [19]. В данном случае в указанном интервале частот наблюдается существенное влияние измерительной среды и/или самой экспериментальной ячейки на отклик. Поэтому для дальнейшего анализа характеристик МЭБ электролизера воды с АОМ необходима обработка полученных годографов в соответствии с модельной эквивалентной цепью (рис. 2).

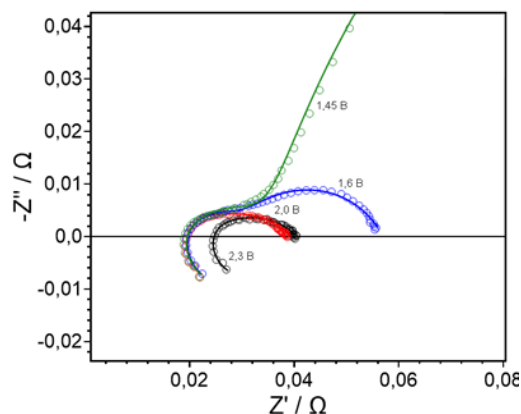


Рис. 4. Годографы электрохимического импеданса МЭБ электролизера воды с АОМ, полученные при температуре 60 °С и расходе 1М раствора КОН 3 мл/мин. Линиями обозначен результат моделирования в соответствии с эквивалентной цепью, приведенной на рис. 2.

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ поляризационных характеристик спектров электрохимического импеданса позволил установить зависимость компонентов напряжения МЭБ электролизера воды с АОМ от напряжения, а также от ряда эксплуатационных параметров, в частности, от скорости циркуляции электролита и его концентрации. Полученные результаты будут использованы при дальнейшей разработке высокопроизводительных и долговечных МЭБ электролизера воды с АОМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01429, <https://rscf.ru/project/22-29-01429/> (исследование характеристик мембранно-электродных блоков электролизера воды с анионообменной мембраной), а также при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук МК-407.2021.1.3 (анализ спектров электрохимического импеданса).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oliveira A. M., Beswick R.R. and Yan Y. A green hydrogen economy for a renewable energy society // Curr. Opin. Chem. Eng. 2018. V. 33. P. 100701.
2. Paidar M., Fateev V. and Bouzek K. Membrane electrolysis—History, current status and perspective // Electrochim. Acta. 2016. V. 209. P. 737–756.
3. Shiva Kumar S. and Himabindu V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review // Mater. Sci. Energy Technol. 2019. V. 2. N 3. P. 442–454.

4. Sartory M., Wallnöfer-Ogris E., Salman P., Fellinger T., Justl M., Trattner A. and Klell M. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. N 52. P. 30493–30508.
5. Schalenbach M., Zeradjanin A.R., Kasian O., Cherevko S. and Mayrhofer K.J.J. A Perspective on Low-Temperature Water Electrolysis – Challenges in Alkaline and Acidic Technology // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2018. V. 13. P. 1173–1226.
6. Vincent I. and Bessarabov D.G. Low cost hydrogen production by anion exchange membrane electrolysis: A review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. V. 81. 1690–1704.
7. Ayers K., Danilovic N., Ouimet R., Carmo M., Pivovar B. and Bornstein, M. Perspectives on Low-Temperature Electrolysis and Potential for Renewable Hydrogen at Scale // *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* 2019. V. 10. P. 219–239.
8. Ito H., Kawaguchi N., Someya S., Munakata T., Miyazaki N., Ishida M. and Nakano A. Experimental investigation of electrolytic solution for anion exchange membrane water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2018. V. 43. P. 17030–17039.
9. Pushkareva I.V., Pushkarev A.S., Grigoriev S.A., Modisha P. and Bessarabov D.G. Comparative study of anion exchange membranes for low-cost water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. N 49. P. 26070–26079.
10. Faid A.Y., Xie L., Barnett A.O., Seland F., Kirk D. and Sunde S. Effect of anion exchange ionomer content on electrode performance in AEM water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. N 53. P. 28272–28284.
11. Abmann P., Gago A.S., Gazdzicki P., Friedrich K.A. and Wark M. Toward developing accelerated stress tests for proton exchange membrane electrolyzers // *Curr. Opin. Electrochem.* 2020, V. 21. P. 225–233.
12. Wu Z., Vagin M., Boyd R., Bakhit B., Greczynski G., Odén M. and Björk E. M. Morphology effects on electrocatalysis of anodic water splitting on nickel (II) oxide // *Microporous Mesoporous Mater.* 2022, V. 333. P. 111734.
13. Pushkarev A.S., Pushkareva, I.V., Solovyev M.A., Prokop M., Bystron T., Rajagopalan S.K., Bouzek K. and Grigoriev S.A. On the influence of porous transport layers parameters on the performances of polymer electrolyte membrane water electrolysis cells // *Electrochim. Acta*. 2021. V. 399. P. 139436.
14. Suermann M., Bensmann B. and Hanke-Rauschenbach R. Degradation of Proton Exchange Membrane (PEM) Water Electrolysis Cells: Looking Beyond the Cell Voltage Increase // *J. Electrochem. Soc.* 2019. V. 166. P. F645–F652.
15. Shin E.-C., Ahn P.-A., Seo H.-H., Jo J.-M., Kim S.-D., Woo S.-K., Yu J. H., Mizusaki J. and Lee J.-S. Polarization mechanism of high temperature electrolysis in a Ni-YSZ/YSZ/LSM solid oxide cell by parametric impedance analysis // *Solid State Ionics*. 2013. V. 232. P. 80–96.
16. Vincent I., Lee, E.-C. and Kim H.-M. Comprehensive impedance investigation of low-cost anion exchange membrane electrolysis for large-scale hydrogen production // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 293.
17. Córdoba-Torres P., Mesquita T. J., Devos O., Tribollet B., Roche V. and Nogueira R.P. On the intrinsic coupling between constant-phase element parameters  $\alpha$  and  $Q$  in electrochemical impedance spectroscopy // *Electrochim. Acta*. 2012. V. 72. P. 172–178.
18. Frensch S. H., Fouda-Onana F., Serre G., Thoby D., Araya S. S. and Kær S. K. Influence of the operation mode on PEM water electrolysis degradation // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. P. 29889–29898.
19. Weiß A., Siebel A., Bernt M., Shen T.-H., Tileli V. and Gasteiger H. A. Impact of Intermittent Operation on Lifetime and Performance of a PEM Water Electrolyzer // *J. Electrochem. Soc.* 2019. V. 166. P. F487–F497.





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одинадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 5

*Диагностика, мониторинг,  
информационно-аналитические  
системы в энергосбережении*

*С.В. Гумилевский, Т.Ю. Фрозинова*

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ОБЪЕКТАХ СЕТЕВОГО ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА**

### **АННОТАЦИЯ**

Рассмотрены особенности внедрения новых информационных технологий в электроэнергетике, которые позволят создать более эффективную и устойчивую к аварийным ситуациям систему мониторинга и контроля качества энергоресурсов на объектах сетевого электрохозяйства в условиях роста объема обрабатываемых данных.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Системы мониторинга и контроля качества энергоресурсов применяются в сетях 0,4, 6(10) кВ (как правило, промышленные сети и объекты сетевого электрохозяйства). При проектировании современных систем мониторинга и контроля качества энергоресурсов на объектах сетевого электрохозяйства используют типовые подходы. Основные элементы при этом - приборы учета электроэнергии, каналы связи с удаленным объектом, серверы по сбору, обработке, хранению и предоставлению информации.

В сетях более высокого уровня напряжения (35, 110 кВ и выше) не имеет смысла применять системы мониторинга и контроля качества энергоресурсов, потому что эти сети находятся под управлением ПАО «Россети», и на них распространяются специальные стандарты, исполнение которых не является экономически оправданным для сетей промышленных предприятий и сетей, находящихся в частной собственности.

Основная задача системы мониторинга и контроля качества энергоресурсов - контроль соответствия основных параметров электроэнергии нормированным значениям. Можно выделить следующие значимые параметры: наличие или отсутствие напряжения (в том числе трехфазного), его максимальное и минимальное значения, искажение питающего напряжения.

Недопустимые характеристики питающего напряжения могут привести к выходу из строя оборудования и нарушению технологического процесса у потребителя, что вызывает сложности взаимодействия с электросетевой компанией. Для исключения

спорных ситуаций требуется внедрение системы мониторинга и контроля качества энергоресурсов, установка специализированных приборов - анализаторов, которые не предусмотрены изначально в сетях. Возможность фиксации параметров качества электроэнергии приборами, внесенными в реестр средств измерения, и их дистанционная передача дает возможность для работы системы мониторинга.

Таким образом, система мониторинга и контроля качества энергоресурсов позволяет своевременно принимать меры по предотвращению аварий, что ведет к сохранности оборудования и правильной настройке анцапф (переключатели на отпайках трансформаторов 6-10 кВ) и работы РПН (устройство регулировки напряжения под нагрузкой). Процесс настройки анцапфы и РПН не быстрый и автоматизировать его невозможно, однако есть вариант своевременно принять решение о выводе оборудования в ремонт для дальнейшей его отладки.

### **2. СТРУКТУРА СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

Современная система мониторинга и контроля качества энергоресурсов на объектах сетевого электрохозяйства в качестве первичного звена по сбору информации использует прибор учета (далее ПУ), который сертифицирован и имеет высокую надежность и цифровые интерфейсы для передачи информации о параметрах сети. Также в эту систему можно включить блоки защиты и автоматики с цифровыми интерфейсами. Однако эти устройства имеют меньший класс точности и стоят на втором месте после ПУ, которые являются специализированным оборудованием и более актуальны для мониторинга и контроля качества электроэнергии. На рис. 1 отражены основные элементы, которые входят в состав системы мониторинга и контроля качества энергоресурсов.

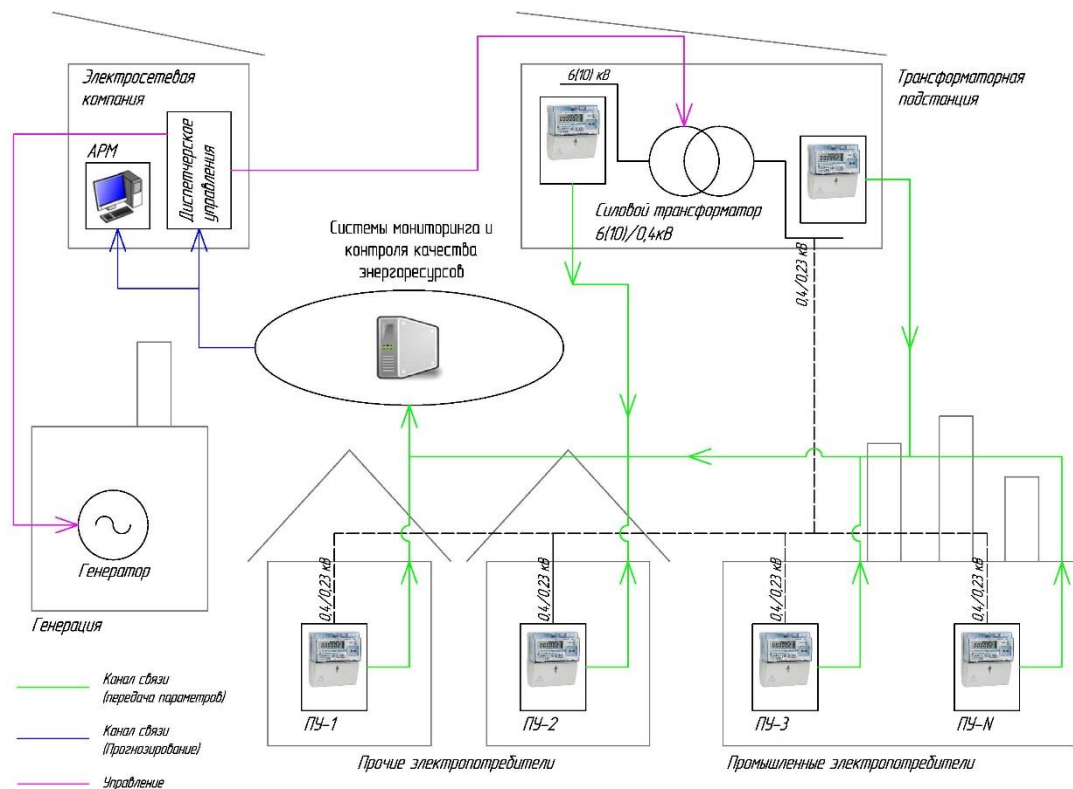


Рис. 1. Система мониторинга и контроля качества энергоресурсов.

Современная система мониторинга и контроля качества энергоресурсов на объектах сетевого электрохозяйства использует протокол TCP/IP для канала связи. В тоже время существует канал связи CSD, который появился ранее. Он выступает как резервный и не позволяет обрабатывать большой объем информации.

В существующих автоматизированных системах коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) каналы связи используется для передачи только данных об объемах потребления (часовая мощность или профиль мощности) и для синхронизации времени на ПУ. К каналам связи АСКУЭ предъявляются самые жесткие требования, так как передаваемая информация используется для взаиморасчетов на оптовом рынке электроэнергии. Однако современные ПУ позволяют также передавать параметры электроэнергии. Как показывает практика, использование канала связи с объектом кроме как для передачи информации об объемах потребления для оптового рынка нецелесообразно. В данном случае информация о потреблении имеет наивысший приоритет и ее отсутствие в нужный момент может приводить к дополнительным экономическим затратам.

Для понимания особенностей построения систем мониторинга и контроля качества энергоресурсов следует учитывать, откуда появляется большой объем данных:

1. В современном мире изменились требования к получаемой информации и стало актуальным ее шифрование. Любое шифрование подразумевает наличие избыточных данных, что увеличивает общий объем передаваемой информации.

2. Изменились требования к ПУ. Теперь они хранят показания потребления электроэнергии, отметки времени о превышении или понижении уровня напряжения, профиль мощности. Кроме того, в законодательстве РФ по расчету потерь, возникающих при передаче электроэнергии, утверждены методики, требующие значения тока. Другими словами, проявляется тенденция на максимально возможный сбор и хранение информации о параметрах электрической сети.

3. Количество ПУ с цифровыми интерфейсами (RS-485, CAN, RS-422) стало больше, что увеличивает объем для работы систем мониторинга.

4. Увеличение степени цифровизации систем управления и диспетчеризации, системы релейной защиты и автоматики энергосистемы в целом.

Такая ситуация приводит к необходимости стандартизации протоколов обмена данными. В настоящее время это возложено на протокол СПОДЭС (спецификация протокола обмена данными электронных счетчиков) и федеральное законодательство.

Еще одним звеном в современных системах мониторинга и контроля качества энергоресурсов на объектах сетевого электрохозяйства является сервер, где собирается и хранится информация. Так как сами ПУ позволяют хранить зарегистрированные параметры, то нет необходимости сертифицировать сам сервер и использовать высококачественные материалы при его сборке. Также самое относится и к операционной системе (далее ОС) сервера. В случае если в технологическом процессе требуется неза-

медлительная реакция на оборудование, то системы мониторинга не выполняют эти задачи.

В диспетчерских пунктах электросетевых компаний на компьютерах (АРМ - автоматизированное рабочее место) устанавливают специализированное ПО - SCADA, в состав которого может входить система мониторинга энергоресурсов. Это позволяет анализировать информацию и оперативно принимать решения о необходимых переключениях без выезда на место установки оборудования, что является экономически оправданным.

Особенность построения систем SCADA заключается в следующем:

1) использование технологии передачи данных между запущенными процессами (приложениями) за счет технологий Windows (OLE, ActiveX, COM/DCOM)

2) использование принципа циклической отправки и циклического чтения буфера.

В случае управления коммутационным оборудованием в электросетях недопустимо применение дублирования или отправки циклических команд. Сейчас это требование либо не реализуется, либо обеспечивается специальными надстройками в OPC серверах (семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами). При приеме-передаче в эксплуатацию подобных систем не учитывают важность этого принципа, который необходим для безопасной эксплуатации.

Еще одно важное направление в структуре систем мониторинга и контроля качества энергоресурсов - это применение оперативного оповещения ответственных лиц с помощью мобильных устройств. Для этих целей использование протокола TCP/IP посредством интернета или выделенной сети сотового оператора не позволяет передать сообщения, если абонент находится в производственных помещениях. Стены помещения, сделанные из железобетона и металлических сэндвич-панелей, препятствуют работе сетей 2G и выше. В этом случае информирование оператора по SMS остается более надежным вариантом построения системы. С практической точки зрения ведение журнала событий по SMS (Short Message Service — «служба коротких сообщений») в мобильном устройстве оператора не представляется возможным, так как это неудобно. Поэтому SMS используется для передачи критически важной информации. Учитывая выше изложенное, мобильные приложения с использованием протокола TCP/IP носят вспомогательный характер.

При любом варианте построения систем мониторинга и контроля качества энергоресурсов протокол TCP/IP (транспортный уровень) остается и его будет использовать прикладной уровень (СПОДЭС, OPC на TCP).

### 3. СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Возросший объем информации увеличивает нагрузку на аппаратную часть SCADA систем, вызывает необходимость увеличения мощности серверов,

что неэффективно и экономически невыгодно. В современных web технологиях перспективным является использование контейнеризации данных - Docker (программное обеспечение для автоматизации развертывания и управления приложениями в средах с поддержкой контейнеризации). С одной стороны, Docker - это дополнительное промежуточное звено, которое должно снижать надежность, но с другой стороны количество инсталляций Docker однозначно превышает в разы количество инсталляций классических SCADA. Так как контейнеры работают независимо, то все это обеспечивает большую надежность по сравнению с классическим подходом построения SCADA.

На рис. 2 приведена схема организации работы приложений. В виртуальной машине процессы запускаются в одной среде, а Docker каждому процессу соответствует своя среда - контейнер.

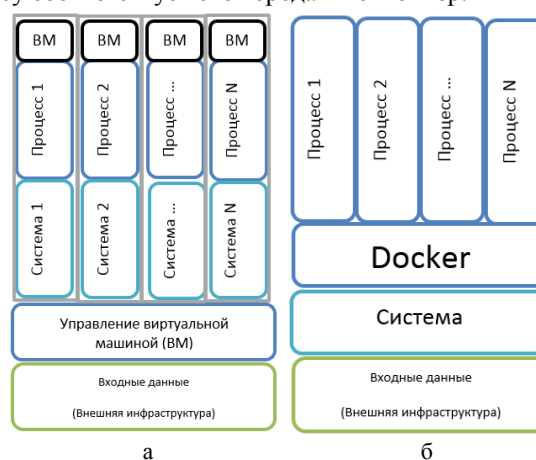


Рис. 2. Системы организации работы приложений: а – с применением стандартного подхода обработки данных, б – с применением технологии Docker.

Технология Docker использует среду Linux и может работать в Windows. В последнем случае требуется аппаратная поддержка виртуализации и компонент виртуальной машины, используемый WSL 2 (слой совместимости для запуска Linux-приложений в Windows). Еще таким образом можно обеспечить кроссплатформенность программного обеспечения.

Заметим, что современная и имеющая перспективы технология Docker применяет протокол транспортного уровня TCP/IP для передачи данных между контейнерами, что есть аналог приложения. Контейнеры позволяют полностью автоматизировать процесс установки программ, так как включают в себя все нужные зависимости и порядок выполнения действий. С помощью Docker можно создавать резервные копии контейнеров и имеется возможность хранить резервные копии как в локальном, так на удаленном репозитории. Таким образом, обеспечивается еще более надежное функционирование системы по сравнению с обычными SCADA системами.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие электроэнергетического сектора сопровождается появлением новых подходов и техноло-

гий. В современных цифровых системах мониторинга должны учитываться возрастающие возможности информационных технологий с целью повышения быстродействия, прогнозирования, эффективности и надежности работы энергосистемы. При этом в системах мониторинга и контроля качества электроэнергии сейчас перспективно использовать технологию контейнеризации (Docker).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кангин В.В.** Разработка SCADA-систем: учебное пособие / Кангин В.В., Кангин М.В., Ямолдинов Д.Н. - Издательство: Инфра-Инженерия, 2019. – 464 с.
2. **Иан Милл, Эйдан Хобсон Сейерс** Docker на практике / пер. с англ. Д.А. Беликов. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 516 с.: ил.
3. **Официальный сайт Docker**  
<https://docs.docker.com/reference/>.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КЛАССИФИКАЦИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ОСЦИЛЛОГРАММАМ ТОКА****АННОТАЦИЯ**

Данная работа направлена на применение моделей машинного обучения в распознавании электрических устройств и их активности, а именно включение, выключение, работа. Тренировочными данными для построения модели послужила база данных осциллограмм тока потребления 13 типов электрических приборов.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в квартирах жилых домов, а также в офисах находятся десятки электрических бытовых приборов. Любой из них имеет вероятность выхода из строя, что за собой может повлечь как повреждение других устройств, так и возгорание самого прибора и последующий пожар. Поэтому важно знать какие устройства в данный момент подключены к электрической сети и в последующем автоматически обнаруживать аномалии в их работе, чтобы заранее предотвратить чрезвычайную ситуацию.

Кроме того, регулирование работы устройств также требуется в случае использования технологий “умного дома” и интернета вещей, которые направлены на объединение устройств в самостоятельную сеть с обеспечением их автоматизированной работы с регулированием уровня потребляемой ими энергии.

При тестировании различных алгоритмов машинного обучения в процессе разработки программного обеспечения наилучшим образом себя показал алгоритм случайного леса. Данный алгоритм продемонстрировал высокую скорость обучения, а также достаточную точность.

В результате было разработано ПО, способное фиксировать активность различных приборов, анализируя осциллограммы работы приборов.

**2. АНАЛИЗ БАЗЫ ДАННЫХ  
ОСЦИЛЛОГРАММ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПРИБОРОВ**

Одним из важнейших этапов разработки ПО, применяющего алгоритмы машинного обучения является анализ и последующая обработка данных для обучения модели. От них зависит в большей степени итоговая точность предсказаний.

В качестве обучающих данных были предоставлены осциллограммы тока потребления 13 различных видов бытовых устройств с частотой дискре-

тизации 10 кГц. В каждой осциллограмме содержалось 8192 отсчета.

**2.1. Анализ базы данных осциллограмм**

В рамках данной научно-исследовательской работы использовались осциллограммы следующих бытовых приборов: кофемашина, мультиварка, мясорубка, обогреватель, посудомоечная машина, пылесос, микроволновая печь, стиральная машина, тостер, утюг, холодильник, чайник, электроплита.

После первичной обработки данных было получено 2911 осциллограмм тока потребления приборов. В табл.1 представлены основные параметры осциллограмм электрических устройств.

*Таблица 1. Свойства осциллограмм электроприборов*

Тип устройства/количество осциллограмм	Максимальное	Минимальное	Среднее
Кофемашина/180	0.83	-0.85	0.0040
Мультиварка/7	0.23	-0.23	0.0020
Мясорубка/20	0.18	-0.22	0.0004
Обогреватель/8	0.15	-0.14	0.0014
Посудомоечная машина/79	0.75	-0.76	0.0016
Пылесос/14	0.96	-0.95	0.0024
Микроволновая печь/33	1.08	-1.09	0.0029
Стиральная машина/1408	1.08	-0.81	0.0014
Тостер/12	0.31	-0.31	0.0017
Утюг/31	0.95	-0.95	0.0001
Холодильник/984	0.78	-0.74	0.0012
Чайник/26	0.70	-0.70	0.0006
Электроплита/108	1.17	-0.74	0.0011

Исходя из данных, полученных после первичной обработки осциллограмм, было обнаружено, что в них отсутствует постоянная составляющая и для большинства приборов явно выражен диапазон значений тока.

Также стоит заметить, что количество тренировочных данных распределено неравномерно между устройствами. Данное свойство базы данных осциллограмм может в последующем снизить точность модели машинного обучения. Следовательно,



потребуется разработать алгоритм, обеспечивающий равное количество тренировочных данных по каждому из типов приборов для модели машинного обучения.

В основном в базе данных присутствовали осциллограммы, содержащие работу устройств, но некоторые из них содержали запись только фонового тока. График сравнения осциллограммы фонового тока и работы прибора представлен на рис. 1.

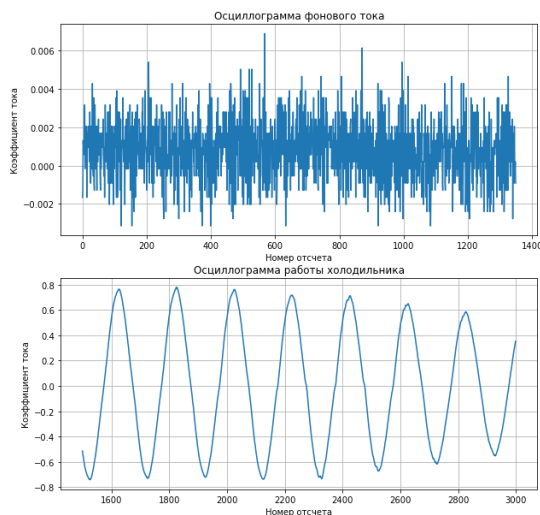


Рис. 1. Сравнение осциллограмм фонового тока и работы прибора.

Также осциллограммы работы приборов содержат промежутки, которых запечатлены переходные процессы, возникающие при включении и выключении электроприборов. Пример переходного процесса, за которым следует устоявшийся продемонстрирован на рис.2.

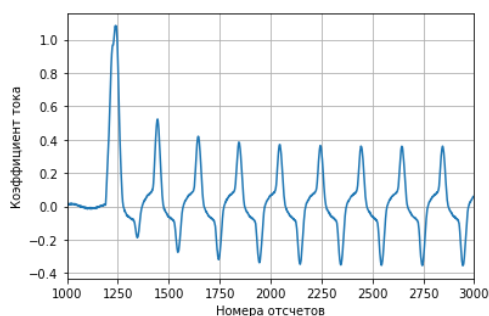


Рис. 2. Переходной процесс при включении микроволновой печи.

Некоторые из типов устройств имеют похожие осциллограммы, что в дальнейшем может снизить точность модели из-за того, что она будет путаться в определении электроприбора. На рис.3 представлены осциллограммы работы утюга и чайника.

Наибольший коэффициент корреляции, соответствовал смещению -50. На рисунке 4 продемонстрирована идентичность графиков работы двух различных электроприборов.

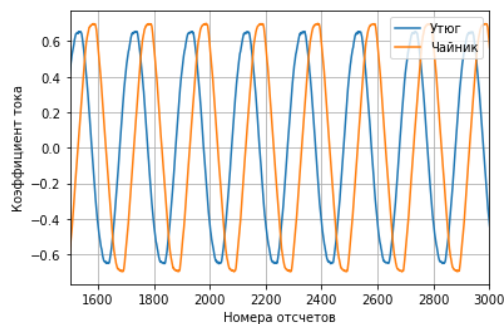


Рис. 3. Осциллограммы работы утюга и чайника.

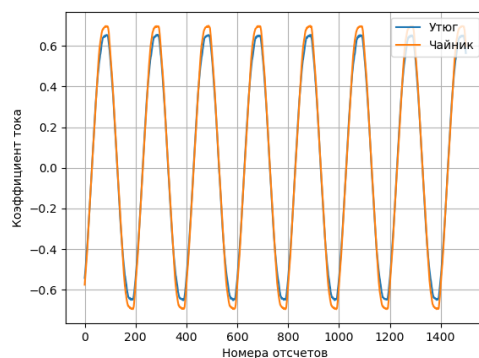


Рис. 4. Идентичность осциллограмм потребления чайника и утюга.

## 2.2. Анализ спектров осциллограмм устройств

При получении спектров осциллограмм устройств использовалась формула дискретного преобразования Фурье, представленная ниже [1].

$$y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-2\pi j \frac{kn}{N}} x[n], \quad (1)$$

где  $N$  – длина осциллограммы;  $x$  – массив точек осциллограммы.

На рис.3 изображены спектры выборочных осциллограмм тока потребления приборов.

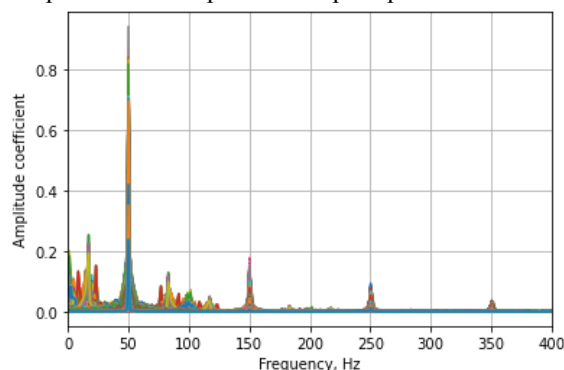


Рис. 5. Спектры осциллограмм приборов

Из рис.5 видно, что одной из наиболее ярко выраженных гармоник является частота 50 Гц, что соответствует стандарту частоты переменного тока в электрической сети [2,3].

Проанализировав характеристики отобранных осциллограмм фонового тока, был определен порог коэффициента амплитуды гармоники 50 Гц, уро-

вень которой можно считать работой устройства – 0.01.

### 2.3. Обработка данных

В целях получения тренировочных данных, которые бы обеспечили максимальную точность модели машинного обучения решено было использовать спектрограммы работы электроприборов. Это позволит снабдить модель информацией о временной и частотной областях токов потребления.

На рис.6 изображен пример спектрограммы работы электрического устройства [4].

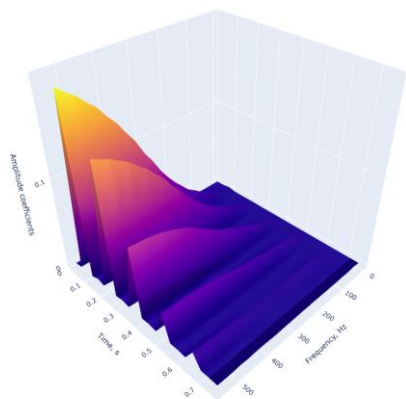


Рис. 6. Спектрограмма работы пылесоса.

Для тренировочного набора отбирались частоты от 0 до 600 Гц с шагом 25 Гц. В целях генерации достаточного количества обучающих данных использовались такие параметры как число точек перекрытия при вычислении спектрограммы, что позволяло повысить качество спектрограммы и увеличить количество данных для устройств.

В результате было получено 344320 строк тренировочных данных, содержащих частотные спектры осциллограмм работы приборов. В качестве обозначения типа электроприборов использовались цифры от 1 до 13. Номер идентификатора совпадает с номером строки в табл.1.

## 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В качестве алгоритма машинного обучения было решено использовать алгоритм случайного леса. Данный алгоритм позволил добиться высокой точности и скорости обучения.

В основе алгоритма случайного леса лежит идея использования сразу нескольких моделей машинного обучения для получения более точной и устойчивой к переобучению модели. Случайный лес является набором различных деревьев решений. В таком случае эффект переобучения уменьшается за счет усреднения результатов [5,6].

В начале обучения создаётся определённое число деревьев и им присваиваются определённые признаки, на основании которых они будут стро-

иться и выдавать решение о принадлежности к тому или иному классу.

При разработке алгоритма случайного леса использовалась библиотека sklearn для обработки обучающих данных, построения и обучения модели [8].

Параметры модели машинного обучения разделяются на внутренние и внешние. Внешние параметры задаются программистом. Внутренние параметры получает сама модель в ходе своего обучения. Алгоритм случайного леса вычисляет пороговые значения, на основании которых необходимо разделять данные.

Названия и описание внешних параметров, используемых в проекте, указаны в табл. 2.

Таблица 2. Гиперпараметры, используемые при настройке модели

Название	Описание
n_estimators	Количество деревьев решений, которые будут использоваться в модели.
criterion	Критерий, который вычисляет “загрязнённость” узла дерева. В данной работе использовался критерий gini.
max_depth	Максимальная глубина дерева (число слоёв).
min_samples_split	Минимальное число элементов при разбиении узла.
min_samples_leaf	Минимальное число элементов листа.
max_features	Количество признаков, которые даются на рассмотрение для каждого из деревьев решений.

Обучение модели происходило на 80% полученных тренировочных данных, тестовый же набор составил 20% от тренировочных данных. Результирующая точность модели на тренировочном и тестовом наборах соответственно 99% и 99%.

На рис.7 представлена матрица запутанности модели распознавания электроприборов. Она показывает то, что модель МО способна точно отличать приборы друг от друга, включая те, осциллограммы работы которых во временной области схожи.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы над данным проектом была исследована возможность применения машинного обучения в распознавании электрических приборов и разработано программное обеспечение, способное регистрировать включение, выключение и работу бытовых электроприборов с точностью 99%.

Универсальность разработанной программы может быть повышена, при помощи добавления новых электронных устройств в тренировочный набор данных.

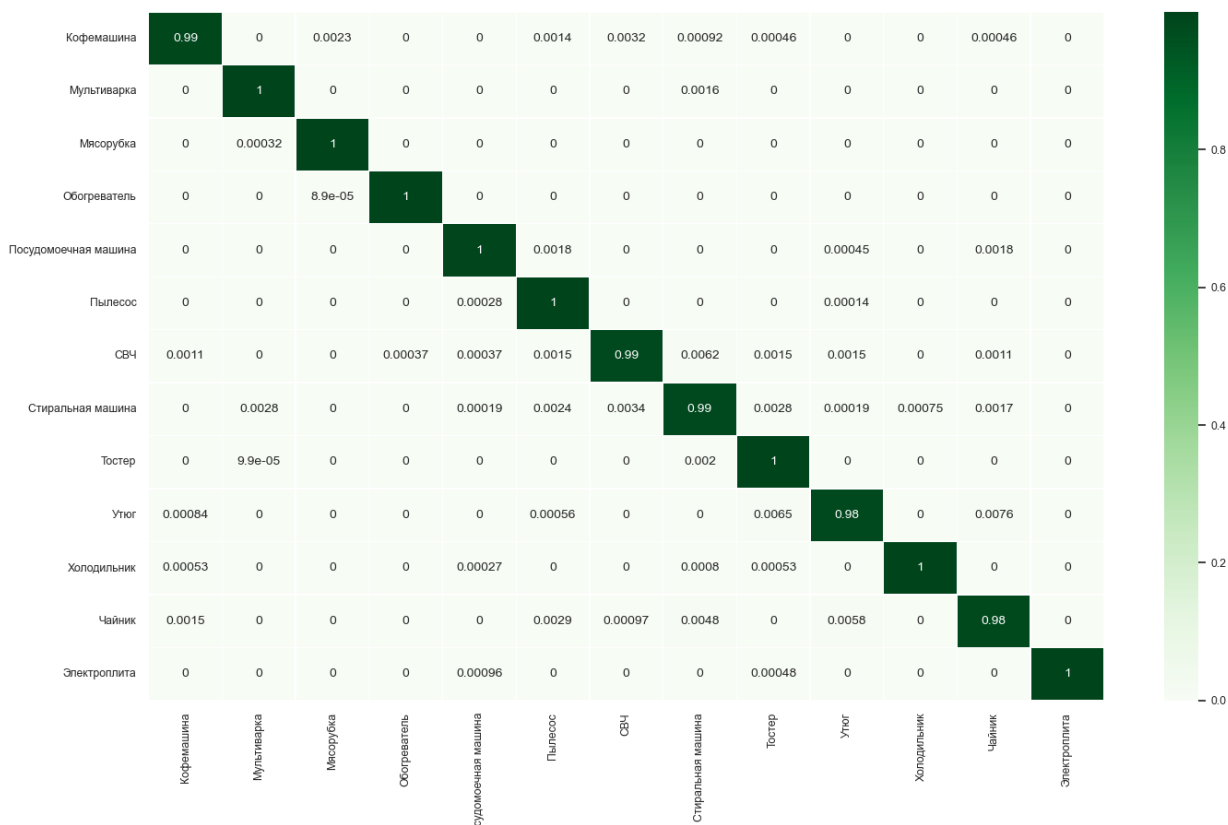


Рис. 7. Матрица запутанности модели машинного обучения распознавания устройств

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2009. — С. 248. — ISBN 978-5-913-59049-7.
2. ГОСТ 29322-92. СТАНДАРТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2005.
3. ГОСТ 13109-97. НОРМЫ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ. - М.: Стандартинформ, 2006.
4. plotly [Электронный ресурс] // Документация по библиотеке Plotly для языка программирования Python. — URL: <https://plotly.com/python/>.
5. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python. Руководство для специалистов по работе с данными. — М.: Издательский дом “Вильямс”, 2017. — 480-с.
6. Breiman, Leo. Random Forests (англ.) // Machine Learning (англ.)рус. : journal. — 2001. — Vol. 45, no. 1. — P. 5—32. — doi:10.1023/A:1010933404324.
7. scikit-learn [Электронный ресурс] // Документация по библиотеке scikit-learn для языка программирования Python. — URL: <https://scikit-learn.org>.





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одиннадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 6

*Малая энергетика, нетрадиционные  
и возобновляемые источники  
энергии, вторичные  
энергетические ресурсы*

*П.В. Хорева, С.К. Попов, И.М. Бернадинер*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД**

### **АННОТАЦИЯ**

В докладе представлены результаты разработки и исследования энергоэффективной и экологически безопасной установки высокотемпературной переработки и обезвреживания механически обезвоженных осадков сточных вод для условий станции аэрации г. Орехово-Зуево. Установка включает в себя двухкамерный реактор термического обезвреживания, состоящий из циклонной камеры с жидким шлакоудалением и камеры прокаливания газовых отходов. Энергоэффективность установки обеспечивается автотермичностью процесса обезвреживания, экологическая безопасность – выполнением режимных условий полноты обезвреживания.

Разработана математическая модель установки в среде Mathcad на уровне тепловых балансов с использованием  $\varepsilon$ - $NTU$ -метода. На основе модели выполнено исследование зависимости температурных характеристик процесса обезвреживания от эффективности подогревателя парогазовой смеси при различных значениях влажности осадков сточных вод. Определена зависимость доли испаренного потока, направляемого в циклонную камеру реактора обезвреживания, от влажности осадка и эффективности теплообменника – подогревателя парогазовой смеси.

Полученные результаты могут быть использованы при реализации предложенной энергосберегающей и экологически безопасной установки термического обезвреживания осадков сточных вод. Установлено, что предотвращенный ущерб от вреда, причиненного почвам станций аэрации Московской области, может составить 570,5 млн. р./год.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Отходы, образующиеся в результате очистки коммунальных сточных вод, представляют один из важнейших негативных факторов антропогенного воздействия не только на окружающую среду, здоровье человека, обслуживающего канализационно-очистные сооружения, но и на население в целом [1]. Необработанные осадки сточных вод (ОСВ) представляют для окружающей среды опасность, которая обусловлена их способностью аккумулировать в себе токсичные вещества, такие как тяжелые металлы (кадмий, свинец, мышьяк, ртуть и др.), органические загрязняющие вещества (полихлорированные бифенилы, пестициды) и патогенные микроорганизмы (бактерии, вирусы, паразиты).

Термические способы переработки ОСВ имеют значительные преимущества перед остальными способами: в несколько раз снижается объем перерабатываемого сырья, тяжелые металлы в составе исход-

ных ОСВ после термической переработки в основном локализируются в твердом остатке, перерабатывается практически 100 % всей органики, содержащейся в сырье, полностью уничтожается патогенная микрофлора [2].

Для сжигания осадков канализационных (городских) сточных вод применяют главным образом печи с кипящим слоем, а также многоподовые и циклонные. Печи с кипящим слоем за последние 30 – 40 лет получили наибольшее распространение не только для сжигания, но и сушки осадков. Их широко применяют в США, Германии, Франции, Японии и других странах. Примером использования очистными сооружениями технологии сжигания ОСВ в печах кипящего слоя являются три станции аэрации г. Санкт-Петербурга: Центральная станция аэрации (ЦСА), Северная станция аэрации и Юго-Западные очистные сооружения [3, 4, 5]. Утилизация и обезвреживание ОСВ на базе современных теплотехнологий обеспечивают получение вторичных продуктов, пригодных для производства строительных материалов или цемента [6]. Однако в этих технологиях применяется дорогостоящее оборудование, которое стоит десятки миллионов евро, а также используется дополнительное топливо. Технология подготовки и сжигания осадка ЦСА г. Санкт-Петербурга в значительной степени воспроизводит применяемые в других странах, например, на крупнейшем в Европе заводе в Дордрехте (Нидерланды) производительностью 90 тыс. т/год по сухому веществу [2]. В схемах некоторых других зарубежных заводов имеются принципиальные отличия, касающиеся отдельных технологических операций. Многоподовые печи для сжигания городских осадков используются в Германии, ЮАР и других странах. В частности, завод по сжиганию городских осадков с использованием четырех многоподовых печей работает на очистной станции г. Франкфурта-на-Майне (Германия) [2].

Печи циклонного типа используются на некоторых зарубежных очистных станциях для сжигания термически высушенных пылевидных осадков. Сушка осадков осуществляется за счет теплоты отходящих газов этих печей. В нашей стране технологическая линия по сжиганию осадков и илов биохимических очистных сооружений действовала на территории очистных сооружений г. Орехово-Зуево [7].

Все существующие технологии имеют свои достоинства и недостатки. Проблема эффективной утилизации или ликвидации ОСВ остается нерешенной



до настоящего времени, вследствие чего продолжается процесс накопления ОСВ на полигонах с отчуждением значительных территорий. Для решения данной актуальной проблемы авторами разработана и исследована теплотехническая схема установки термического обезвреживания ОСВ, обеспечивающая энергоэффективность и экологичность процесса.

## 2. РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

На рис. 1 представлена теплотехническая схема установки термического обезвреживания осадков сточных вод для условий станции аэрации г. Орехово-Зуево. Исходные осадки сточных вод поступают с сушилку 3, откуда высушенный осадок направляется в двухкамерный реактор термического обезвреживания. Реактор состоит из циклонной камеры 1 с жидким шлакоудалением и камеры прокаливания 2 газовых отходов. Он отапливается высушенным осадком сточных вод. Влажность высушенного осадка поддерживается на уровне, обеспечивающем автотермичность его горения.

Газовые отходы реактора термического обезвреживания используются для подогрева рециркулята и затем – для получения горячей воды в котле-утилизаторе.

Отделяющаяся при сушке парогазовая смесь пополняет поток рециркулирующего теплоносителя,

который подогревается в теплообменнике 5 и служит сушильным агентом. Часть потока рециркулирующего теплоносителя отбирается в реактор термического обезвреживания и распределяется между его камерами с целью ликвидации газообразных вредных веществ, выделившихся при сушке.

В сушилке выделяется из ОСВ поток  $V_{исп}$  парогазовой смеси, состоящий в основном из испарившейся влаги. Данный поток совместно с потоком рециркулирующей парогазовой смеси  $V_{рец}$  покидает сушилку, затем подогревается в теплообменнике 5. После этого поток  $V_{рец}$  направляется в сушилку, а поток  $V_{исп}$  – в циклонную камеру и камеру прокаливания. Часть потока  $V_{исп}$ , характеризуемая долей  $k_p$ , направляется в циклонную камеру 1, вводя в нее тепловой поток  $Q_{рец,ц}$ . Прочая часть потока  $V_{исп}$  идет в камеру прокаливания 2, вводя в нее тепловой поток  $Q_{рец,к.п}$ .

Энергоэффективность установки обеспечивается автотермичностью процесса обезвреживания, экологическая безопасность – одновременным выполнением режимных условий полноты обезвреживания: температура в циклонной камере должна быть в диапазоне завершенности (полноты) процесса обезвреживания, обеспечение жидкого шлакоудаления из циклонной камеры, время пребывания ОСВ в циклонной камере не менее 2 секунд.

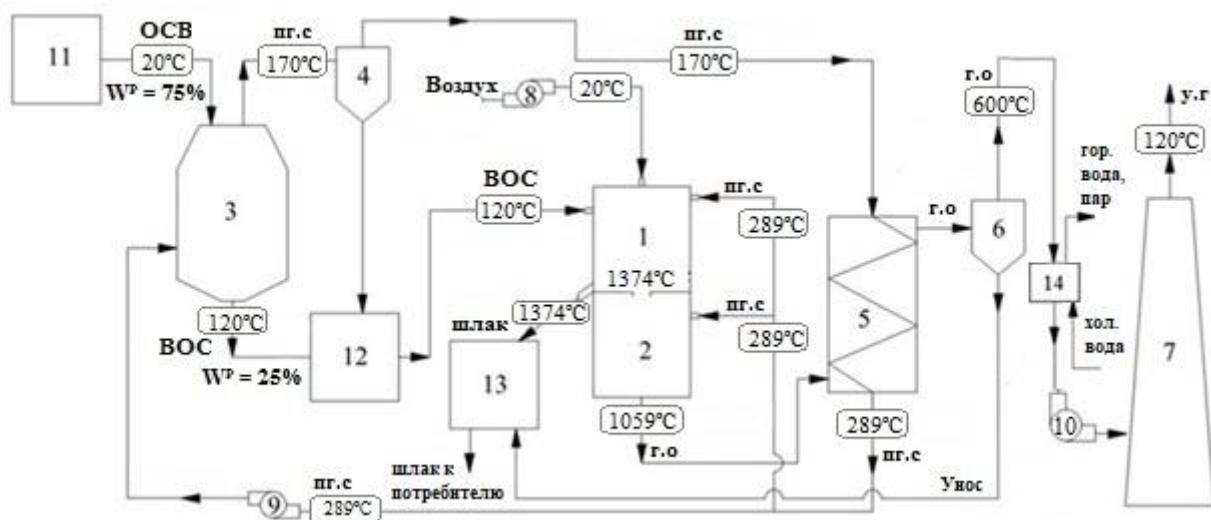


Рис. 1. Теплотехническая схема установки термического обезвреживания осадков сточных вод:

1 – циклонная камера; 2 – камера прокаливания; 3 – контактная сушилка; 4 – сепаратор; 5 – подогреватель п.г.с; 6 – фильтр; 7 – дымовая труба; 8 – вентилятор подачи воздуха; 9 – вентилятор для циркуляции п.г.с; 10 – дымосос; 11 – бункер для механически обезвоженных осадков; 12 – бункер для сухих осадков; 13 – бункер для шлака; 14 – котел-утилизатор; п.г.с – парогазовая смесь; г.о – газовые отходы; ВОС – высушенный осадок сточных вод

### 2.1. Программная реализация математической модели

Программная реализация математической модели на уровне тепловых балансов выполнена в среде Mathcad при следующих исходных данных.

Состав рабочей массы ОСВ на входе в сушилку: влажность  $W^P = 75\%$ ; зольность  $A^P = 7,45\%$ ;  $N^P = 1,63\%$ ;  $S^P = 10,65\%$ ;  $N^P = 1,11\%$ ;  $O^P = 4,10\%$ ;  $S^P = 0,06\%$ . Теплота сгорания абсолютно сухого осадка  $Q_H^P = 19548$  кДж/кг.

Производительность по исходному осадку  $P = 5000$  кг/ч.

Коэффициент расхода окислителя (воздуха) в циклонной камере  $\alpha = 1,2$ . Влагосодержание окислителя  $d_{ок} = 10$  г/(м<sup>3</sup> сухого окислителя). Температура окружающей среды  $t_{о,с} = 20^\circ\text{C}$ . Доля тепловых потерь теплообменников в окружающую среду  $k_{о,с} = 0,05$ . Температура осадка на входе в сушилку –  $20^\circ\text{C}$ . Температура осадка на выходе из сушилки –  $120^\circ\text{C}$ . Температура парогазовой смеси на выходе из

сушилки – 170°C. Удельная теплоемкость сухой массы осадка – 1,852 кДж/(кг·°C).

В процессе исследования варьировались следующие параметры:

- эффективность подогревателя парогазовой смеси  $\varepsilon \in [0,2; 0,9]$ ;
- влажность рабочей массы осадка после сушилки  $W^p \in [0; 30]\%$ ;
- доля испаренного потока, направляемая в циклонную камеру,  $k_v \in [0,1; 0,9]$ .

## 2.2. Математическая формулировка задачи

Математическое описание задачи отображается системой уравнений, включающей в себя:

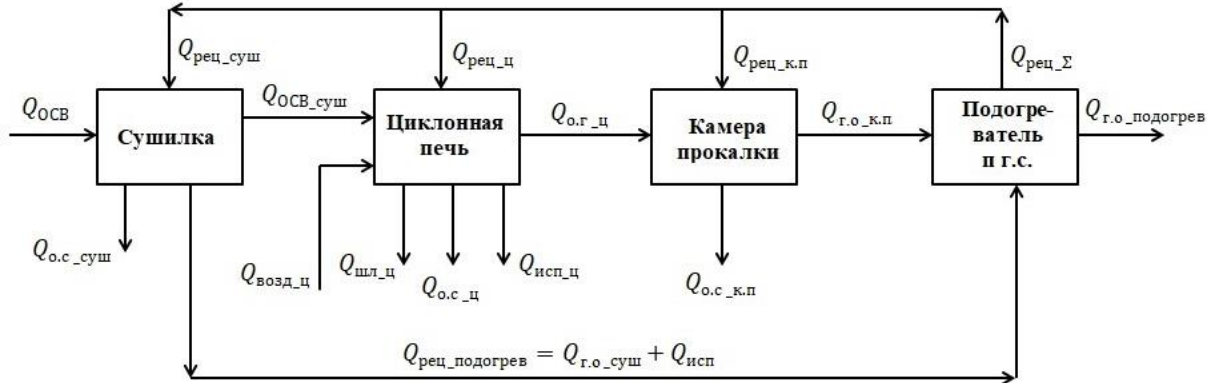


Рис. 2. Тепловые потоки в установке термического обезвреживания ОСВ

На схеме показаны следующие тепловые потоки:  $Q_{ОСВ}$  – тепловой поток с осадком на входе в сушилку;  $Q_{рециркулянт\_сушилки}$  – тепловой поток с рециркулятом (парогазовая смесь), поступающим в сушилку;  $Q_{ОСВ\_сгор}$  – физическая и химическая теплота сгорания осадка на входе в циклонную камеру;  $Q_{г.о.сушилки}$  – тепловой поток с газовыми отходами на выходе из сушилки;  $Q_{исп}$  – тепловой поток испарившейся влаги в сушилке;  $Q_{о.с.сушилки}$  – тепловой поток в окружающую среду через ограждение сушилки;  $Q_{рециркулянт\_ц}$  – тепловой поток с рециркулятом (п.г.с.), поступающим в циклонную камеру;  $Q_{исп\_ц}$  – тепловой поток, расходуемый на испарение оставшейся влаги осадка;  $Q_{г.о.ц}$  – тепловой поток с отходящими газами на выходе из циклонной камеры;  $Q_{шл\_ц}$  – тепловой поток с шлаковыми отходами на выходе из циклонной камеры;  $Q_{о.с.ц}$  – тепловой поток в окружающую среду через ограждение циклонной камеры;  $Q_{рециркулянт\_к.п}$  – тепловой поток с рециркулятом (п.г.с.), поступающим в камеру прокаливания;  $Q_{г.о.к.п}$  – тепловой поток с газовыми отходами на выходе из камеры прокаливания;  $Q_{о.с.к.п}$  – тепловой поток в окружающую среду через ограждение камеры прокаливания;  $Q_{рециркулянт\_подогрев} = Q_{г.о.сушилки} + Q_{исп}$  – тепловой поток с рециркулятом (п.г.с.), поступающий из сушилки в подогреватель парогазовой смеси;  $Q_{рециркулянт\_п.г.с.}$  – тепловой поток с рециркулятом (п.г.с.), направляемый в сушилку, циклонную камеру и камеру прокаливания ( $Q_{рециркулянт\_п.г.с.} = Q_{рециркулянт\_сушилки} + Q_{рециркулянт\_ц} + Q_{рециркулянт\_к.п}$ );  $Q_{г.о.подогрев}$  – тепловой поток с газовыми отходами на выходе из подогревателя парогазовой смеси.

- систему уравнений для расчета характеристик материального баланса процесса горения подсушенного осадка в циклонной камере;
- систему уравнений для расчета материального баланса процесса сушки осадка;
- уравнения теплового баланса элементов установки: сушилки, циклонной камеры, камеры прокаливания, подогревателя парогазовой смеси;
- температурные условия завершения (полноты) обезвреживания отходов и обеспечения жидкого шлакоудаления из циклонной камеры.

На рис. 2 представлены основные тепловые потоки в установке термического обезвреживания ОСВ.

При расчете теплотехнической схемы применен  $\varepsilon$ - $NTU$ -метод [8]. Метод основан на использовании понятия эффективности теплообменного аппарата  $\varepsilon$ , под которым понимают отношение действительной тепловой нагрузки теплообменника к предельно возможной при полном использовании разности температур горячего и холодного теплоносителей на входе в теплообменный аппарат.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ

- Разработанная модель позволяет определить:
- состав рабочей массы осадка на выходе из сушилки;
  - суммарный удельный выход продуктов сгорания;
  - процентный состав продуктов сгорания;
  - объемный расход испарившейся воды  $V_{исп}$ , м<sup>3</sup>/с;
  - объемный расход рециркулирующей парогазовой смеси  $V_{рециркулянт}$ , м<sup>3</sup>/с;
  - температуру газов на выходе из циклонной камеры  $t_{г.о.ц}$ , °C;
  - температуру газов на выходе из камеры прокаливания  $t_{г.о.к.п}$ , °C;
  - температуру газов на выходе из подогревателя парогазовой смеси  $t_{г.о.подогрев}$ , °C;
  - температуру парогазовой смеси на входе в сушилку  $t_{рециркулянт\_сушилки}$ , °C.

При этом параметрически задается число единиц переноса  $NTU$  (number of transfer units) для прямого и противоточного вариантов подогревателя парогазовой смеси.

В результате исследования получены зависимости температуры отходящих газов на выходе из циклонной камеры  $t_{o.g.ц}$  от эффективности подогревателя в диапазоне  $\varepsilon \in [0,2; 0,9]$  при различных значениях влажности высушенных ОСВ  $W^P \in [0; 30]\%$ .

Величина  $k_v$  – доли испаренного потока, направляемого в циклонную камеру, должна обеспечивать одновременное выполнение двух условий:

- 1) температура отходящих газов из циклонной камеры должна быть в диапазоне завершенности (полноты) процесса обезвреживания ОСВ:  $1250^\circ\text{C} \leq t_{o.g.ц} \leq 1400^\circ\text{C}$  [9, 10];
- 2) реализация жидкого шлакоудаления из циклонной камеры. Так как температура плавления золы составляет  $1270^\circ\text{C}$  [11, 12], то второе условие сводится к  $t_{o.g.ц} \geq 1270^\circ\text{C}$ .

Следовательно, два условия можно объединить в одно:

$$1270^\circ\text{C} \leq t_{o.g.ц} \leq 1400^\circ\text{C}.$$

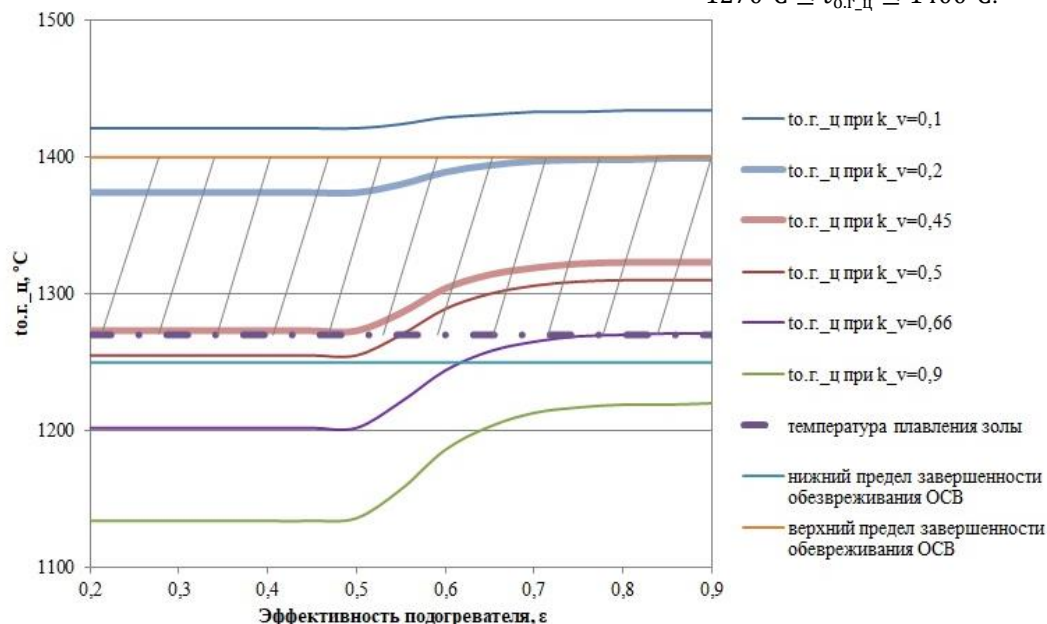


Рис. 3. Зависимость  $t_{o.g.ц}$  от эффективности противоточного подогревателя парогазовой смеси ( $W^P = 25\%$ )

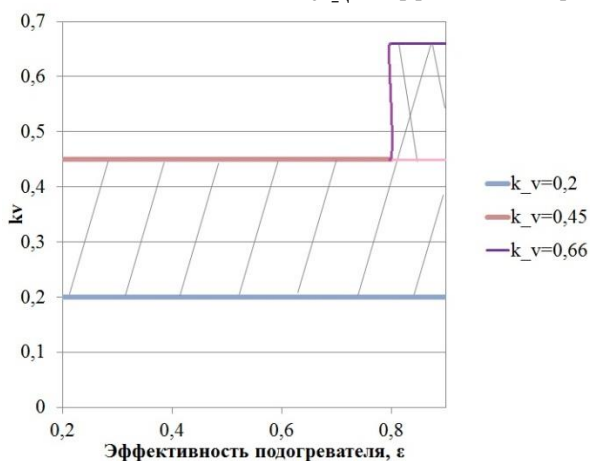


Рис. 4. Зависимость доли испаренного потока  $k_v$  от эффективности противоточного теплообменника

На рис. 3 представлены зависимости  $t_{o.g.ц}$  от эффективности противоточного подогревателя при различных  $k_v$ .

Исследование приводит к следующим результатам:

- $k_v \in [0,2; 0,45]$  при  $\forall \varepsilon$ ; (1)
- $k_v \in [0,45; 0,66]$  при  $\varepsilon \geq 0,8$ . (2)

Данные значения получены для влажности высушенных осадков  $W^P = 25\%$ . Величина  $W^P = 25\%$  выбрана на основе данных, опубликованных в [13].

На рис. 4 показаны зависимости доли испаренного потока  $k_v$  от эффективности противоточного теплообменника – подогревателя рециркулирующей парогазовой смеси.

Аналогичные данные получены для прямоточного теплообменника:

- $k_v \in [0,2; 0,48]$  при  $\forall \varepsilon$ ; (3)
- $k_v \in [0,48; 0,65]$  при  $\varepsilon \geq 0,6$ . (4)

Границы интервала  $k_v$ , приведенного в (1), обозначим через  $k'_v$  и  $k''_v$ :  $k'_v = 0,2$  и  $k''_v = 0,45$ . Зависимости  $k'_v$  и  $k''_v$  от влажности высушенных ОСВ приведены на рис. 5.

Выделенная на рис. 5 область может быть использована при выборе значений  $k_v$  в зависимости от влажности ОСВ  $W^P$  при любых значениях эффективности теплообменника.

Так как полученные значения  $k'_v$  для прямотока и  $k''_v$  для противотока практически равны (то же и для значений  $k''_v$ ) – схема движения в теплообменном аппарате для данного параметра значения не имеет.

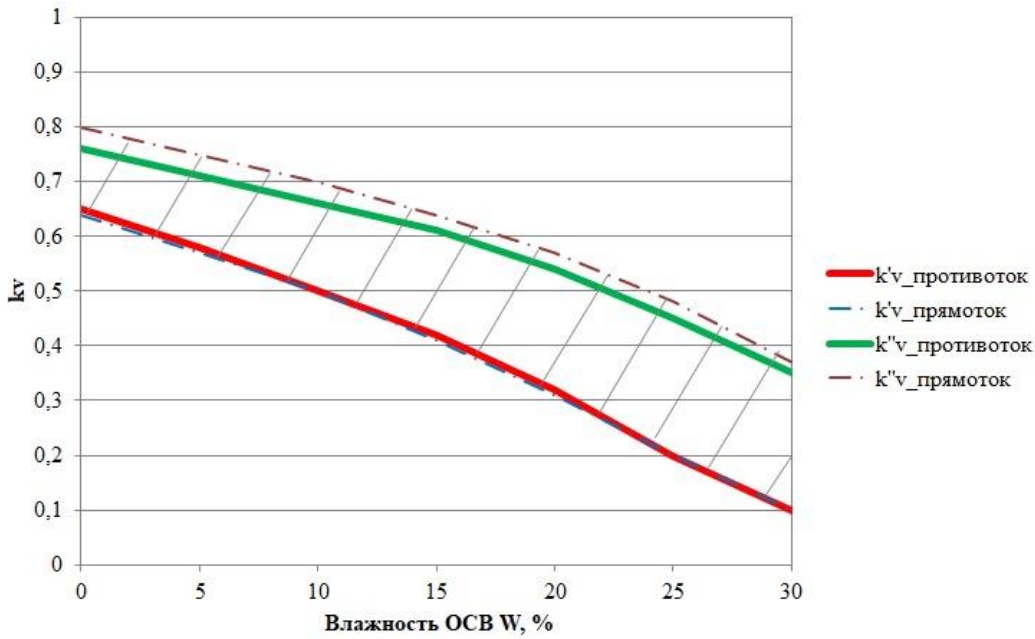


Рис. 5. Диапазон значений  $k_v$  в случае прямоточного и противоточного теплообменника

Принято решение рассматривать в расчетах и исследованиях значение доли испаренного потока, направляемого в циклонную камеру,  $k_v = 0,2$ . Чем меньше  $k_v$ , тем выше температура в циклонной камере, а значит лучше условия для обезвреживания ОСВ (рис. 3). На рис. 6, 7, 8 представлены графические зависимости температуры газов на выходе из камеры прокаливания, температуры газов на выходе из подогревателя парогазовой смеси и температуры парогазовой смеси на входе в сушилку от эффективности подогревателя парогазовой смеси (в случае прямотока и противотока).

Как видно из графиков, при эффективности подогревателя  $\epsilon \in [0,2; 0,4]$  (в случае прямотока) и  $\epsilon \in [0,2; 0,5]$  (в случае противотока) температуры имеют постоянные значения. В диапазоне  $\epsilon \in [0,4; 0,55]$  (в случае прямотока) и  $\epsilon \in [0,5; 0,7]$  (в случае противотока) температуры растут. В диапазоне  $\epsilon \in [0,55; 0,9]$  (в случае прямотока) и  $\epsilon \in [0,7; 0,9]$  (в случае противотока) температуры вновь выходят на постоянный уровень.

Рекомендуется использование противоточного теплообменника, что позволит использовать теплообменники меньших габаритов по сравнению с прямоточными. Режимные параметры, представленные на рис. 1, получены для значений влажности высушенных ОСВ  $W^p = 25\%$ , доли испаряемого потока  $k_v = 0,2$ , эффективности противоточного теплообменника  $\epsilon = 0,45$ .

На рис. 9 представлена зависимость числа единиц переноса  $NTU$  для противоточного теплообменника от его эффективности.

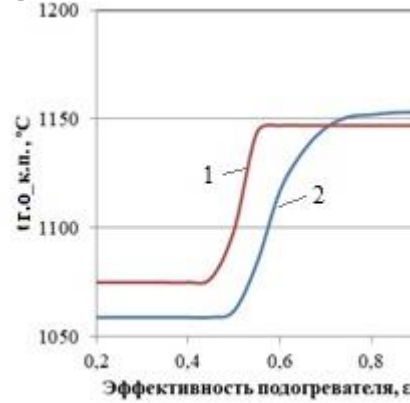


Рис. 6. Зависимость температуры газов на выходе из камеры прокаливания  $t_{г.о.к.п}$  от эффективности подогревателя: 1 – прямоточного, 2 – противоточного

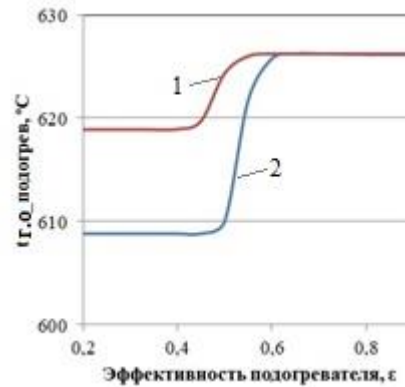


Рис. 7. Зависимость температуры газов на выходе из подогревателя парогазовой смеси  $t_{г.о.подогрев}$  от эффективности подогревателя: 1 – прямоточного, 2 – противоточного



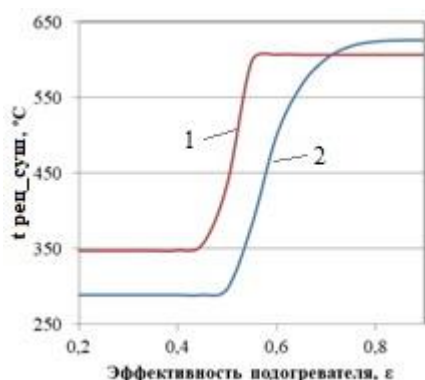


Рис. 8. Зависимость температуры парогазовой смеси на входе в сушилку  $t_{\text{pec\_суш}}$  от эффективности подогревателя: 1 – прямоточного, 2 – противоточного

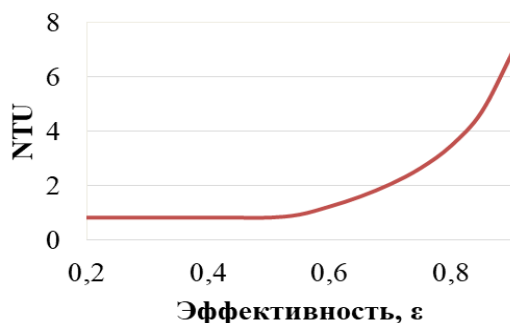


Рис. 9. Зависимость  $NTU$  от эффективности противоточного теплообменника

Посредством методики исчисления вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды [14], оценен вред, причиненный почвам Московской области: более 1,703 триллиона рублей. С учетом производительности предлагаемой авторами установки 5 т/ч, а также времени работы 8040 часов в год, предотвращенный ущерб может составить 570,5 млн. р./год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана новая энергоэффективная и экологически безопасная теплотехническая схема установки для высокотемпературной переработки и обезвреживания механически обезвоженных осадков сточных вод с глубоким использованием химически связанной теплоты органических веществ и с выпуском расплава минеральных веществ. Предложенная установка позволяет предотвратить выброс в атмосферу летучих токсичных органических веществ и тяжелых металлов, обеспечить максимальное сокращение затрат дополнительного органического топлива на процесс обезвреживания ОСВ.

Разработана и исследована математическая модель предложенной теплотехнической схемы обезвреживания ОСВ. Модель позволяет определить режимные параметры установки, обеспечивающие автотермичность процесса термического обезвреживания ОСВ с одновременным выполнением усло-

вий завершенности (полноты) обезвреживания отходов и обеспечения жидкого шлакоудаления из циклонной камеры.

Полученные результаты могут быть использованы при реализации предложенной энергосберегающей и экологически безопасной установки термического обезвреживания осадков сточных вод.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Русаков, Н.В.** Отходы, окружающая среда, человек / Н.В. Русаков, Ю.А. Рахманин. – М.: Медицина, 2004. – 230 с.
2. **Solmaz, S.** Thermische Entsorgung von Klärschlamm // Korrespond. Abwasser. – 1998. – 45. – № 10. – S. 1886-1888, 1890-1899.
3. **Энциклопедия г. Санкт-Петербурга.** Заводы по сжиганию осадка сточных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.ensspb.ru/object/2806264025?lc=ru> (дата обращения 14.05.2022).
4. **ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»** [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.vodokanal.spb.ru/> (дата обращения 14.05.2022).
5. **Администрация г. Санкт-Петербурга** [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://gov.spb.ru/gov/otrasl/ingen/news/107502/> (дата обращения 14.05.2022).
6. **АО «Мосводоканал»** [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.mosvodokanal.ru/sewage/newtechnologies/precipitationdisposal.php> (дата обращения 14.05.2022).
7. **Бернадинер, М.Н.** Термическое обезвреживание промышленных органических отходов / М.Н. Бернадинер, В.В. Жижин, В.В. Иванов // Экология и промышленность России. – 2000. – №4. – С. 17-21.
8. **Попов, С.К.** Методы разработки и исследования высокотемпературных процессов и установок: учебное пособие / С.К. Попов. – М.: Издательство МЭИ, 2021. – 76 с.
9. **Хорева, П.В.** Исследование условий завершенности процесса обезвреживания осадков сточных вод / П.В. Хорева, С.К. Попов, И.М. Бернадинер, В.А. Екимова // Промышленная энергетика. – 2021. – № 11. – С.48–56.
10. **Хорева, П.В.** Повышение эффективности процесса обезвреживания осадков сточных вод / П.В. Хорева, С.К. Попов, И.М. Бернадинер, В.А. Екимова // Промышленная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 52–57.
11. **Цветков, М.В.** О поведении золы осадка сточных вод в условиях высокотемпературной переработки / М.В. Цветков, Д.Н. Подлесный, В.М. Фрейман, Ю.Ю. Цветкова, М.В. Салганская, И.В. Зюкин, А.Ю. Зайченко, Е.А. Салганский // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93. – № 6. – С. 873–880.
12. **Бернадинер, М.Н.** Теплотехнические характеристики осадков сточных вод / М.Н. Бернадинер, М.С. Минц, И.С. Туровский. – М.: Издательство НИИТЭХИМ, 1974. – 18 с.
13. **Бернадинер, М.Н.** Методы испытаний установок огневого обезвреживания сточных вод / М.Н. Бернадинер, А.П. Шурыгин. – М.: Издательство НИИТЭХИМ, 1974. – 50 с.
14. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 08.07.2010 г. №238 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (с изменениями на 18.11.2021 г.)».

А.А. Чепига<sup>1</sup>, Ю. Али<sup>1</sup>, Е.О. Столяров<sup>1</sup>, А.Р. Золотов<sup>1</sup>, Н.А. Травкин<sup>1</sup>, Т.К. Масленников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 3-УРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена анализу 3-уровневого преобразователя в режимах активного и Венского выпрямителя. В данной работе предлагается универсальная система управления для приведённых выше режимов и метод балансировки напряжения в нейтральной точке. Используя разработанную систему управления, можно оценить величину потерь мощности преобразователя и выбрать оптимальный режим работы. Результаты моделирования, полученные с помощью модели Simulink, и экспериментальные результаты, полученные на испытательном стенде ветрогенератора мощностью 14 кВт, 12000 об/мин, доказывают, что предлагаемый способ устраняет дисбаланс напряжения в нейтральной точке и использует функцию переключения между режимами в случае аварийных ситуаций. Результирующие потери мощности для основных режимов работы преобразователя были примерно равны, что позволяет использовать его с одинаковой эффективностью как в режиме активного, так и Венского выпрямителя.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время 3-уровневые преобразователи все чаще используются в источниках бесперебойного питания и электростанциях на возобновляемых источниках энергии благодаря высоким требованиям к эффективности и качеству выходного сигнала этих устройств [1].

Основным преимуществом 3-уровневой схемы с фиксированной нейтралью является низкий коэффициент гармоник выходного тока, что позволяет значительно упростить выходной фильтр или полностью отказаться от него. Транзисторы и диоды преобразователя работают при половинном напряжении звена постоянного тока, поэтому он может быть построен на переключателях меньшего класса напряжения (например, 600 В вместо 1200 В), характеризующихся низким уровнем потерь и более высокой плотностью тока. Благодаря этому использование данной топологии позволяет значительно повысить эффективность преобразования на высоких частотах [2].

Снижение уровня гармонических искажений достигается за счет увеличения частоты переключения  $f_{sw}$ , что в свою очередь приводит к увеличению динамических потерь [3]. Многоуровневая схема позволяет решить эту проблему при относительно низком значении  $f_{sw}$  и, кроме того, снизить требования

к синусоидальному фильтру, размеры и стоимость которого вносят значительный вклад в производительность всего изделия. Еще одним преимуществом рассматриваемой топологии является низкий уровень излучаемых электромагнитных помех, что особенно важно для таких приложений как источники бесперебойного питания.

Для данной топологии преобразователей возможны следующие реализации схемы: с подключением к нейтральной точке через диоды и с T-образным мостом. Разница между двумя конструкциями заключается в том, что в модуле с T-образным мостом линия питания 0 В подключена к выходу модуля транзисторами. Это обеспечивает большую гибкость при реализации ШИМ, а возможность одновременного замыкания всех ключей, соединяющих линии питания с нагрузкой, может использоваться при аварийном отключении [4].

Преимущества этой топологии стали причиной её активного использования в качестве двунаправленного преобразователя для ветроустановок, пример которого приведён на рис. 1.

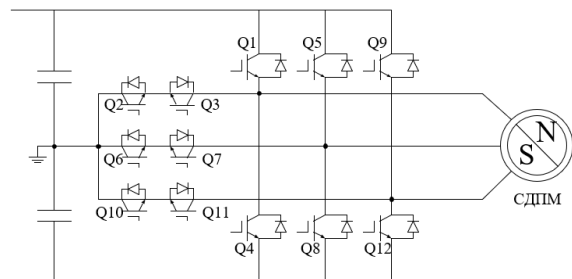


Рис. 1. Схема двунаправленного 3-уровневого преобразователя

Рассматриваемая система состоит из синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) и двунаправленного преобразователя, который передает энергию между электрической машиной и звеном постоянного тока (ЗПТ).

Инвертор в этой схеме работает как повышающий преобразователь. Управляя амплитудой и фазой тока обмотки машины, он поддерживает задан-



ное напряжение ЗПТ. Стоит отметить, что преобразователь может работать в 2 режимах выпрямления: активном и Венском.

Основным отличием этих режимов является количество рабочих ключей: в режиме активного выпрямителя работают все 4 ключа в Т-мосте (Q1–Q4), а в венском выпрямителе только 2 ключа (Q2–Q3), как показано на рисунке 2.

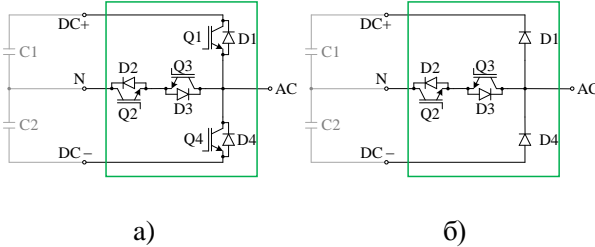


Рис. 2. Схема Т-образного моста: а) в режиме активного выпрямителя; б) в режиме Венского выпрямителя

Сравнение преимуществ и недостатков этих моделей представлено в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры для режимов работы 3-уровневого преобразователя

Параметр	Активный выпрямитель	Венский выпрямитель
Направление потока энергии	двунаправленный: энергия передается от сети к нагрузке или в противоположном направлении	прямой: энергия передается от сети к нагрузке
Количество управляемых IGBT	12	6
Количество диодов	12 (в одном комплекте с транзисторами)	6
Напряжение на конденсаторах		$V_{ном}/2$
Система управления	Векторная с различными модификациями ШИМ	

Как видно из таблицы, использование в Венском выпрямителе 6 ключей вместо 12 позволяет снизить значение индуктивностей дросселей при том же качестве сглаживания, улучшить массогабаритные показатели, а также упростить систему управления за счет уменьшения количества рабочих переключателей. Однако по мере увеличения мощности преобразователя увеличивается емкость ЗПТ и его стоимость. Также важным является факт оценки потерь мощности в модулях для этих режимов работы.

В данной работе рассматриваются как проблемы управления преобразователем в режиме выпрямителя, так и проблемы баланса напряжения на конденсаторах звена постоянного тока. Для решения было предложено применить классическую векторную систему управления для 2 основных режимов работы, а также ШИМ с компенсацией дисбаланса напряжения звена постоянного тока. С помощью разработанной универсальной системы управления для данного преобразователя был проведен анализ

потерь мощности, который позволил выбрать оптимальный режим работы. А также был уменьшен коэффициент гармонического искажения напряжения ветрогенераторной установки, что позволило снизить потери в распределительных электрических сетях.

## 2. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

По аналогии с классическим активным выпрямителем, для схемы на рис.2 можно записать следующее выражение:

$$V_1 = V_2 + IR + L \frac{dI}{dt}, \quad (1)$$

где  $R$  - сопротивление обмотки статора генератора;

$L$  - индуктивность обмотки статора генератора.

Для вращающейся системы координат  $dq$ , связанной с вектором напряжения входной сети, можно записать уравнения в виде

$$\begin{cases} V_1 = V_{2d} + I_d R + L \frac{dI_d}{dt} - \omega L I_q \\ 0 = V_{2q} + I_q R + L \frac{dI_q}{dt} + \omega L I_d \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\omega = 2\pi f = 100\pi$  (для 50 Гц) – угловая частота сети;

$I_d$  – активная составляющая входного тока;

$I_q$  – реактивная составляющая входного тока.

Для того чтобы характер токов инвертора был активным, необходимо поддерживать  $I_q$  равным нулю.

Кроме того, схема должна независимо от тока нагрузки поддерживать заданное значение  $V_{dc}$ . Выполняющая эти функции система управления силовым инвертором приведена на рис.3:

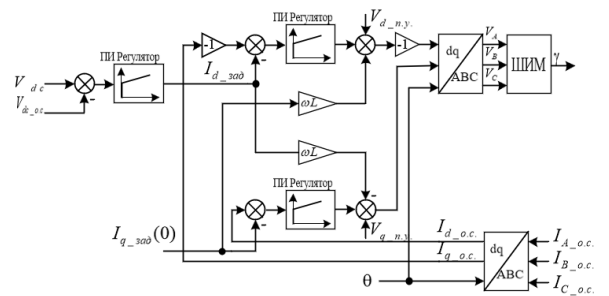


Рис. 3. Структурная схема системы регулирования 3-уровневого преобразователя

Данная система регулирования двухконтурная. Она содержит внешний контур напряжения и внутренний контур тока (контур вектора тока).

Сигнал с выхода регулятора напряжения подается на задание  $d$ -составляющей тока инвертора, а задание  $q$ -составляющей тока принимается равным 0. При этом обеспечивается поддержание заданного

$V_{dc}$  и активный характер тока инвертора по отношению к сети.

Схема имеет три особенности:

- Необычное построение вычитающих блоков на входе регуляторов тока. В них сигнал задания тока вычитается из сигнала обратной связи, а не наоборот, как обычно бывает. Это связано с тем, что при координатных преобразованиях положительным считается фазный ток, вытекающий из источника напряжения. Для преобразования  $ABC$  в  $dq$  источником является сеть, а для обратного преобразования,  $dq$  в  $ABC$ , источником является инвертор. Так как фазные токи с точки зрения сети и инвертора противоположны, требуется инвертирование задания и обратной связи в контуре тока, что и реализуется в структуре вычитающих блоков на входе его регуляторов.
- Компенсация перекрёстных связей в контурах тока делается с учётом формул (2) и инверсии, вытекающей из особенности, описанной выше.
- Для улучшений динамических свойств системы используется предупреждение. Для этого значения входных напряжений переводят в оси  $dq$  и суммируют с выходом регуляторов токов.

Данная система регулирования актуальна как для активного, так и для Венского выпрямителя лишь с одной небольшой особенностью. Как будет показано позже, отличие лишь в количестве работающих ключей преобразователя.

### 3. ОПИСАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА ШИМ И БАЛАНСИРОВКИ НАПРЯЖЕНИЙ

#### 3.1. Расчет скважностей

Для 3-уровневого преобразователя возможны различные способы формирования ШИМ, начиная синусоидальной и заканчивая классической Векторной ШИМ [5].

Векторная ШИМ максимально полно использует запас напряжения звена постоянного тока, что на 15% больше, чем при синусоидальной ШИМ. Несмотря на то, что снижаются динамические потери в инверторе, применение векторной ШИМ не является залогом успеха, так как у неё имеется один большой недостаток. Это невозможность реализации заданных векторов на границах секторов из-за влияния «мертвого» времени [6].

Этот недостаток векторной ШИМ заметен на малых амплитудах напряжения и связан с наличием малых скважностей, что и требовалось исключить в новом методе формирования напряжения.

Разработанный метод основан на вывешивании фазных потенциалов между отрицательной и положительной шиной звена постоянного тока. Фазные потенциалы получаются при преобразовании вектора напряжения из полярных координат в трехфазную систему или в системах векторного управления

во время обратных фазных преобразований из двухфазной системы в трехфазную. Если ко всем полученным значениям фазных потенциалов прибавить или вычитать константу, то значения линейных напряжений не изменятся, так как они представляют собой разность фазных потенциалов. Необходимая прибавка вычисляется исходя из максимальной разности потенциалов между фазами:

$$\begin{cases} \varphi'_a = \varphi_a + \varphi_\Delta \\ \varphi'_b = \varphi_b + \varphi_\Delta \\ \varphi'_c = \varphi_c + \varphi_\Delta \\ \varphi_\Delta = \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (3)$$

где  $V_{dc}$  – общее напряжение ЗПТ.

Полученные потенциалы переводятся в скважности по стойкам инвертора с помощью выражения:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{0.5 \cdot \varphi'}{V_{dc\_l}}, \varphi' < V_{dc\_l} \\ \frac{0.5 \cdot (\varphi' - V_{dc\_l})}{V_{dc\_h}} + 0.5, \varphi' \geq V_{dc\_l} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $V_{dc\_l}$  и  $V_{dc\_h}$  – напряжение нижнего и верхнего конденсаторов ЗПТ соответственно.

Данный метод ШИМ имеет ту же эффективность по использованию напряжения звена постоянного тока, что и векторная ШИМ, но за один период коммутруются все ключи инвертора. Это увеличивает динамические потери в ключах, но система приобретает определенные преимущества.

Векторы напряжения с амплитудой близкой к нулю реализуются при скважности 50%, что обеспечивает линейную зависимость между скважностями и линейными напряжениями двигателя. Нелинейности, как и в случае с синусоидальной и векторной ШИМ, возникает только при смене знака тока фазы вследствие влияния «мертвого» времени. Борьба с этим эффектом можно либо программно, анализируя знак тока, либо на аппаратном уровне, используя программируемую логическую матрицу для анализа разницы между задающим сигналом и воспроизведенным инвертором.

#### 3.2. Правила коммутации

В данной статье для 3-уровневого преобразователя рассматривается традиционный способ формирования ШИМ-сигнала, основанный на сравнении основного синусоидального и опорного высокочастотного напряжения треугольной формы. Отличие 3-уровневого управления состоит в использовании двух треугольных сигналов, сдвинутых относительно нулевого потенциала.

Таким образом, определяются ШИМ-алгоритм и набор правил, которые должны выполняться в любой момент времени для работы в режиме активного выпрямителя:

- одновременно коммутуются не более двух ключей;

- только два соседних транзистора могут быть включены одновременно;
- IGBT Q1 и Q3, а также Q2 и Q4 коммутируются в инверсном режиме.

Более глубокий анализ ситуации (объяснения см. в AN11001 [4]) обеспечивают еще два правила:

- начало рабочего цикла: внутренние транзисторы (Q2 или Q3) включаются первыми, внешние (Q1 или Q4) — после них;
- конец рабочего цикла: внешние транзисторы (Q1 или Q4) выключаются первыми, внутренние (Q2 или Q3) — после них.

В свою очередь для режима Венского выпрямителя не требуются особые правила, так как Q1 и Q4 будут постоянно закрыты.

Хотя некоторые ограничения, на первый взгляд, и не имеют никакого смысла (например, включение IGBT при отсутствии проводимости в цепи), их реализация необходима для унификации алгоритма управления в технической документации [7].

### 3.3. Балансировка напряжений

Одним из недостатков топологии является потенциальный дисбаланс напряжения двух конденсаторов ЗПТ, т.е. дисбаланс в нейтральной точке между верхним и нижним напряжением конденсатора. Обычно это вызвано дефектами (например, несоответствием емкости, нелинейными нагрузками и т.д.) внутри преобразователя и/или нагрузки. На стороне постоянного тока такой дисбаланс значительно увеличил бы напряжение, создаваемое на конденсаторах, а оно в свою очередь потенциально может привести к отказу конденсатора или полупроводникового устройства. На стороне переменного тока непрерывный дисбаланс постоянного тока приведет к появлению гармоник тока четного порядка. Эти индуцированные гармоники потенциально могут усугубить дисбаланс напряжения, снизить качество электроэнергии и производительность машины.

Существует множество методов устранения дисбаланса, однако самым распространенным является применение регулятора потенциала нейтральной точки, встроенного в блок ШИМ.

В данной статье применяется пропорциональный регулятор, который следующим образом будет влиять на разработанный алгоритм ШИМ:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi'_a = \varphi_a + \varphi_\Delta \\ \varphi'_b = \varphi_b + \varphi_\Delta \\ \varphi'_c = \varphi_c + \varphi_\Delta \\ \varphi_\Delta = \frac{V_{dc}}{2} - K_p \cdot (V_{dc_h} - V_{dc_l}) \end{array} \right. , \quad (5)$$

где  $K_p$  – пропорциональный коэффициент регулятора.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предложенный алгоритм разработан в MATLAB/Simulink для режимов активного и венского выпрямителя. Для качественной проверки системы был установлен начальный дисбаланс напряжений конденсаторов  $V_{dc_l}$  и  $V_{dc_h} - 50$  и  $100$  В соответственно.

Был исследован синхронный генератор с постоянными магнитами со следующими параметрами, представленными в таблице 2:

Таблица 2. Основные параметры для СДПМ и 3-уровневого преобразователя

Параметр	Значение	Величина
Число полюсов	6	
Номинальная мощность	14	кВт
Сопротивление статора	0.03	Ом
Индуктивность статора по оси d	47.7	мкГн
Индуктивность статора по оси q	46.6	мкГн
Номинальный среднеквадратичный ток	300	А
Потокосцепление постоянных магнитов	0.047	Вб
Момент инерции	0.179	кг м <sup>2</sup>
Максимальная скорость	12367	об/мин
Минимальная скорость	8885	об/мин
Напряжение ЗПТ	270	В
Ёмкость ЗПТ	1500	мкФ
Частота ШИМ	6400	Гц

При синтезировании системы управления преобразователем, настройка контура тока производилась на технический оптимум, а контур напряжения ЗПТ – на симметричный оптимум.

Результаты моделирования для основных режимов работы преобразователя (Венский и активный выпрямитель) представлены на рисунках 4 и 5. Как видно из графиков, система до 0.17 секунды заряжает и балансирует конденсаторы ЗПТ, после чего устанавливает номинальный ток нагрузки 40 А. Система обрабатывает практически идентично режимы работы активного и Венского выпрямителя, что позволяет безболезненно для объекта применять функцию переключения между режимами в случае возникновения аварийных ситуаций.

Также стоит отметить, что в результате оценки потерь мощности для идеального случая ( $\cos \varphi = 1$ ) транзисторы, отсутствующие в венском выпрямителе, не проводят ток. Следовательно, потери для обоих режимов будут одинаковыми. Однако нужно понимать, что выпрямитель не позволит системе перейти в режим локального генератора и в реальности потери будут меньше.

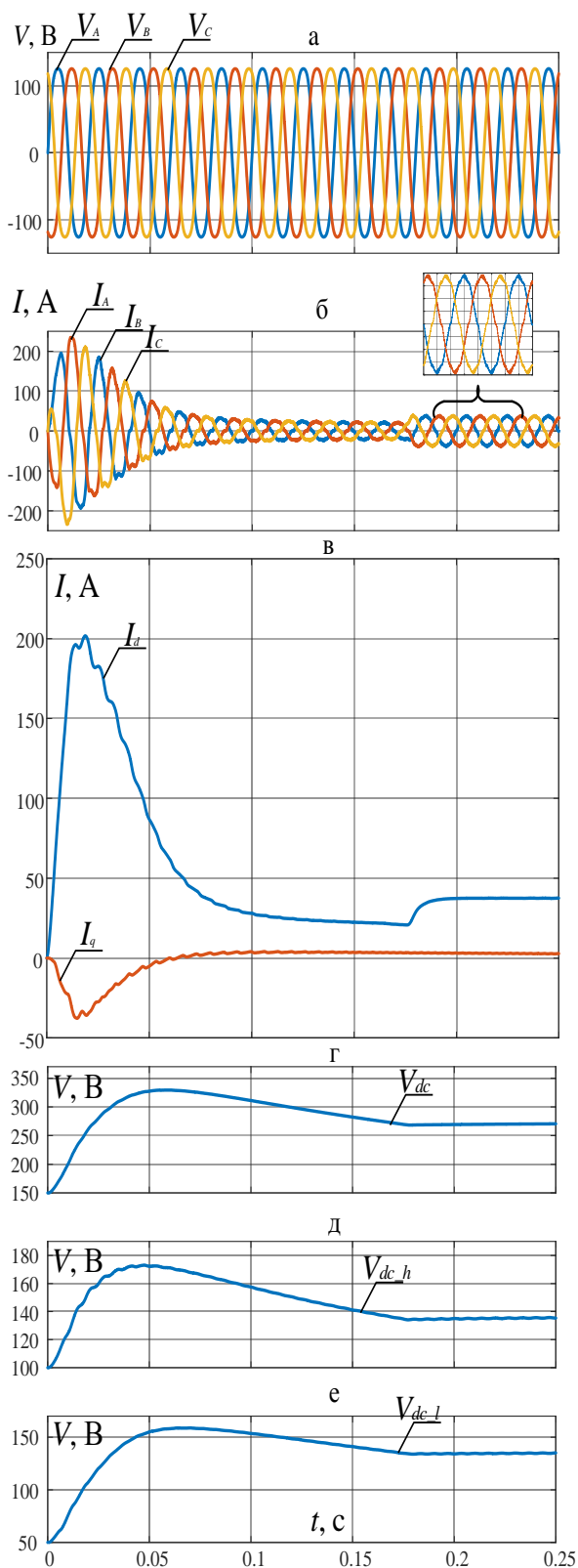


Рис. 4. Переходные процессы а) входных напряжений; б) входных токов; в) токов в осях dq; г) суммарное напряжения ЗПТ; д) напряжения верхнего конденсатора ЗПТ; е) напряжения нижнего конденсатора ЗПТ в режиме Венского выпрямителя

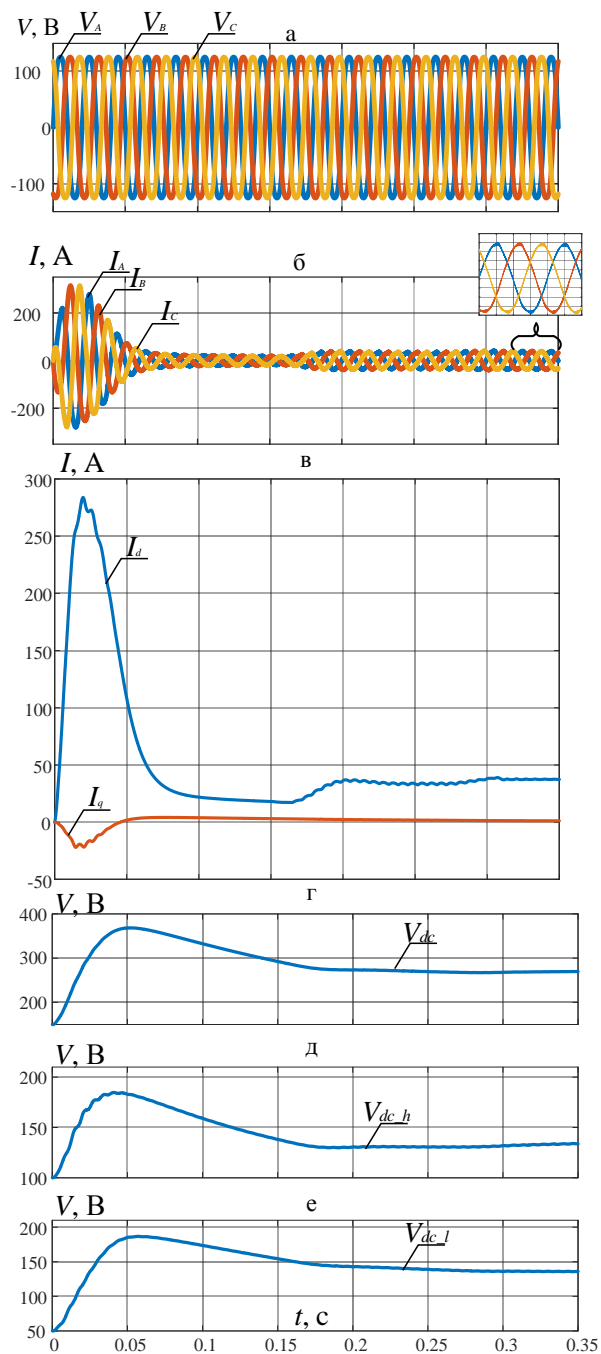


Рис. 5. Переходные процессы а) входных напряжений; б) входных токов; в) токов в осях dq; г) суммарное напряжения ЗПТ; д) напряжения верхнего конденсатора ЗПТ; е) напряжения нижнего конденсатора ЗПТ в режиме активного выпрямителя

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлено исследование системы управления и балансировки нейтральной точки ЗПТ для рассматриваемой топологии преобразователя ветрогенераторных установок, выводы применимы ко всем 3-уровневым преобразователям, используемым в высокоскоростных приводах.

С помощью полученных результатов моделирования, можно сделать вывод, что предлагаемая система управления и разработанный метод ШИМ позволяют:

1) Обеспечить высокую энергоэффективность с точки зрения балансировки и гармонического состава выходного тока в условиях нагрузки;

2) Уменьшить коэффициент гармонического искажения при меньшей частоте ШИМ, что снижает динамические потери в ключах, индуктивность, а соответственно и массо-габаритные показатели дроселя;

3) Применять ключи меньшего класса напряжения, характеризующихся низким уровнем потерь и более высокой плотностью тока;

4) Использовать функцию переключения между режимами в случае аварийных ситуаций, позволяющую увеличить срок службы преобразователя в случае выхода из строя одного полумоста.

Предложенное решение позволяет снизить уровень колебаний активной мощности ветрогенератора, обусловленных в большей степени эффектом затенения башни, примерно на порядок по сравнению с использованием классического 2-уровневого преобразователя, что, безусловно, положительно сказывается на качестве сетевого напряжения с точки зрения соответствия его международным требованиям. Также при помощи разработанной системы управления был уменьшен коэффициент гармонических искажений напряжения, что позволило снизить потери электроэнергии в распределительных электрических сетях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. H. Do and A. Anuchin, "An Improved SVPWM Strategy for Three-Level Neutral Point Clamped Converter Capacitor Voltage Balancing," 2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED48848.2020.9069550.
2. Y. Kazemirova, A. Anuchin, D. Shpak and Y. Safonov, "Analytical Solution to Voltage Balance Control in a 3-Level Neutral-Point-Clamped Inverter," 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/RTUCON.2018.8659856.
3. A. Anuchin, D. Shpak, M. Gulyaeva, D. Aliamkin, A. Zharkov and Y. Vagapov, "A PWM Strategy for the Minimisation of Losses in a 3-level T-type Voltage Source Inverter," 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2018, pp. 703-708, doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445367.
4. C. Li et al., "A Modified Neutral Point Balancing Space Vector Modulation for Three-Level Neutral Point Clamped Converters in High-Speed Drives," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 910-921, Feb. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2835372.
5. J. Chivite-Zabalza, P. Izurza-Moreno, D. Madariaga, G. Calvo and M. A. Rodríguez, "Voltage Balancing control in 3-Level Neutral-Point Clamped Inverters Using Triangular Carrier PWM Modulation for FACTS Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 10, pp. 4473-4484, Oct. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2237415.
6. V. Guennegues, B. Gollentz, F. Meibody-Tabar, S. Rael and L. Leclere, "A converter topology for high speed motor drive applications," 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, pp. 1-8.
7. F. Sebaaly, H. Vahedi, H. Y. Kanaan, N. Moubayed and K. Al-Haddad, "Design and Implementation of Space Vector Modulation-Based Sliding Mode Control for Grid-Connected 3L-NPC Inverter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 12, pp. 7854

А.А. Валинеева, С.К. Попов

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОДИНОЧНОЙ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ

### АННОТАЦИЯ

В докладе представлена одномерная математическая модель сушки и пиролиза твердой частицы в высокотемпературном газовом потоке, состоящая из уравнений баланса массы, энергии с учетом выхода летучих и наличия трех фаз, составляющих частицу: твердой, жидкой и газообразной. Исследован процесс сушки частицы, также сопряженный процесс ее нагрева и сушки. Выполнена оценка времени сушки и пиролиза. Для решения поставленных задач использован метод контрольного объема.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Биомасса – это возобновляемый источник энергии, который приобретает в таком качестве все большее распространение. Прямое использование биомассы сопряжено с рядом трудностей, за счет высокой влажности, низкой плотности химической энергии, сложности в хранении и транспортировке. В связи с этим целесообразна ее предварительная тепловая обработка методом высоко- или низкотемпературного пиролиза, газификации, при этом нивелируются основные недостатки, а сама биомасса становится основой нового вида топлива – продуктов пиролиза. Тип и количество продуктов пиролиза зависят от температуры процесса, скорости нагрева, размера частиц и возможного содержания катализатора. Высокая скорость нагрева и короткое время пребывания образующихся газов в реакторе максимизируют общее количество жидких продуктов [1, 2]. Низкая температура процесса, а также медленный нагрев исходного сырья приводят к получению высококачественного угля, такой процесс еще часто называют торрефикацией [3]. Низкие скорости нагрева в сочетании с длительным временем пребывания образующихся газов в реакторах приводят к получению газообразных продуктов [4, 5]. Поэтому в процессе разработки реактора пиролиза большую роль играет математическое моделирование, позволяющее оценить влияние физических параметров, химического состава, размера частиц на качественные характеристики получаемого топлива и повышение эффективности термической переработки биомассы.

Моделирование процесса пиролиза частицы твердого топлива является сложной задачей, так как данный процесс включает передачу теплоты путем теплопроводности, конвекции и излучения, фазовые переходы и пористость структуры частицы. В работе представлена одномерная модель пиролиза

твердой частицы биомассы в высокотемпературном газовом потоке, состоящая из уравнений баланса массы, энергии с учетом выхода летучих и наличия трех фаз, составляющих частицу: твердой, жидкой и газообразной. Рассмотрена изотропная и идеально сферическая твердая частица. Предполагается, что физические величины изменяются только в радиальном направлении. Исследован сопряженный процесс нагрева и сушки частицы. Выполнена оценка времени сушки и пиролиза.

### 2. ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ СУШКИ ЧАСТИЦЫ

Рассматривается в одномерной постановке процесс сушки одиночной шарообразной частицы в высокотемпературном газовом потоке.

Уравнение баланса массы жидкой фазы имеет вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_w \rho_w}{\partial \tau} = -\dot{S}_{wg}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_w = \varepsilon_w(r, \tau)$  – объемная доля жидкой фазы (воды), зависящая от  $r$  – координаты по радиусу частицы – и времени  $\tau$ ;  $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $\dot{S}_{wg}$  – источниковый член, характеризующий процесс испарения (процесс water→gas),  $\text{кг/м}^3/\text{с}$ . Согласно [6],

$$\dot{S}_{wg} = A_w \sqrt{\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2\pi R_u T}} \frac{\sigma_c}{2 - \sigma_c} (p_{sat}(T) - p_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (2)$$

Здесь  $A_w$  – удельная площадь поверхности,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , определяемая как отношение площади фазового перехода к объему частицы;  $p_{\text{H}_2\text{O}}$  – давление водяного пара вдали от поверхности испарения, Па;  $p_{sat} = p_{sat}(T)$  – давление насыщенного водяного пара на фронте испарения при температуре  $T$ , Па;  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  – молярная масса воды;  $R_u = 8,31446 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$  – универсальная газовая постоянная;  $\sigma_c$  – корректирующий коэффициент, учитывающий конвективное движение пара.

На рис. 1 показана зависимость  $\dot{S}_{wg}$  от температуры, рассчитанная при  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 20 \text{ кПа}$ . Зависимость

$p_{sat} = p_{sat}(T)$  взята из [7]. Если  $\dot{S}_{wg} > 0$ , то происходит потеря влаги вследствие ее испарения, если  $\dot{S}_{wg} < 0$ , то происходит конденсация водяных паров.



Переход через ноль наблюдается при температуре  $T(\dot{S}_{wg} = 0) = 333,17 \text{ К}$ .

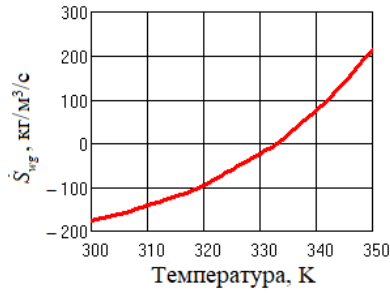


Рис. 1. Температурная зависимость  $\dot{S}_{wg}$

Оценим длительность процесса сушки на основе исследования зависимости  $\varepsilon_w = \varepsilon_w(r, \tau)$  при заданном распределении температуры по радиусу частицы  $T = T(r)$ .

Для получения зависимости  $\varepsilon_w = \varepsilon_w(r, \tau)$  использован метод контрольного объема [8, 9]. Дискретный аналог уравнения (1) для контрольного объема с узлом  $P$  приводится к виду:

$$(\varepsilon_w \rho_w)|_P - (\varepsilon_w \rho_w)|_P^0 = -\dot{S}_{wg}(T_P) \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

где  $\Delta\tau$  – шаг во времени;  $T_P$  – температура в узле  $P$ ;

$(\varepsilon_w \rho_w)|_P, (\varepsilon_w \rho_w)|_P^0$  – значения произведений в узле  $P$  в текущий и предшествующий моменты времени. Если принять условие  $\rho_w = \text{const}$ , то на основе (3) получаем соотношение для расчета  $\varepsilon_w(P)$  – объемной доли  $\varepsilon_w$  в узле  $P$ :

$$\Delta = \varepsilon_w^0(P) - \dot{S}_{wg}(T_P) \frac{\Delta\tau}{\rho_w}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_w(P) = \begin{cases} \Delta, & \text{если } \Delta \geq 0, \\ 0, & \text{если } \Delta < 0. \end{cases}$$

Результаты исследования зависимости  $\varepsilon_w(r, \tau)$  для частицы радиусом  $R = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  проиллюстрированы на рис. 2. Принято, что температура частицы  $T(r)$  линейно изменяется по радиусу от  $T(0) = 350 \text{ К}$  до  $T(R) = 500 \text{ К}$ . В качестве начального условия принято  $\varepsilon_w(r, 0) = \varepsilon_{w,0} = 0,19$ .

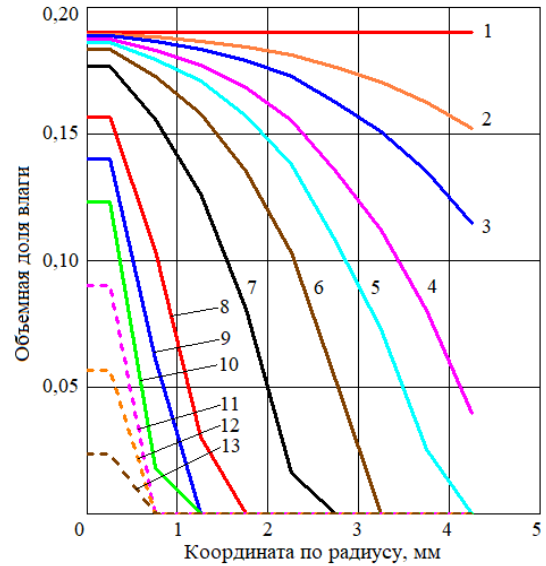


Рис. 2. Зависимость  $\varepsilon_w(r)$  в различные моменты времени: 1 –  $\tau = 0 \text{ с}$ ; 2 –  $0,002 \text{ с}$ ; 3 –  $0,004 \text{ с}$ ; 4 –  $0,008 \text{ с}$ ; 5 –  $0,012 \text{ с}$ ; 6 –  $0,02 \text{ с}$ ; 7 –  $0,04 \text{ с}$ ; 8 –  $0,10 \text{ с}$ ; 9 –  $0,15 \text{ с}$ ; 10 –  $0,20 \text{ с}$ ; 11 –  $0,30 \text{ с}$ ; 12 –  $0,40 \text{ с}$ ; 13 –  $0,50 \text{ с}$

В расчетах процесс сушки считается законченным в момент, когда максимум функции  $\varepsilon_w(r)$  впервые становится меньше  $10^{-6}$ . Для условий, при которых получены данные на рис. 2,  $\tau_{\text{сушки}} = 0,572 \text{ с}$ .

Исследуем зависимость времени сушки  $\tau_{\text{сушки}}$  от параметров, определяющих линейное температурное поле в частице: температуры в центре  $T(0)$  и перепада температур по радиусу частицы  $\delta T = T(R) - T(0)$ . Результаты исследования функции  $\tau_{\text{сушки}}(\delta T, T(0))$  показаны на рис. 3. Чем выше  $T(0)$ , тем более пологой становится зависимость  $\tau_{\text{сушки}}(\delta T)$ .

Рассмотрим сопряженный процесс нагрева и сушки частицы как нестационарную одномерную теплопроводность с внутренними стоками теплоты вследствие испарения влаги.

$$\frac{\partial \rho_{ef} c_{ef} T}{\partial \tau} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \left( -\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) - \dot{S}_{wg} h_{var}, \quad (5)$$

где  $T = T(r, \tau)$  – температура, рассматриваемая как функция радиуса и времени;  $\rho_{ef}, c_{ef}$  – эффективные плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) и удельная теплоемкость ( $\text{Дж/кг/К}$ ) частицы;  $\lambda_{ef}$  – эффективная теплопроводность частицы,  $\text{Вт/м/К}$ ;  $h_{var}$  – удельная теплота парообразования,  $\text{Дж/кг}$ . Совместное решение уравнений (5), (4) и (2) позволит получить более адекватную информацию об изменении полей  $T = T(r)$  и  $\varepsilon_w(r)$  во времени.

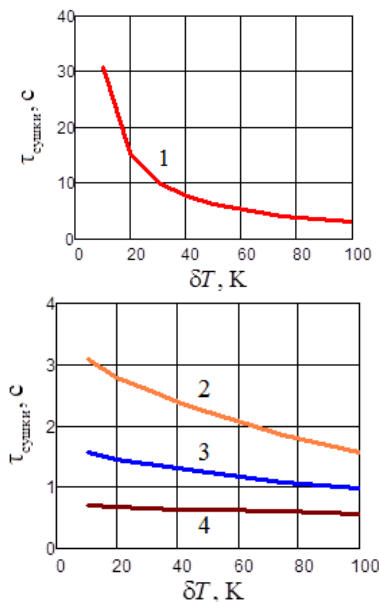


Рис. 3. Зависимость времени сушки от параметров температурного поля в частице: 1 –  $T(0) = T(\dot{S}_{wg} = 0) = 333,17$  К; 2 –  $T(0) = T(\dot{S}_{wg} = 0) + 5$ ; 3 –  $T(0) = T(\dot{S}_{wg} = 0) + 10$ ; 4 –  $T(0) = T(\dot{S}_{wg} = 0) + 20$

В условия однозначности рассматриваемой задачи входят:

- граничные условия 3 рода на свободной поверхности частицы:

$$\lambda_{ef} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_{gas} - T(R, \tau)), \quad (6)$$

- граничные условия 2 рода в центре частицы (в силу симметрии задачи):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (7)$$

- начальные условия:

$$\begin{aligned} \epsilon_w(r, 0) &= \epsilon_{w,0}; \\ T(r, 0) &= T(\dot{S}_{wg} = 0). \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на свободной поверхности частицы, Вт/м<sup>2</sup>/К;  $T_{gas}$  – температура газа, контактирующего с частицей, К.

Численное решение уравнения энергии (5) выполнено методом контрольного объема с использованием чисто неявной схемы. На рис. 4 приведены результаты решения сопряженной задачи «нагрев – сушка» для следующих условий:  $\alpha = 100$  Вт/м<sup>2</sup>/К;  $T_{gas} = 1000$  К,  $\rho_{ef} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_{ef} = 1000$  Дж/кг/К;  $\lambda_{ef} = 1$  Вт/м/К.

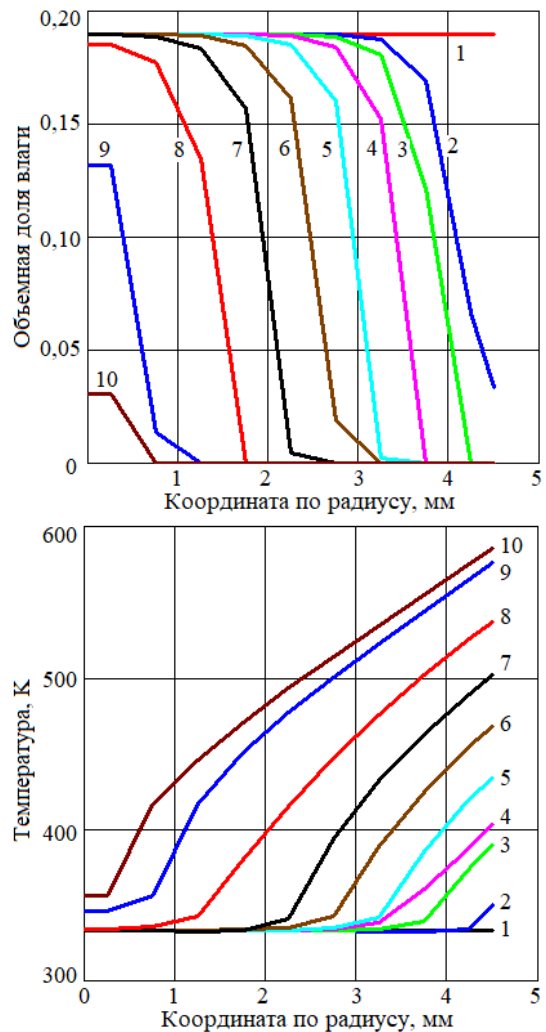


Рис. 4. Зависимости  $\epsilon_w(r)$  и  $T(r)$  в различные моменты времени (из решения сопряженной задачи): 1 –  $\tau = 0$  с; 2 – 2 с; 3 – 4 с; 4 – 6 с; 5 – 8 с; 6 – 10 с; 7 – 12 с; 8 – 14 с; 9 – 16 с; 10 – 16,5 с

Время сушки составляет  $\tau_{сушки} = 16,6$  с, что существенно превышает ранее найденное значение (см. рис. 2), когда температурное поле не рассчитывалось, а параметрически задавалось. Отсюда следует, что рассматриваемый процесс нагрева и сушки частицы необходимо рассматривать как сопряженную задачу, что приблизит результаты расчета к реальной картине процесса.

Кривые на рис. 5 иллюстрируют влияние температуры газа  $T_{gas}$  на  $\tau_{сушки}$ , а также на характеристики температурного поля в частице – температуру поверхности  $T_{пов} = T(R, \tau_{сушки})$  и перепад температур между поверхностью и центром частицы  $\Delta T = T_{пов} - T_{центр} = T(R, \tau_{сушки}) - T(0, \tau_{сушки})$  в момент  $\tau_{сушки}$ .

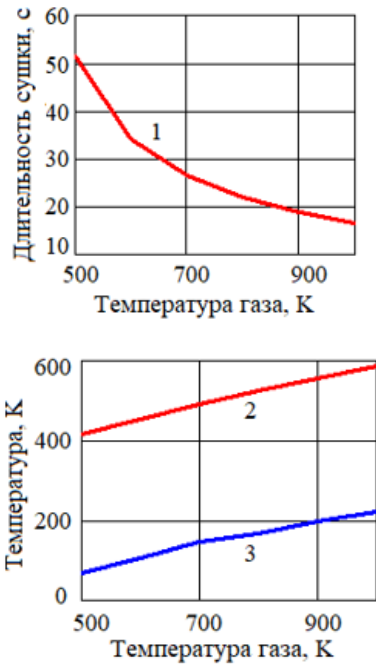


Рис. 5. Зависимости времени сушки, температуры поверхности и перепада температур по радиусу частицы от температуры газа: 1 –  $\tau_{\text{сушки}}$ ; 2 –  $T_{\text{пов}}$ ; 3 –  $\Delta T$

С уменьшением температуры газа снижается интенсивность теплоподвода к частице, что обеспечивает снижение перепада температур по ее радиусу (кривая 3 на рис. 5) и более однородную тепловую обработку.

### 3. ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПИРОЛИЗА СУХОЙ ЧАСТИЦЫ

Рассматривается в одномерной постановке процесс пиролиза одиночной сухой шарообразной частицы в высокотемпературном газовом потоке.

Уравнение баланса массы твердой фазы:

$$\frac{\partial \varepsilon_s \rho_s}{\partial \tau} = -\dot{S}_{sg}, \quad (9)$$

где  $\rho_s = \rho_s(r, \tau)$  – плотность твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(r, \tau)$  – объемная доля твердой фазы;  $\dot{S}_{sg}$  – источниковый член, характеризующий процесс выделения летучих (devolatilization) (процесс solid→gas), кг/м<sup>3</sup>·с. Величины  $\rho_s$  и  $\varepsilon_s$  являются функциями  $r$  – координаты по радиусу частицы и времени  $\tau$ .

Источниковый член описывается уравнением:

$$\dot{S}_{sg} = k \rho_{s0} \varepsilon_{s0} (Z - Z_{\infty}) H(Z - Z_{\infty}); \quad (10)$$

$$Z = \frac{\rho_s \varepsilon_s}{\rho_{s0} \varepsilon_{s0}}; Z_{\infty} = \frac{\rho_s^{\infty} \varepsilon_s^{\infty}}{\rho_{s0} \varepsilon_{s0}}.$$

где  $Z$  – отношение текущей массы частицы к начальной;  $Z_{\infty} = Z(\tau \rightarrow \infty)$  – предельное значение  $Z$  при  $\tau \rightarrow \infty$ . Здесь  $\rho_s, \varepsilon_s$  – текущие значения  $\rho_s$  и  $\varepsilon_s$ ,  $\rho_{s0}, \varepsilon_{s0}$  – начальные значения  $\rho_s$  и  $\varepsilon_s$  (при  $\tau = 0$ );  $\rho_s^{\infty} = \rho_s(\tau \rightarrow \infty)$ ,  $\varepsilon_s^{\infty} = \varepsilon_s(\tau \rightarrow \infty)$  – плотность и объемная доля твердой фазы по завершении процесса пиролиза.

Температурная функция  $Z_{\infty}(T)$  определяется экспериментально посредством ТГА – термогравиметрического анализа. Используем в исследовании зависимость  $Z_{\infty} = Z_{\infty}(T)$ , представленную на рис. 6 [6]. Кривая получена при медленном нагреве биомассы (pine wood – сосны) со скоростью 5 К/мин. Кривая потери массы стремится к величине  $Z_{\infty} = 0,2$ , так как содержание летучих (VM – volatile matter) составляет для исследованного вещества 80 %.

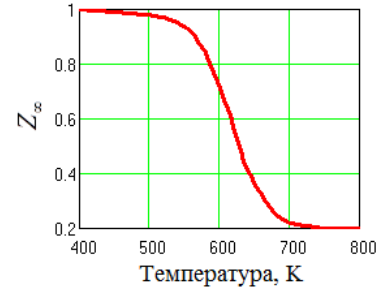


Рис. 6. Зависимость  $Z_{\infty} = Z_{\infty}(T)$

В (10)  $k$  – константа скорости реакции пиролиза, описываемая уравнением Аррениуса:

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{R_a T}\right), \quad (11)$$

где  $A = 2980 \text{ c}^{-1}$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_a = 73100 \text{ кДж/кмоль}$  – энергия активации;  $H$  – функция Хэвисайда:

$$H(Z - Z_{\infty}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Z - Z_{\infty} < 0, \\ 1, & \text{если } Z - Z_{\infty} \geq 0. \end{cases} \quad (12)$$

Уравнение (9) приводится к виду:

$$\frac{\partial X}{\partial \tau} = \begin{cases} -kX, & \text{если } X \geq 0 \\ 0, & \text{если } X < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$X = Z - Z_{\infty}.$$

Разделяя переменные в уравнении  $\frac{\partial X}{\partial \tau} = -kX$  и интегрируя, получаем:

$$\ln X \Big|_{X(0)}^{X(\tau)} = -k \tau; \quad \frac{X(\tau)}{X(0)} = \exp(-k \tau);$$

$$X(0) = Z(\tau = 0) - Z_{\infty} = 1 - Z_{\infty}.$$

Отсюда

$$Z = Z_{\infty} + (1 - Z_{\infty}) \exp(-k \tau)$$

или

$$\varepsilon_s \rho_s = \varepsilon_{s0} \rho_{s0} (Z_{\infty} + (1 - Z_{\infty}) \exp(-k \tau)). \quad (14)$$

Допустим, что плотность твердой фазы не меняется во времени, т.е.  $\rho_s = \rho_{s0} = \rho_s^{\infty}$ ; в течение процесса пиролиза частица изотермична и имеет температуру  $T$ . В рамках этих допущений из уравнения (14) следует, что:

$$Z_{\infty} = \frac{\varepsilon_s^{\infty}}{\varepsilon_{s0}}; \quad \varepsilon_s^{\infty} = \varepsilon_{s0} Z_{\infty}(T) \quad (15)$$

На рис. 7 представлены результаты расчета по формуле (14) зависимости  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(\tau)$  при варьировании

температуры  $T$  для двух значений начальной объемной доли твердой фазы  $\varepsilon_{s0}$ .

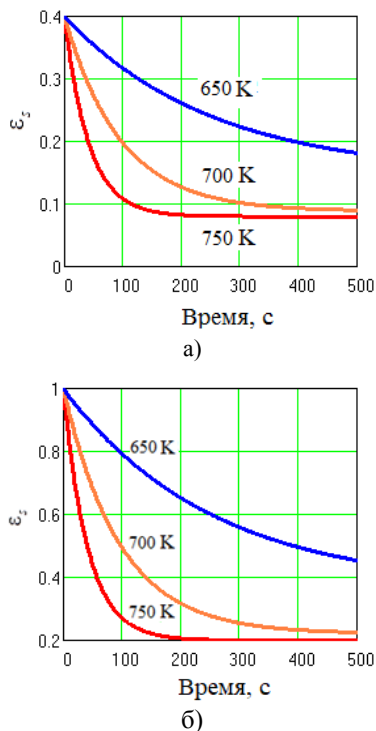


Рис. 7. Зависимость  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(\tau, T)$  при  $\varepsilon_{s0} = 0,4$  (а) и  $\varepsilon_{s0} = 1,0$  (б)

Полученные результаты полностью соответствуют физической картине рассматриваемого процесса. С увеличением температуры темп снижения  $\varepsilon_s$  в начальный период возрастает. С увеличением времени величина  $\varepsilon_s$  стремится к минимуму, принимающему для случая  $\varepsilon_{s0} = 0,4$  (рис. 3, а) при  $T \geq 750$  К согласно формуле (15) значение  $\varepsilon_s^\infty = \varepsilon_{s0} Z_\infty(T \geq 750 \text{ К}) = 0,4 \cdot 0,2 = 0,08$ .

Зависимость  $\dot{S}_{sg}$  от времени при различных температурах представлена на рис. 8.

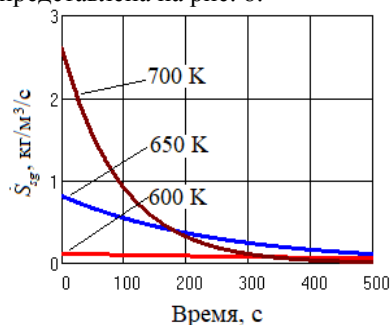


Рис. 8. Зависимость  $\dot{S}_{sg} = \dot{S}_{sg}(\tau, T)$  при  $\varepsilon_{s0} = 0,4$

Получаем вполне ожидаемую картину: чем выше температура, тем интенсивнее процесс пиролиза на начальной стадии и тем резче спад уровня  $\dot{S}_{sg}$  в течение первых 100 секунд.

Интегрируя (9), получаем уравнение (16):

$$\int_0^{\tau_{\text{пир}}} \dot{S}_{sg} d\tau = \rho_{s0} \varepsilon_{s0} - \rho_s^\infty \varepsilon_s^\infty = \rho_{s0} \varepsilon_{s0} (1 - Z_\infty), \quad (16)$$

из которого можно определить длительность процесса пиролиза  $\tau_{\text{пир}}$ , используя приведенные выше функциональные зависимости. Интегрирование в левой части уравнения (16) эффективно реализуется средствами среды Mathcad.

На рис. 9 представлена полученная из (16) зависимость  $\tau_{\text{пир}}$  от температуры пиролиза  $T$  в диапазоне 600...900 К (рис. 9, а) и 850...1000 К (рис. 9, б).

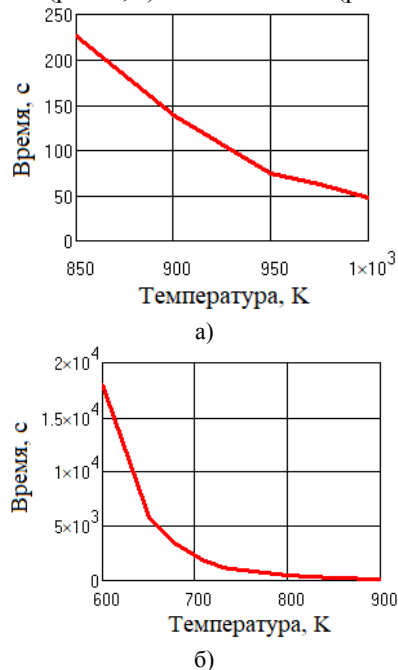


Рис. 9. Температурная зависимость времени пиролиза  $\tau_{\text{пир}}$  при  $\varepsilon_{s0} = 0,4$

Разработанные математические модели, их программные реализации и результаты исследования могут быть использованы при разработке реакторов пиролиза биомассы в различных температурных диапазонах, в том числе и для низкотемпературного пиролиза – торрефикации.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрен в одномерной постановке процесс сушки одиночной шарообразной частицы в высокотемпературном газовом потоке при параметрически задаваемом температурном поле в частице. Для частицы радиусом  $R = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м время сушки составляет  $\tau_{\text{сушки}} = 0,572$  с. Исследована зависимость времени сушки  $\tau_{\text{сушки}}$  от параметров, определяющих линейное температурное поле в частице: температуры в центре  $T(0)$  и перепада температур по радиусу частицы  $\delta T = T(R) - T(0)$ . Чем выше  $T(0)$ , тем более пологой становится зависимость  $\tau_{\text{сушки}}(\delta T)$ .

2. Исследован сопряженный процесс нагрева и сушки частицы, рассматривающий нестационарную одномерную теплопроводность с внутренними стоками теплоты вследствие испарения влаги. Численное решение системы уравнений позволило установить изменение во времени температурного поля и поля  $\varepsilon_w$ . Полученное время сушки составляет  $\tau_{\text{сушки}}$

= 16,6 с, что существенно превышает значение при параметрически задаваемом температурном поле. Отсюда следует, что рассматриваемый процесс нагрева и сушки частицы необходимо рассматривать как сопряженную задачу. Изучено влияние температуры газа  $T_{gas}$  на  $\tau_{сушки}$ , а также на характеристики температурного поля в частице – температуру поверхности  $T_{пов} = T(R, \tau_{сушки})$  и перепад температур между поверхностью и центром частицы  $\Delta T = T_{пов} - T_{центр} = T(R, \tau_{сушки}) - T(0, \tau_{сушки})$  в момент  $\tau_{сушки}$ . Показано, что с уменьшением температуры газа снижается интенсивность теплоподвода к частице, это обеспечивает снижение перепада температур по ее радиусу и более однородную тепловую обработку.

3. Математически описан и исследован процесс пиролиза одиночной сухой шарообразной частицы в высокотемпературном газовом потоке. С увеличением температуры частицы темп снижения объемной доли твердой фазы в начальный период возрастает. С увеличением времени эта величина стремится к минимуму. Чем выше температура частицы, тем интенсивнее процесс пиролиза на начальной стадии и тем резче спад уровня выхода летучих в течение первых 100 секунд. Получена зависимость  $\tau_{пир}$  от температуры пиролиза в диапазоне 600...1000 К.

4. Разработанные математические модели, их программные реализации и результаты исследования могут быть использованы при разработке реакторов пиролиза биомассы, осуществляемого на различных температурных уровнях.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи на свободной поверхности частицы, Вт/м<sup>2</sup>/К;  
 $\varepsilon_s$  — объемная доля твердой фазы;  
 $\varepsilon_w$  — объемная доля жидкой фазы (воды);  
 $\lambda_{ef}$  — эффективная теплопроводность частицы, Вт/м/К;  
 $\rho_{ef}$  — эффективная плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_s$  — плотность твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_w$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma_c$  — корректирующий коэффициент, учитывающий конвективное движение пара;  
 $\tau$  — время, с;  
 $A_w$  — удельная площадь поверхности, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  
 $c_{ef}$  — эффективная удельная теплоемкость частицы, Дж/кг/К;

$E_a$  — энергия активации, кДж/кмоль;  
 $H$  — функция Хэвисайда;  
 $h_{vap}$  — удельная теплота парообразования, Дж/кг;  
 $k$  — константа скорости реакции пиролиза;  
 $M_{H_2O}$  — молярная масса воды, кг/моль;  
 $p_{H_2O}$  — давление водяного пара вдали от поверхности испарения, Па;  
 $p_{sat}$  — давление насыщенного водяного пара на фронте испарения, Па;  
 $r$  — координата по радиусу частицы, мм;  
 $R_u$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  
 $\dot{S}_{sg}$  — источниковый член, характеризующий процесс выделения летучих, кг/м<sup>3</sup>/с;  
 $\dot{S}_{wg}$  — источниковый член, характеризующий процесс испарения, кг/м<sup>3</sup>/с;  
 $T_{gas}$  — температура газа, контактирующего с частицей, К;  
 $Z$  — отношение текущей массы частицы к начальной в процессе пиролиза

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Olazar M., Aguado R., San Jose MJ., Bilbao J.** Kinetic study of fast pyrolysis of sawdust in a conical spouted bed reactor in the range 400-500°C. // J Chem Technol Biotechnol, 76 (2001), P. 469-476 <https://doi.org/10.1002/jctb.409>.
2. **Arya S., Sharma A., Rawat M., Agrawal A.** Tyre pyrolysis oil as an alternative fuel: a review // Mater Today: Proceedings 28 (2020), P. 2481-2484. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.797>.
3. **Валинеева А.А.** Торрефикация — ресурсосберегающее направление термохимической переработки биомассы / А.А. Валинеева, В.А. Масловский, С.К. Попов, И.Н. Сви-стуннов // Вестник МЭИ. 2021. № 4. С 22-36.
4. **Yaman S.** Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks // Energy Convers Manag 45(5) (2001), P 651-671. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8).
5. **Güllü D., Demirbas A.** Biomass to methanol via pyrolysis process // Energy Convers Manag 42(11)(2001), P. 1349-1356. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00126-6).
6. **Wardach-Swiecicka I.** Modelling thermal behaviour of a single solid particle pyrolysing in a hot gas flow // Energy, 221 (2021) 119802. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119802>
7. **Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) /** Под ред. Н. В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. 296 с.
8. **Патанкар С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. / С.В. Патанкар. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
9. **Патанкар С.В.** Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах: Пер. с англ. Е.В. Калабина / Под ред. Г.Г. Янькова / С.В. Патанкар. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.







ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

**ТРУДЫ**  
*одиннадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 7

*Экономические аспекты  
энергосбережения*

*Д.В. Никифорова, Д.А. Смирнова, Е.Д. Хащенко*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЭС ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САНАТОРИЯ В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

### АННОТАЦИЯ

Статья содержит исследования о целесообразности использования солнечной энергии для электроснабжения санатория в Краснодарском крае. В работе представлены результаты экономической оценки эффективности строительства СЭС установленной мощностью 300 кВт, как способа снижения затрат на топливо при функционировании ДЭС в настоящее время. Результаты представляют практическую значимость, что приведет к повышению уровня заинтересованности использования ВИЭ и стимулированию развития возобновляемой энергетики в Южном регионе России.

### АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современных условиях вектор развития электроэнергетики имеет тенденцию к повышению конкурентоспособности компаний на рынках генерации электроэнергетики, в том числе за счет использования возобновляемой энергетики. Это приводит к возникновению специфических форм конкуренции в борьбе за своего потребителя, а также предложения специфически видов и типов мощностей для выработки электроэнергии, повышения их надежности, а также возможности снизить стоимость потребляемой электроэнергии конечными пользователями. В российских региональных предприятиях активно ведется работа по внедрению инвестиций в развитие генерирующих энергоисточников, в том числе и для организации автономных станций, позволяющих снизить себестоимость электрической энергии и повысить надежность.

В настоящее время также существует тенденция использования в выработке электроэнергии химического топлива на базе природных ископаемых на 90%, которые в результате их активности использования иссякают и, по сути, ограничены и рано или поздно будут истощены. Тем самым, такое положение дел требует поиска новых источников для получения энергии на основе синтетических видов топлива. Также нужно учитывать и то, что возрастают трудности по защите среды от термического, химического и радиационного заражения, что и определяет ужесточение требований в сторону экологических показателей процессов получения энергии.

Для решения вышеперечисленных проблем возможно использование возобновляемых источников

энергии, основным достоинством которых является неисчерпаемость. Энергия ветра, солнечного излучения, потоков воды, тепловая энергия подземных источников и слоев земной коры – все это столетиями используется для выработки тепловой и электрической энергии. С развитием научного прогресса повышается эффективность использования ВИЭ.

Кроме неисчерпаемости, к преимуществам возобновляемых источников энергии можно отнести:

- с территориальной точки зрения возможно повсеместное использование как отдельных видов ВИЭ, так и гибридных установок;

- практически полное исключение затрат на топливо, только при необходимости наличия резервной мощности на органическом топливе;

- минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду.

При оценке эффективности использования ВИЭ необходимо учитывать коэффициент использования установленной мощности, которым определяется доля энергии источника, которая может быть превращена в механическую работу. Так, качество гидроэнергии характеризуется значениями в 0,6-0,7, ветровая – 0,3-0,4, тепловая не превышает 0,3-0,35, солнечного излучения для фотоэлектрического преобразования находится в пределах 0,15-0,3, качество биотоплива относительно низкое и находится в пределах 0,3.[1]

Несмотря на то, что генерирование солнечной электроэнергии имеет ряд преимуществ, которые обусловлены потенциальными возможностями запаса энергии и ее даже небольшого количества достаточно для обеспечения нужд промышленности и быта как альтернативного источника экосистем, но в то же время характерно наличие некоторых проблем, также и в вопросах высокой стоимости фотопанелей, утилизации солнечных батарей и несовершенствами преобразования электроэнергии в этих системах. Все это требует более тщательной проработки и расчетов на современной базе данных конструкций и механизмов, что позволит повысить эффективность управления данными системами и достигнуть высоких показателей выработки и потребления энергии.

Целесообразность использования возобновляемых источников электроэнергии определяется их эконо-

мической эффективностью и конкурентоспособностью по сравнению с традиционными энергетическими технологиями.

При этом государство заинтересовано в развитии данной сферы, потому как она относится к перспек-

тивной и поэтому Правительством создаются нормативные акты по вопросам стимулирования развития возобновляемых источников энергии. В таблице 1 представлены основные законодательные акты, способствующие развитию ВИЭ на территории РФ.

Таблица 1. Законы, принятые Правительством РФ для использования ВИЭ за последние 10 лет [2]

Год	Закон
2012	Об утверждении комплекса мер стимулирования производства эл/эн на основе использования ВИЭ.
2013	О внесении изменений в Основные направления госполитики в сфере повышения энергетической эффективности эл/эн на основе использования ВИЭ на период до 2020 года.
2014	О мерах по упорядочению и стимулированию производства и использования эл/эн на основе ВИЭ.
2015	О стимулировании использования ВИЭ на розничных рынках эл/эн. Об оборудовании автозаправочных станций зарядными колонками для транспортных средств с электродвигателями. О мерах по стимулированию использования ВИЭ на оптовом рынке эл/эн и мощности [2].
2016	О внесении в Госдуму законопроекта, направленного на стимулирование использования торфа в энергетике. О порядке предоставления субсидий из федерального бюджета на технологическое присоединение генерирующих объектов, работающих на основе использования ВИЭ. О мерах по стимулированию развития в России производства оборудования для солнечной энергетики на основе фотоэлектрического преобразования.
2017	О стимулировании развития микрогенерации на основе ВИЭ. Об использовании твердых бытовых отходов в качестве источников энергии. Об изменениях в порядке конкурсного отбора инвестиционных проектов по строительству объектов генерации на основе ВИЭ. Об изменениях в порядке квалификации генерирующих объектов, работающих на основе ВИЭ. О плане мероприятий по стимулированию развития генерирующих объектов на основе ВИЭ с установленной мощностью до 15 кВт.
2018	Об утверждении плана мероприятий “Развитие биотехнологий и геномной инженерии” на 2018-2020 годы. О внесении в Госдуму законопроекта о правовом регулировании вопросов производства биоэтанола. О реализации инвестиционных проектов по строительству заводов термической переработки отходов. О стимулировании использования ВИЭ О правовом регулировании вопросов производства эл/эн на объектах микрогенерации.
2019	Об исключении избыточных требований при строительстве ветроэлектростанции.

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕГИОНА

Краснодарский край обладает благоприятными природными и климатическими особенностями: среднегодовая инсоляция более 4 кВтч/м<sup>2</sup>, среднегодовая скорость ветра более 6 м/с, температурный градиент подземных слоев более 3 °С/100м. На всей территории Краснодарского края возможно использование ВИЭ после проведения технико-экономического обоснования и сравнения альтернативных вариантов. Но, тем не менее, в Краснодарском крае не достаточно широко используются возобновляемые источники энергии.

Так на 2021 год доля производства электрической энергии, производимой с применением возобновляемых источников энергии в Российской Федерации составила 0,23%, в то время как на Южный Федеральный округ пришлось 1,01%. В целом на 2021 год в Российской Федерации мощность генерирующих объектов, которые функционируют на основе использования возобновляемых источников энергии составила 1077 МВт, в то время как на Южный федеральный округ пришлось 543 МВт.[3]

Энергодефицит в регионе является актуальной проблемой, потому как растут темпы и объемы строительства в сферах массового жилищного и промышленного

строительства, а также расширения курортно-рекреационной отрасли. Особенно сильно дефицит мощностей ощущается в месяцы наплыва отдыхающих, в небольших курортные поселки, с мая по октябрь.

## ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ СТРОИТЕЛЬСТВА АГЭУ

Автономные гибридные энергоустановки (АГЭУ) – это установки, использующие в качестве основного источника возобновляемую энергию солнца, ветра, воды и так далее, а в качестве резерва – установки на традиционных видах топлива. АГЭУ позволяют экономить органическое топливо, снижать экологическую нагрузку и повышать надежность системы электроснабжения.

В состав АГЭУ входит фотоэлектрическая станция (ФЭС), которая в солнечную погоду преобразует энергию солнца в электрическую энергию с помощью фотоэлектрических панелей; дизельная электростанция, которая вырабатывает электрическую энергию в темное время суток, а так же при пасмурной погоде или при возрастании нагрузки, то есть при нехватке электрической энергии от фотоэлектрической станции. В свою очередь ФЭС состоит из следующих основных элементов: солнечные панели, инверторы и контроллеры.

Рассматриваемые санаторий находится в непосредственной близости к черному морю, у подножия горы в значительном удалении от линий электропередач. На данный момент на территории функционирует дизельная электростанция мощностью 300 кВт, без возможности резервирования, и срок полезного использования которой практически достиг своего номинального значения. Оптимальным решением является строительство ФЭС в дополнение к действующей ДЭС.

Для строительства АГЭУ, а именно ФЭС, для обеспечения электроэнергией санатория выбран ровный горизонтальный участок на территории санатория площадью 1 118,9 м<sup>2</sup>. Форма участка близка к прямоугольной, расположение оптимально: направление север-юг, это позволяет использовать площадь участка наиболее эффективным способом.

Для строительства ФЭС были выбраны высокоэффективные гетероструктурные модули с повышенной (до 25%) выработкой электроэнергии HVL-330/HJT от компании-производителя Хевел.

С учетом среднегодового уровня инсоляции и коэффициента полезного использования ФЭС экономия топлива составит 33%, следовательно, ежегодные затраты на топливо пропорционально снизятся на 33%, однако ежегодные затраты на обслуживание и амортизационные отчисления для АГЭУ будут значительно выше, чем при функционировании только ДЭС.

Для экономического обоснования целесообразности использования солнечной энергии для электрообеспечения санатория необходимо рассчитать показатели экономической эффективности инвестиционного проекта с учетом фактора времени.

Учет фактора времени подразумевает ввод в расчет экономической эффективности ставки дисконтирования. Существует несколько способов определения нормы дисконта: с учетом инфляции по формуле Фишера, средневзвешенное значение при комбинации различных источников финансирования, как ставка по вложениям в альтернативные проекты и так далее. Для инвестиционных проектов с использованием ВИЭ наиболее объективным способом расчета является суммирование безрисковой составляющей и премии за риск. В качестве безрисковой ставки была взята ставка доходности по наименее рискованным на сегодняшний день рублевым вложениям на территории РФ, по депозитам Сбербанка в 2022 году эта величина составляет 9 % годовых.

К рискам можно отнести такие факторы как понижение стоимости традиционных видов топлива, увеличение объема их добычи, ужесточение санкций и изоляция РФ. Факторы риска можно оценить на 6 %, тогда ставка дисконтирования составит 15%.

По данным финансовой отчетности за 2021 год можно сделать вывод о том, что санаторий обладает достаточными свободными собственными средствами для реализации инвестиционного проекта.

В таблице 2 представлен перечень основного необходимого оборудования для строительства ФЭС.

Таблица 2. Перечень основного оборудования для строительства ФЭС [4,5]

Показатели	Стоимость, тыс. руб.
Фотоэлектрические модули HVL-330/HJT	16590
Гибридный солнечный инвертор SOFAR HYD 6000-ES	5202,12
Прочее оборудование	2420
Строительно-монтажные работы	2414,2
Итого	26626,32

К основным ежегодным затратам на реализацию проекта относятся (диаграмма 1):

- затраты на дизельное топливо;
- заработная плата обслуживающего персонала;
- страховые отчисления с фонда заработной платы;
- амортизационные отчисления;
- эксплуатационные затраты на ремонт и обслуживание.



Диаграмма 1 – Структура текущих затрат

Оценка экономической эффективности инвестиционного проекта строительства ФЭС проведена с помощью расчета таких критериев, как чистая дисконтированная экономия (ЧДЭ), дисконтированный срок окупаемости, внутренняя норма доходности (ВНД) и дисконтированный индекс рентабельности. Аналитическим методом рассчитаны ЧДЭ и дисконтированный индекс рентабельности, графическим методом рассчитаны дисконтированный срок окупаемости и ВНД (рисунок 1,2, таблица 3).

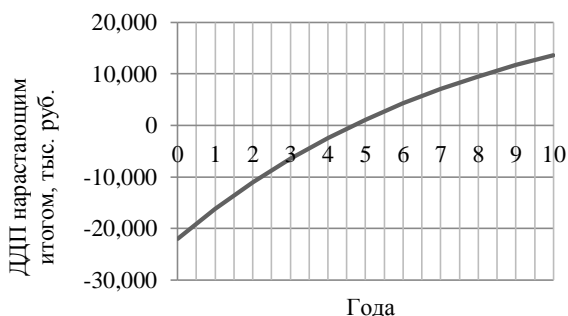


Рисунок 1. Определение дисконтированного срока окупаемости графическим методом

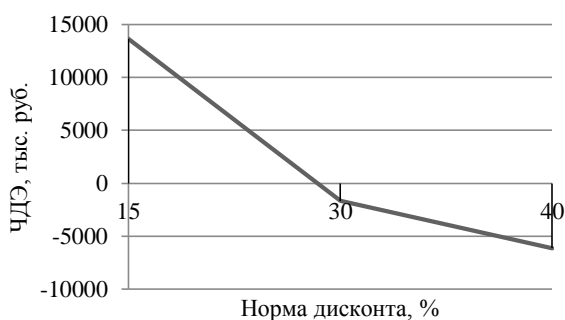


Рисунок 2. Определение внутренней нормы доходности графическим методом

Таблица 3. Показатели эффективности инвестиционного проекта

Показатель	Значение
Чистая дисконтированная экономия, млн. руб.	13,645
Дисконтированный срок окупаемости, лет	3,5
Внутренняя норма доходности, %	28
Индекс доходности	1,62

В соответствии с методикой экономической оценки эффективности инвестиций проект рекомендуется к внедрению, если чистая дисконтированная экономия больше 0, дисконтированный срок окупаемости ниже расчетного периода, для данного проекта составляет 10 лет, внутренняя норма доходности выше нормы дисконта и индекс доходности больше 1. [6]

Все критерии оценки соответствуют предъявленным выше требованиям из чего можно сделать вывод, что проект строительства ФЭС в составе АГ-ЭУ может быть рекомендован к внедрению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До строительства ФЭС санаторий получал электроэнергию, вырабатываемую ДЭС. Мощности генератора хватало, для обеспечения электроэнергией санатория, но стоимость дизельного топлива стала существенной статьей затрат. В среднем в год расходовалось около 22,9 млн. руб. только на топливо. При этом топливо дорожало каждый год. Так же дизельный генератор находился в эксплуатации более 10 лет, что привело к удорожанию расходов по эксплуатации и содержанию.

При расчете инвестиционного проекта по строительству мини-станции для обеспечения электроэнергией санатория Краснодарского края, было принято решение установить солнечные панели. Для реализации инвестиционного проекта были использованы собственные средства из прибыли санатория, полученной в 2021 году.

Расчет показателей эффективности данного инвестиционного проекта показал, что при выбранных

условиях проект является эффективным как с технической, так и экономической точки зрения.

Основными критериями, принятия решения по реализации данного инвестиционного проекта являются:

1. Расположение санатория - Краснодарский край, который является одним из регионов России с самым высоким уровнем инсоляции;
2. Неисчерпаемость. Использовать солнечные панели для выработки электричества можно на протяжении всего их срока полезного использования;
3. Экономичность. Значительно снижаются затраты на покупку органического топлива;
4. Экологичность. ВИЭ практически не вредит природе, поэтому она настолько популярна в развитых странах.
5. По всем рассчитанным критериям экономической эффективности инвестиционных вложений проект признан эффективным.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;  
 СЭС – солнечная электростанция;  
 ФЭС – фотоэлектрическая станция;  
 ДЭС – дизельная электростанция;  
 КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;  
 ЧДЭ – чистая дисконтированная экономия;  
 ВНД – внутренняя норма доходности;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://window.edu.ru> (дата обращения 15.06.2022).
2. Д. Кривая, Д.В. Никифорова. Оценка эффективности вовлечения нетрадиционных источников энергии в энергобаланс южного региона России. Доклады X международной школы-семинара молодых ученых и специалистов « Энергосбережение. Теория и практика». Москва, 2020.
3. Альтернативные источники энергии в экономике Кубани. [Электронный ресурс] / Режим доступа <http://elibrary.ru> (дата обращения 15.06.2022).
4. Группа компании «Хевел». Солнечный модуль HVL-330/HJT. [Электронный ресурс] / Режим доступа <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-330hjt/> (дата обращения 10.06.2022)
5. Компания «Санвэйс». Гибридный солнечный инвертор SOFAR HYD 6000-ES. [Электронный ресурс] / Режим доступа <https://s-ways.ru/products/inventory/inventory-sofar/gibridnyy-solnechnyy-invertor-sofar-hyd-6000-es.html#specifications> (дата обращения 10.06.2022)
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов" (утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 N ВК 477) . [Электронный ресурс] / Режим доступа [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_28224/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_28224/) (дата обращения 11.06.2022)

*М.С. Скиба, В.В.. Бологова* <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ЦИФРОВИЗАЦИЯ, КАК ИНСТРУМЕНТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены основные понятия и принципы цифровизации, как инструмента энергосбережения и повышения энергоэффективности энергетического предприятия. Проанализированы основные цифровые ресурсы при обеспечении энергосбережения, рассмотрены факторы, оказывающие влияние на энергетического предприятие.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

TABLE I. В современной реальности компаниям нужны инновации, чтобы не только ускорить темпы развития, укрепить лидерство и оторваться от конкурентов, но и своевременно защитить отрасль от ущерба, когда внедряются радикальные инновации, которые делают целые направления бизнеса экономичными непрактичными. Инновации часто требуют больших инвестиций и больших рынков сбыта. Отрасли с требуемым масштабом производства (например, нефть и газ, энергетика, металлургия) могут стать первопроходцами прорывных технологий и национальными инновационными центрами [1].

На сегодняшний день из-за увеличения частоты и скорости появления новых продуктов и технологий предприятиям энергетического комплекса России приходится кардинально менять подходы к работе и выделять на инновационное развитие принципиально иной объем ресурсов. В связи с быстрым развитием электронных технологий и услуг во многих странах экономика начала переходить на «цифровые рельсы». Оцифровка накладывает на все свой отпечаток, требует новых навыков, высокого темпа работы в условиях неопределенности, частых и внезапных изменений.

Цифровая революция разрушает привычные стереотипы ведения бизнеса в энергетическом комплексе России, что вынуждает компании вести поиск инновационных решений и бизнес-моделей на основе использования искусственного интеллекта, робототехники, когнитивных вычислений и промышленного Интернета вещей.

Экспертная группа Digital McKinsey, проанализировавшая развитие цифровой экономики, отмечает [3], что Россия «по многим параметрам - по уровню цифровизации, доле цифровой экономики в ВВП и среднему отставанию развития в страны-

лидеры по применяемым технологиям» существенно уступает лидерам [13].

Современный мир невозможно представить без цифровых технологий, которые могут изменить и облегчили различные сферы, открыли новые рыночные возможности. Появление таких цифровых инфраструктур, развитие технологий вычислительной техники и цифровых коммуникаций порождают новые возможности в области информационных технологий, их внедрения в социально-политическую и экономическую жизнь общества, формируют новую систему экономических отношений.

В рамках реализации Указа Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» сформирована национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации». Программа развития ставит перед собой важные стратегические задачи по наращиванию технологического потенциала производственных отраслей промышленности через увеличение доли нематериальных активов. Приобретение необходимых знаний и навыков в устанавливающейся парадигме цифровых технологий призвано обеспечить стране технологическое лидерство в цифровом пространстве экономики.

Исходя из повсеместного роста интереса к инновациям и цифровой экономике, актуальным является вопрос исследования влияния цифровой экономики на производственный сектор России. Оптимизация, экономия на издержках, повышение эффективности производства достигаются путем внедрения современных технологических решений и ноу-хау, согласно этим тенденциям цифровизация – переход к цифровым технологиям – является сегодня одним из условий повышения конкурентоспособности. [1] Во многом широкое развитие технологий обязано энергетическому сектору, как основополагающей отрасли. Российская электроэнергетика это одна из наиболее подготовленной отраслей промышленности к цифровой трансформации.

Тем не менее, на других уровнях энергетики России еще предстоит разобрать вопросы, связанные с внедрением цифровых технологий. Из



проанализированных отчетов и форумов можно сделать вывод о том, что на уровнях рынков энергии, крупных энергокомпаний, а также контролирующих органов целью выступает создание единой цифровой среды электроэнергетики, обеспечивающей подключение к ней целых классов активов оборудования электроэнергетики для сбора, передачи и хранения, отраслевых телематических данных, для повышения оперативности, энергоустойчивости и надежности электроэнергетики России.

Основной проблемой для отечественных предприятий энергетики и других крупных отраслей промышленности является морально и физически изношенное оборудование, которое не позволяет внедрять инновационные технологии для основного и вспомогательного производства. Интеллектуальные установки не могут взаимодействовать со станками, произведенными в прошлом столетии. Второй проблемой выступает активное импортозамещение целого ряда типов оборудования, которое позволяет быстро, но за более существенные капитальные вложения решить проблему износа. Следовательно, третьей проблемой выступает задача повысить эффективность производства с помощью инновационных цифровых технологий в режиме экономии средств.

Необходимость проведения модернизации производства и внедрения новых подходов в процесс вместе с внедрением цифровых технологий является актуальным вопросом для энергетических компаний России. Как уже было описано выше, надежное функционирование и устойчивое развитие энергетики России во многом определяют безопасность страны.

Цифровая энергетика – это элемент цифровой экономики, функционирующая в рамках цифровой среды и призванная повлиять на структуру энергетической промышленности России.

Цифровая среда – это комплекс информационно-технологических средств и политик, базирующихся на единообразии представлений, обеспечивающий достоверность, безопасность и сохранность данных на основе единых протоколов, стандартов, алгоритмов, предоставляющий всем субъектам отрасли возможность взаимодействия и использования общих данных, часть экосистемы цифровой экономики, позволяющая повышать эффективность и предсказуемость, снижать отчётную нагрузку, развивать новые рынки.

Факторы использования поля цифровой энергетики:

Во-первых, большое влияние внешних и внутренних факторов развития энергетики России, среди которых:

1. Повышенное внимание и лоббирование цифровой экономики на государственном уровне.

2. Внедрение цифровой среды позволит повысить безопасность и оперативность функционирования генерирующих предприятий.

3. Цифровая среда может существовать только на базе нового оборудования, имеющего датчики учета показателей в системе реального времени.

4. Износ генерирующего оборудования на теплофикационных станциях.

Во-вторых, наличие некоторых проблем энергетики России:

1. Отсутствует представление о том, как озвученный переход к цифровой энергетике отразится на сложившейся ситуации.

2. Министерством энергетики поставлена цель создания единой универсальной цифровой среды, однако большая часть активов предприятий отрасли энергетики нуждается в модернизации.

3. Существующие подходы к оценке рисков не учитывают особенности цифровой экономики.

Необходимость проведения модернизации производства и внедрения новых подходов в процесс вместе с внедрением цифровых технологий является актуальным вопросом для энергетических компаний России. Инвестиционные проекты модернизации и внедрения цифровых технологий становятся необходимостью в связи с созданием единой цифровой среды электроэнергетики, обеспечивающей подключение к ней целых классов активов оборудования электроэнергетики для сбора, передачи и хранения, отраслевых телематических данных, для повышения оперативности, энергоустойчивости и надежности электроэнергетики России.

Среди наиболее распространённых отечественных программных комплексов стоит отметить - "Project Expert" фирмы "ПРО-ИНВЕСТ КОНСАЛТИНГ", "Альт-Инвест" фирмы "Альт", "Инвестор" фирмы "ИНЭК", "ТЭО-ИНВЕСТ" Института проблем управления РАН, FOCCAL фирмы "ЦентрИнвестСофт". Отечественные комплексы базируются на "Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования", утвержденных Министерством финансов Российской Федерации еще в 1994 г. Все вышеперечисленные программные комплексы можно условно разделить на универсальные и отраслевые.

Цифровая экономика как концепция была высказана основателем междисциплинарной исследовательской лаборатории «Media Labs» Массачусетского университета - Николасом Негропonte в 1995 году. Она описывала взаимодействие экономики с информационными технологиями. Сейчас данное сочетание приобретает вид инноваций в секторе экономики, использующей для производства благ интеллектуальные передовые технологии. Концепция цифровой экономики, согласно заключениям Негропonte, основывалась на исключении материальной составляющей экономики, затраты людских ресурсов на трудоемкие добычу сырья, производства, логистику и потребление остатков производства.

Современная цифровая экономика должна обойти эти недостатки и создать во всем автоматизированные процессы добычи-переработки и перевозки сырья для экономии людских ресурсов [2].

Принято считать, что цифровая экономика основана на производстве высокотехнологичными бизнес-структурами различных электронных товаров и сервисов и последующей дистрибуции этой продукции посредством ИКТ и инструментов электронного бизнеса, что предполагает комплексную и согласованную информатизацию различных отраслей и сфер деятельности.

К современным концепциям развития цифровой экономики относятся: платформенная концепция и концепция умной фабрики и киберфизических систем.

Цифровая платформа – это бизнес-модель, благодаря которой осуществляется координация между бизнесом и населением, обеспечивается координация детальности участников рынка [3]

Такая платформа представляет участникам рынка их рейтинги, которые отражают специфические показатели для других агентов рынка, и указывают на степень «доверия» к продукту потребителей. Платформа позволяет продавцу и покупателю быстро найти друг друга для организации обмена/сделки. Необходимые операции по сделке можно осуществить также на базе платформы, не прибегая к частному виду юридической и банковской помощи, а опираясь лишь на выведенные рейтинги.

Функционирование данных цифровых платформ удешевляет и существенно ускоряет взаимодействие агентов рынка, устраняя посреднические звенья. Данный подход существенно повышает производительность и эффективность труда. Платформы не ограничены географически, а пока только лишь границами самого рынка (услуг, продукции, сервиса). Индустриальные и черно-промышленные предприятия способны объединиться в такую систему с помощью «Индустрии 4.0» [3].

«Умная фабрика» имеет свои характеристики, среди которых: предельная автоматизация всех звеньев производства, повышенное внимание и финансирование научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок при производстве серийной продукции (что ранее наблюдалось только при выпуске технически сложной инновационной продукции), концентрация на универсальности производства линии которого трансформируется и управляются автономно. Фабрика работает в режиме онлайн, взаимодействует с «интернетом вещей». Меняется объект управления: теперь все внимание сконцентрировано не на самом производстве, а на жизненном цикле производимой продукции. [4]

Киберфизическая система включает в себя функциональные блоки: датчики, системы передачи и обработки информации, которые охватывают предприятия и выводят их на уровень

информационной среды и работают как комплексы производств и логистики [5]. Киберфизическая система позволит по-другому посмотреть на создание стоимости конечной продукции [6].

Благодаря вышеописанным системам цифровая экономика развивается по всему миру, повышая ВВП развивающихся стран в среднем на 1,5 % в год. Мировым лидером по доле цифровых технологий в экономике выступает Великобритания. По данным International Data Corporation к 2019 году мировые затраты на развитие цифровой экономики достигли 2,1 трлн. долларов США.

Большая часть средств цифровой экономики в доли ВВП России приходится на Интернет-торговлю, услуги и сервисы онлайн покупки товаров. Ежегодно увеличивается экспорт IT технологий. При исследовании аналитики по цифровой экономике всех ведущих технологичных стран наблюдается отставание России от стран-лидеров на 5-8 лет.

Соответственно, можно сделать вывод о том, что цифровая экономика является приоритетным направлением Стратегии научно-технологического развития России. Наиболее развитыми активами цифровой экономики России являются цифровые платформы. На рынке они представлены компаниями «Яндекс», «Avito», «ВКонтакте», отечественными представителями «Amazon», «LinkedIn», «Airbnb» и другими интернет-платформами. Платформы получают свое развитие от использования их в качестве единственных каналов связей компаний с клиентами. Это позволяет экономить на транзакционных издержках и развивать новые бизнес-модели для повышения интеграции цифровых платформ [7]. Самая большая и широко известная цифровая платформа в России представлена компанией «Яндекс», которая интегрирует свои системы в технологию умный дом, в навигацию и управление автомобиля, в технологию интернет вещей.

Другим примером успешного функционирования цифровых платформ является компания Tesla, умные автомобили которой способны самостоятельно передвигаться по улицам города, автоматически устанавливать современное программное обеспечение.

В логистике крупные компании используют портативные устройства навигации для отслеживания контейнеров, что позволяет повторно их использовать другим агентам рынка, таким образом обмениваясь конвейерами компании экономят на перевозках. Аналогичная установка устройств мониторинга на промышленное оборудование позволяет использовать методы углубленной аналитики и обеспечивает более эффективную их эксплуатацию [8].

Основными технологиями, движущими современное общество к постиндустриальному этапу развития являются технологии виртуальной и дополненной реальности, анализ баз данных

«BigData», усовершенствование полупроводников, разработка нейронных сетей и машинного обучения. Конечно, данные технологии несовершенны и до масштабного внедрения остается еще много времени.

Тем не менее информационное моделирование уже сейчас активно внедряется в промышленный сектор экономики. Оно применяется для проектирования умных городов, умных транспортных сетей и оно же нашло отражение в уже разработанный умной системе передачи электроэнергии «SmartGrid». Развитие других технологий в энергетике, не только на базе информационного моделирования, но и модернизации и автоматизации производства позволят аккумулировать энергетические ресурсы. Использовать их в дальнейшем для производства высокоинтеллектуальной продукции. Другими словами, энергетика способна выступить катализатором развития цифровой экономики России [9].

Однако, следует учитывать, что трансформация экономики — это довольно нестабильный и масштабный процесс. Необходимо существенно преобразовать устоявшиеся системы управления, наладить межгосударственные связи по обмену технологиями и разработать методики привлечения инвестиций для развития информационных технологий [11]. Рассматриваемая цифровая энергетика способна предоставить для других отраслей современные подходы к цифровизации, благодаря уже реализованным проектам умных сетей и цифровых подстанций. Но также остается обширное поле для исследования объектов генерации, которые мы рассмотрим далее.

Цифровая энергетика — является отдельным звеном цифровой экономики. Базируясь на принципах быстрой и точной передачи большого объема информации, цифровая энергетика выступает элементом цифровой экономики, позволяя пересмотреть существующее взаимодействие агентов на рынке энергии, а также позволяющая развивать совокупность производственных и экономических отношений в отрасли.

Функционируют вышеописанные элементы в цифровой среде. Цифровая среда — это комплекс информационно-технологических средств и политик, базирующихся на единообразии представлений, обеспечивающий достоверность, безопасность и сохранность данных на основе единых протоколов, стандартов, алгоритмов, предоставляющий всем субъектам отрасли возможность взаимодействия и использования общих данных, часть экосистемы цифровой экономики, позволяющая повышать эффективность и предсказуемость, снижать отчетную нагрузку, развивать новые рынки.

Переход на цифровые технологии ускоряется вследствие пандемии и распространением новой коронавирусной инфекцией COVID-19, что повлекло значительное увеличение рисков, однако,

инвестиции при этом уменьшаются. Заинтересованность инвесторов во многом зависит от точной оценки рисков.

Для пояснения выделим самые основные особенности цифровой экономики:

Экономическая деятельность находится на различных платформах «цифровой» экономики;

Сервисные модели все персонифицированы;

Производители и потребители взаимодействуют непосредственно между собой;

Роль вклада индивидуальных участников довольно значительна. Исходя из особенностей можно выделить основные риски цифровой экономики:

-Дефицит квалифицированных кадров, а особенно в сфере информационной безопасности, а также знаний и технологий;

-Институциональные и инфраструктурные условия, необходимые цифровой экономике, также отсутствуют;

-Существует множество препятствий для создания и развития высокотехнологичных бизнесов в сфере цифровой экономики;

-Сильное опережение зарубежных стран от России в использовании и разработке ПО (программного обеспечения);

-Экономические агенты зависят от интернета.;

-Происходит реинжиниринг бизнес-процессов как предприятий, так и в целом отраслей;

-Утрата ряда профессии и как следствие стремительный рост безработицы и сокращение социальных гарантий трудящихся;

В течение реализации информационной безопасности происходит обеспечение безопасности и устойчивости информационной инфраструктуры. А также конкурентоспособности российских разработок и технологий, в том числе формирование эффективной системы защиты прав личности, бизнеса.

Для современных информационных систем довольно сложна оценка и управление рисками информационной безопасности [8]. Наиболее точно управлять вложениями в информационную безопасность, а также строить эффективные системы защиты информации с учетом планируемого ущерба, позволяет учет уровня рисков при проектировании комплексных систем с защитой информации.

Как следствие, можно выделить основные сложности практической реализации подходов к оценке рисков:

сложная формализация процедуры оценки рисков информационной безопасности;

а также формализация модели информационной системы как объекта управления рисками ИБ;

неточность главных факторов риска информационной безопасности;

потребность принятия решений о выборе системы защиты информации в условиях неопределенности и неполноты информации.

Существуют и положительные моменты внедрения цифровой экономики:

новые профессии;  
стремительное развитие технологий обеспечения безопасности и управления рисками;  
автоматизация промышленности, в том числе оказания услуг;  
развитие 3D-печати и иных технологий аддитивного производства;  
сокращение транзакционных издержек;  
повышение качества государственных электронных услуг как для бизнеса, так и для населения.

Уже сегодня цифровые технологии проникают во все сферы современной жизни и влияют на то как мы работаем, передвигаемся, учимся, получаем услуги, ведем домашнее хозяйство, развлекаемся и прочее. С каждым годом цифровые технологии становятся все более доступными, связанными между собой, они становятся быстрее, дешевле и мобильнее. В 2019 г. более 4 миллиардов человек, или более половины населения мира, пользуются Интернетом (2001 г. - 500 млн.). В России по данным Mediascope, в 2019 г. общая аудитория Интернета (пользователи в возрасте 12 - 64 лет) составила 109,6 миллионов, а уровень проникновения интернета составил 76% (в 2018 г. - 73%) [9].

Бурный рост использования информационных и коммуникационных технологий в экономике стал возможен благодаря техническому прогрессу и стремительному удешевлению трех компонентов: данные, аналитика и связь. Снижение стоимости сенсоров (более чем на 95 % с 2008 г.) привело к их широкому внедрению, что вызвало рост объема доступных данных и повсеместное распространение цифровой информации. Уменьшение стоимости вычислительных мощностей, развитие «облачных» технологий и «больших данных», прогресс в углубленной аналитике, включая машинное обучение, открывает новые возможности мониторинга, анализа, изучения процессов для получения полезной информации, формирования новых знаний и идей. Удешевление передачи данных через цифровые сети связи при повышении ее скорости, развитие технической возможности установки модулей передачи и обработки данных на датчики, сенсоры и небольшие устройства, а также анализ полученной информации создают условия для мобильного управления промышленными и бытовыми процессами.

В настоящее время цифровые технологии применяются в промышленности для управления технологическими процессами, повышения производительности и безопасности труда; на транспорте для управления светофорами, автоматического сбора платы за проезд, определения местоположения для помощи на дорогах; в жилых и общественных зданиях для учета использования энергоресурсов и автоматического регулирования работы инженерных систем и электроприборов. Появление и распространение таких технологий, как Интернет

вещей (IoT) и Интернет услуг (IoS), системы «умный дом» (smart home) и «умный город» (smart city), трансформируют требования к ведению бизнеса, предоставлению услуг, ведению домашнего хозяйства и могут существенно изменить модель экономики и образ жизни людей.

Перспективы использования цифровых технологий в основных секторах экономики и влияния на спрос на энергию. В промышленности применение облачных платформ для обмена информацией конкретного промышленного объекта с его смежниками, поставщиками, потребителями позволяет максимально эффективно использовать активы и минимизировать затраты энергии на перевозку сырья, полуфабрикатов и готовых изделий. Использование промышленных роботов и аддитивных технологий может привести к значительной экономии энергии, как на самих промышленных предприятиях, так и у его партнеров за счет улучшения качества продукции, уменьшения времени простоя и непроизводственных затрат, снижения объемов отходов производства [10].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время основным направлением улучшения работы большинства объектов энергетики является их модернизация. Реализация новых систем управления, а также создание единого цифрового пространства, как инструментов моделирования внедрения цифровых технологий в энергетику требует оценки новых видов рисков.

В современном положении энергетики России прослеживаются проблемы износа оборудования и недостаток инвестиционного капитала для развития отрасли. Совершив рывок в сторону технологического перевооружения и цифровизации, станет возможно существенно изменить энергетическую отрасль [12].

Следует отметить, что цифровая энергетика является будущим энергетической отрасли страны. Крупным компаниям, а также их партнёрам необходимо прикладывать максимум усилий и средств для того, чтобы вывести отрасль и цифровую экономику в целом на лидирующие позиции мирового рынка. Продолжив исследования в направлении цифровизации энергетики, станет доступно оценивать все рынки электроэнергетики, их поведение, а также прогнозировать деятельность компании в долгосрочной перспективе. Также необходимо провести ряд мероприятий: переход на новые технологии, и обеспечение большого объема хранения, обработки и передачи данных.

Цифровые технологии предоставляют новые возможности для улучшения энергоснабжения, повышения комфорта, снижения общего потребления энергии в жилых и коммерческих зданиях. Системы активного управления собирают, обрабатывают и анализируют данные в режиме

реального времени и позволяют управлять энергопотребляющими процессами с помощью единой интерфейсной панели. Применение цифровых технологий в отдельных отраслях может привести к экономии энергии. Таким образом, можно сказать, что процесс энергосбережения необходим предприятиями, именно от грамотного подхода к разработке мер по энергосбережению зависит будущее энергетического предприятия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панышин Б. Цифровая экономика: особенности и тенденции развития // Наука и инновации. 2016. №157.
2. Бридня Д.В., Сухарева Е.В. Цифровая экономика - будущее нашей страны / Энергетика, Информатика, Инновации - 2017. VII Международная научно-техническая конференция. 23-24 ноября 2017, Том 3, секции 6,7. - Смоленск: 2017. - С. 20-23
3. Купревич Т.С. Цифровые платформы в мировой экономике: современные тенденции и направления развития // Экономический вестник университета. Сборник научных трудов ученых и аспирантов. 2018. №37-1.
4. Тимофеев А.Г., Лебединская О.Г. Актуализация перехода от цифрового труда к цифровой фабрике // УЭКС. 2016. №3 (85).
5. Куприяновский В.П., Намиот Д.Е., Сиягов С.А. Кибер-физические системы как основа цифровой экономики // International Journal of Open Information Technologies. 2016. №2.
6. Добрынин А.П., Черных К.Ю., Куприяновский В.П., Сиягов С.А. Цифровая экономика - различные пути к эффективному применению технологий (BIM, PLM, CAD, IOT, Smart City, BIG DATA и другие) // International Journal of Open Information Technologies. 2016. №1.
7. Стефанова Н.А., Седова А. П. Модель цифровой экономики // КИЖ. 2017. №1 (18).
8. Куприяновский В.П., Сиягов С.А., Намиот Д.Е., Уткин Н.А., Николаев Д.Е., Добрынин А.П. Трансформация промышленности в цифровой экономике - экосистема и жизненный цикл // International Journal of Open Information Technologies. 2017. №1.
9. Куприяновский В.П., Добрынин А.П., Сиягов С.А., Намиот Д.Е. Целостная модель трансформации в цифровой экономике - как стать цифровыми лидерами // International Journal of Open Information Technologies. 2017. №1.
10. Эскиндаров М.А., Масленников В.В., Масленников О.В. Риски и шансы цифровой экономики в России // Финансы: теория и практика. Том 23, № 5 (2019). - С.6-17.
11. Сухарева Е.В., Скиба М.С. Внедрение цифровых технологий в энергетику России // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIII Меж. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022 С 129-131.
12. Скиба М.С., Бологова В.В. Управление трудовыми ресурсами на предприятиях энергетики в условиях цифровизации // Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIII Меж. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022 С 158-165.

*А.Ю. Амелина<sup>1</sup>, А.С. Румтер<sup>2</sup>*

1, 2 Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ТАРИФОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье представлен обзор научной литературы по теме исследования, рассмотрены процесс установления регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике, особенности государственной политики и направления цифровизации тарифообразования в РФ, приведена статистика контрольно-надзорных мероприятий в области государственного регулирования цен (тарифов), обоснована необходимость применения цифровых технологий при реализации данных мероприятий, а также отражены выделенные лично автором виды эффектов цифровой трансформации тарифообразования в электросетевом комплексе.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня цифровизация является общемировым трендом. Одно из ее направлений сводится к совершенствованию тарифного регулирования в электроэнергетике, упрощению и ускорению процесса установления регулируемых цен (тарифов).

С одной стороны, цифровое тарифообразование способно сократить издержки органов регулирования, улучшить их взаимодействие с электросетевыми организациями, повысить прозрачность и экономическую обоснованность устанавливаемых регулируемых цен (тарифов), уменьшить число допускаемых регулирующими органами ошибок и ослабить контроль ФАС России за уровнями тарифов на передачу электрической энергии в субъектах Российской Федерации. С другой стороны, с его внедрением появятся риски возникновения технических сбоев, сложности с унификацией требований ведения организациями учета, формированием единого информационного потока и возможностью автоматической проверки достоверности данных. Регулирующие органы и компании понесут издержки, связанные с полным переходом на электронный документооборот. В итоге возникнет необходимость постоянной корректировки цифрового механизма контроля регулируемых цен (тарифов) в новой цифровой реальности ввиду постоянно происходящих в законодательстве изменений.

Таким образом, совершенствование организационного механизма взаимодействия электросетевых организаций и органов регулирования в процессе установления тарифов на передачу электрической энергии в условиях цифровизации требует его подробного исследования, выработки и

апробации нововведений, а также оценки эффектов от их внедрения.

### **2. ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЦЕН (ТАРИФОВ) В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Процесс установления регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике отражен в Правилах государственного регулирования (пересмотра, применения) цен (тарифов) в электроэнергетике, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 29.12.2011 № 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике» [1].

Согласно пункту 9(1) Правил № 1178 прежде чем обратиться в орган регулирования с заявлением об установлении тарифов на передачу электрической энергии сетевая организация обязана опубликовать предложение о размере указанных тарифов и долгосрочных параметров регулирования в порядке, предусмотренным постановлением Правительства Российской Федерации от 21.01.2004 № 24 «Об утверждении стандартов раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии» [2].

В пункте 12 Правил № 1178 указано, что регулируемая организация до 1 мая года, предшествующего очередному периоду регулирования, представляет в регулирующий орган предложение (заявление) об установлении регулируемых цен (тарифов) с приложением подлинных обосновывающих материалов или их надлежащим образом заверенных копий. Не позднее чем за 30 рабочих дней до начала очередного периода регулирования сетевая организация имеет право направить в орган регулирования дополнительные материалы.

Пункт 17 Правил № 1178 содержит исчерпывающий перечень обосновывающих материалов, необходимых для установления тарифов на передачу электрической энергии. В него входят в том числе балансы электрической энергии и мощности, бухгалтерская и статистическая отчетность за последний отчетный период; расчеты полезного отпуска электрической энергии, расходов, необходимой валовой выручки и тарифов; инвестиционная программа, программа энергосбережения, правоустанавливающие документы и др.



В соответствии с пунктом 19 Правил № 1178 орган регулирования вправе запросить дополнительные обосновывающие материалы. На ответ на запрос регулируемая организация имеет 7 рабочих дней с момента его поступления.

Согласно абзацу 2 пункта 20 Правил № 1178 регулирующий орган в течение 14 рабочих дней с момента получения предложения об установлении тарифов на передачу электрической энергии анализирует представленные материалы и извещает сетевую организацию об открытии тарифного дела.

В пункте 22 Правил № 1178 указано, что орган регулирования не позднее 20 декабря года, предшествующего регулируемому периоду, проводит экспертизу предложения об установлении регулируемых цен (тарифов). Эксперты – сотрудники регулирующего органа или сторонних организаций – формируют экспертное заключение, которое в соответствии с пунктом 23 Правил № 1178 помимо общих мотивированных выводов и рекомендаций должно содержать:

- 1) оценку достоверности данных, приведенных в предложениях об установлении цен (тарифов) и (или) их предельных уровней;
- 2) оценку финансового состояния организации, осуществляющей регулируемую деятельность;
- 3) анализ основных технико-экономических показателей за 2 предшествующих года, текущий год и расчетный период регулирования;
- 4) анализ экономической обоснованности расходов по статьям расходов;
- 5) анализ экономической обоснованности величины прибыли, необходимой для эффективного функционирования организаций, осуществляющих регулируемую деятельность;
- 6) сравнительный анализ динамики расходов и величины необходимой прибыли по отношению к предыдущему периоду регулирования;
- 7) анализ соответствия расчета цен (тарифов) и формы представления предложений нормативно-методическим документам по вопросам регулирования цен (тарифов) и (или) их предельных уровней;
- 8) анализ соответствия организации критериям отнесения владельцев объектов электросетевого хозяйства к территориальным сетевым организациям.

В силу пункта 24 Правил № 1178 при отсутствии каких-либо обосновывающих материалов регулирующий орган имеет право установить тарифы на основании результатов проверки хозяйственной деятельности регулируемой организации или имеющихся данных за предыдущие периоды регулирования.

Орган регулирования обязан проверить организацию на соответствие критериям отнесения владельцев объектов электросетевого хозяйства к территориальным сетевым организациям, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 28.02.2015 № 184 «Об отнесении владельцев объектов электросетевого хозяй-

ства к территориальным сетевым организациям» [10]. В случае несоответствия указанным критериям организация уведомляется об отсутствии оснований для установления в отношении нее тарифов на передачу электрической энергии.

Согласно пункту 25 Правил № 1178 решение об установлении регулируемых цен (тарифов) принимается на заседании коллегиального органа органа регулирования. За 10 дней до заседания регулируемая организация должна быть извещена о его дате, времени и месте. За день до заседания она имеет право ознакомиться с материалами тарифного дела, в том числе с проектом решения.

В силу пункта 30 Правил № 1178 решение, принятое на заседании коллегиального органа регулирующего органа, а также его протокол в течение 7 рабочих дней доводятся до регулируемой организации и публикуются на сайте органа регулирования в сети Интернет.

Механизм взаимодействия сетевой организации и органа регулирования при установлении в отношении нее тарифов является трудоемким, излишне бюрократичным в силу необходимости очного представления компаниями огромного объема обосновывающих материалов, частого изменения форм подачи сведений, использования при этом разных видов документооборота, запроса регулирующими органами дополнительной и зачастую избыточной информации и повторения данных итераций из года в год.

В рамках открытия тарифных дел регулируемые организации представляют десятки тысяч листов документов, которые органам регулирования необходимо проанализировать на предмет экономической обоснованности.

Непроведение органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации в области государственного регулирования цен (тарифов) должного экономического анализа обосновывающих материалов может вести к установлению тарифов на высоком уровне, что негативно сказывается на платежеспособности населения, или недорегулированию организаций (недодаче НВВ), как следствие, повышению аварийности электросетевых объектов и частоты отключений, снижению надежности и качества оказываемых услуг.

Неиспользование электронных и облачных сервисов существенно затрудняет процесс обработки регулирующими органами обосновывающих материалов, как следствие, увеличивает вероятность допущения ими нарушений при установлении регулируемых цен (тарифов), а также усложняет их хранение и передачу другим органам власти (например, ФАС России при проведении документарной проверки регулирующего органа, органам прокуратуры, Следственному комитету и т. д.).

В условиях новой цифровой реальности открываются широкие возможности для совершенствования механизма взаимодействия регулируемых организаций и органов регулирования при установлении тарифов, результатами которого мо-

жет стать достижением множества положительных эффектов для стейкхолдеров.

### **3. ПОЛИТИКА В ОБЛАСТИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЦЕН (ТАРИФОВ)**

Указом Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 утверждена Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы, призванная в том числе повысить эффективность государственного управления и сформировать цифровую экономику [3].

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 21.07.2021 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» [4], провозглашающим одним из стратегических задач развития нашей страны начало использования в отраслях ТЭК «сквозных» цифровых технологий, их «приложение» к государственной контрольно-надзорной деятельности в энергетике, разработана Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 года № 1523-р. Энергетическая стратегия предполагает осуществление цифровой и интеллектуальной трансформации ТЭК, повышение в связи с этим качества, надежности и эффективности энергоснабжения, оказание государством поддержки инновационных проектов, связанных с применением «сквозных» цифровых технологий [5].

Одним из мероприятий Энергетической стратегии является цифровизация тарифного регулирования. К 2023 году в рамках Национального плана развития конкуренции в Российской Федерации на 2021-2025 годы ФАС России планирует создать единый тарифный портал сбора и анализа данных на базе ФГИС ЕИАС [6].

В состав национального проекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации», утвержденного президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протоколом от 04.06.2019 № 7), со сроком реализации 01.10.2018-31.12.2024 входит федеральный проект «Цифровое государственное управление» [7]. В рамках него Министерство энергетики Российской Федерации разработало ведомственный проект «Цифровая энергетика» на период до 2024 года, предусматривающий формирование условий для создания, внедрения и дальнейшего совершенствования цифровых сервисов; выстраивание системы управления, координации и мониторинга цифровой трансформации энергетики; повышение удобства и защищенности взаимодействия государства, компаний ТЭК и потребителей на основе внедрения цифровых решений [8].

Одним из параметров целевой модели долгосрочного тарифного регулирования в Концепции внедрения механизмов тарифообразования для организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности, на долгосрочный период от

26.06.2021 № 6571п-П51, утвержденной Аппаратом Правительства Российской Федерации, является создание Единой тарифной платформы, синхронизирующей размещенные в множественных ГИС сведения, обеспечивающей эффективное межведомственное взаимодействие, усовершенствующей инструменты раскрытия регулируемыми организациями информации, улучшающей работу калькулятора коммунальных платежей [9].

Таким образом, на данный момент в Российской Федерации наметились довольно четкие ориентиры и перспективы цифровизации системы государственного регулирования цен (тарифов), вызовы, риски, возможности, позитивные и негативные эффекты от которой в своих работах рассматривают многие отечественные ученые.

### **4. НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЦЕН (ТАРИФОВ) В НАУЧНЫХ ТРУДАХ**

Исследователи Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации Т. Радченко, Е. Ковалева, С. Малых, А. Волков и Е. Герасимова полагают, что, помимо сокращения издержек органов регулирования и регулируемых организаций, повышения прозрачности процесса тарифообразования, тарифное регулирование в цифровом формате несет в себе ряд недостатков: необходимость крупных компаний, ведущих преимущественно бумажный документооборот, сканировать всю имеющуюся у них документацию для отправки органам власти, внедрять систему электронного документооборота и получать квалифицированные электронные подписи; сложность унификации требований ведения организациями учета, обусловленная различными масштабами деятельности и, как следствие, возможностями производить более детальный анализ данных; высокие затраты, возникающие в связи с внесением корректировок в электронные шаблоны для сбора сведений организаций, обусловленных частыми изменениями в тарифном законодательстве. Кроме этого, аналитики указывают на существенную затрудненность интеграции дублирующих друг друга ГИС и аналогичных региональных информационных систем; избыточность предоставляемой в органы регулирования информации; отсутствие четкого перечня документов и унифицированных форм отчетности, сдаваемых в различные контрольные органы, объясняющее необходимость выстраивания межведомственного документооборота [10, С. 56-64, 159-162].

Ученые Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» Е.В. Яркин, И.А. Долматов, О.А. Москвитин, М.А. Панова и др. называют создание единой качественной информационной системы регулирования одним из вызовов реализации в России тарифной политики. Они сетуют на сложность констатации прозрачности процесса тарифного регулирования в силу огромного объема данных, раскрываемых организациями, физической невозможности проверить их достоверность; на

наличие множества ведомственных информационных систем, приводящее к дублированию информации, усложняющему работу органов регулирования; избыточность массива данных для проведения их сплошного обследования. Исследователи предлагают решить эти проблемы с помощью создания специализированного центра информации и анализа инфраструктурных отраслей, унификации информационных потоков и сокращения объема собираемых данных о регулируемых организациях при условии повышении их качества и обеспечения достоверности. При этом они отмечают успехи, достигнутые в области цифрового тарифного регулирования: функционирование ГИС, «федерального тарифного светофора», калькулятора конечных цен на электроэнергию, интерактивных карт цен и тарифов [11, С. 18-19, 55-69, 159-167].

Ученый Санкт-Петербургского государственного университета Н.В. Попов предлагает осуществить цифровую трансформацию тарифного регулирования в электроэнергетике и ЖКХ в несколько этапов: автоматизировать действующую систему тарифного регулирования, минимизировать человеческий фактор и повысить прогнозируемость тарифов; дерегулировать энергетический рынок с помощью внедрения технологий больших данных, интернета вещей, искусственного интеллекта и саморегулируемых платформенных решений, предоставляющих равный доступ участникам системы [12].

Кандидат экономических наук В.Ю. Шведова рассматривает способы модернизации тарифообразования в условиях цифровизации и возможности учета планов развития регионов при установлении регулируемых цен (тарифов), делает акцент на необходимости осуществления тарифного регулирования с точки зрения энергоэффективности организаций, предлагает метод оценки эффективности государственного регулирования цен (тарифов), основанный на географической визуализации [13].

Государственные гражданские служащие ФАС России В.Г. Королев, И.А. Капитонов, Д.В. Бердников и др. полагают, что необходимо сделать ФГИС ЕИАС единой информационной системой, усовершенствовать функционал «федерального тарифного светофора», проверяющего обоснованность тарифов сетевых компаний, внедрить систему искусственного интеллекта в процесс тарифообразования, распространить практику заполнения единых электронных таблиц-шаблонов, создать новые государственные сервисы для потребителей: единый портал раскрытия информации о регулируемых организациях, усовершенствованный калькулятор коммунальных платежей, мобильное приложение, предоставляющее гражданам возможность получать и проверять счета за коммунальные услуги, узнавать сведения об оказывающих их субъектах рынка, обращаться в органы государственного тарифного регулирования, а также всероссийскую базу коммунальной и энергетической инфраструктуры [14].

Сотрудники Комитета экономического развития и инвестиционной деятельности Ленинградской области Н.В. Попов и Комитета по тарифам и ценовой политике Ленинградской области А.В. Кийски предлагают создать автоматизированную систему тарифного регулирования, способную моделировать регулируемые цены (тарифы) для всех или отдельно взятых организаций региона на долгосрочную перспективу, учитывать при этом множество параметров, в том числе утвержденные инвестиционные программы и заключенные концессионные соглашения [15].

Учитывая вышеизложенное, направления цифровизации тарифообразования, изложенные в научных трудах, могут быть использованы органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации с целью повышения прозрачности процесса установления регулируемых цен (тарифов), их экономической обоснованности, надежности электросетевого комплекса, качества оказываемых регулируемых организациями услуг и удовлетворенности потребителей.

## **5. СТАТИСТИКА КОНТРОЛЬНО-НАДЗОРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ОБЛАСТИ ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЦЕН (ТАРИФОВ) В ЭЛЕКТРОСЕТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ**

Необходимость внедрения цифровых технологий в государственное регулирование цен (тарифов) в электросетевом комплексе подтверждают статистические данные.

По данным за 2021 год в электроэнергетике, теплоснабжении, водоснабжении и водоотведении, обращении с твердыми коммунальными отходами регулирующую деятельность осуществляют более 28,5 тыс. организаций, в отношении которых региональными органами регулирования ежегодно принимаются порядка 71 тыс. тарифных решений. В среднем в году 247 рабочих дней. Следовательно, ФАС России ежедневно необходимо проверять экономическую обоснованность размеров 287 регулируемых цен (тарифов), что является довольно трудоемкой задачей.

С 2015 года по настоящий момент времени Управлением регионального тарифного регулирования ФАС России в рамках мониторинга, документальных проверок региональных органов регулирования, поданных заявлений об отмене тарифных решений и заявлений о рассмотрении досудебных споров и разногласий в области государственного регулирования цен (тарифов) в электросетевом комплексе было проведено 353 контрольно-надзорных мероприятия (табл. 1).

По их результатам ФАС России выявила нарушения законодательства в области государственного регулирования цен (тарифов) в электроэнергетике и предписала исключить из НВВ / включить в НВВ регулируемых организаций расходы в следующих размерах (табл. 2).

Исключение из НВВ регулируемых организаций расходов обусловлено отсутствием их

экономической обоснованности и произведено в интересах потребителей электрической энергии. Включение в НВВ регулируемых организаций расходов осуществлено с целью обеспечения их экономически обоснованным объемом финансовых ресурсов, необходимых для осуществления регулируемой деятельности. Указанные решения приняты ФАС России в соответствии с принципом обеспечения соблюдения баланса экономических интересов электросетевых компаний и потребителей электрической энергии.

**Таблица 1. Число контрольно-надзорных мероприятий в области государственного регулирования цен (тарифов) в электросетевом комплексе, проведенных Управлением регионального тарифного регулирования ФАС России в 2015-2022 годах**

Год	Контрольно-надзорные мероприятия, ед., в рамках:				
	Проверок	Заявлений об отмене тарифных решений	Мониторинга	Заявлений о рассмотрении досудебных споров	Итого
2015	-	4	-	7	11
2016	8	8	-	22	38
2017	30	12	4	21	67
2018	24	11	3	24	62
2019	57	3	10	22	92
2020	15	2	1	22	40
2021	16	2	-	19	37
2022	6	-	-	-	6
Итого	156	42	18	137	353

Примечание:

- Составлено автором.

**Таблица 2. Суммы подлежащих исключению из НВВ / включения в НВВ регулируемых организаций расходов, выявленных по результатам контрольно-надзорных мероприятий в области государственного регулирования цен (тарифов) в электросетевом комплексе, проведенных Управлением регионального тарифного регулирования ФАС России в 2015-2022 годах**

Год	Исключение (-) / включение (+) расходов из / в НВВ, тыс. руб., выявленное в рамках:			
	Проверок	Заявлений об отмене тарифных решений	Заявлений о досудебном урегулировании споров	Итого
2015	-	-	+34 578,01	+34 578,01
2016	-382 763,47	-	-596 614,21	-979 377,68
			+5 956 430,62	+5 956 430,62
2017	-2 901 507,84	-	-82 247,25	-2 983 755,09
			+1 782 410,78	+1 782 410,78
2018	-8 217 517,40 +1 117 936,00	-99 890,00	-862 607,19	-9 080 124,59
			+1 816 564,97	+2 934 500,97
2019	-6 484 657,83 +51 578,83	-	-96 143,90	-6 580 801,73
			+3 040 156,07	+3 091 734,9
2020	-773 682,00 +1 687 531,90	-	-113 496,97	-887 178,97
			+8 908 921,99	+10 596 453,89
2021	-2 313 668,13	-	-182 784,60	-2 496 452,73
			+8 211 323,43	+8 211 323,43
2022	-	-	-	-
Итого	-21 073 796,67 +2 857 046,73	-99 890,00	-1 933 894,12	-23 007 690,79
			+29 750 385,87	+32 607 432,60

Примечание:

- Составлено автором.

Наиболее часто органы регулирования электросетевых организаций допускают следующие нарушения:

- отсутствие достаточного экономического анализа расходов, неразнесение их по регулируемым видам деятельности;
- наличие двойного учета расходов;
- учет договоров, заключенных без проведения торгов;
- отсутствие расшифровки и калькуляции принятых расходов;
- определение расходов на оплату труда с превышением численности персонала или тарифной ставки, без учета Отраслевого тарифного соглашения в электроэнергетике и Рекомендаций о едином порядке оплаты труда по тарифным ставкам (должностным окладам) работников электроэнергетики, разработанных ОАО «ЦОТЭнерго»;
- определение расходов на аренду по ранее действующей методике;
- учет в амортизации планируемых к вводу в эксплуатацию основных средств или имущества первоначальной стоимостью менее 100 тыс. руб., неверное определение СПИ;
- включение в НВВ убыточных организаций налога на прибыль;
- определение расходов на реализацию инвестиционных программ с учетом НДС;
- применение некорректных ИПЦ;
- непроведение корректировок НВВ и др.

Цифровизация способна существенным образом снизить их количество.

Если рассматривать перечень вышеуказанных наиболее часто допускаемых органами регулирования нарушений, можно предположить, что автоматизация процесса установления регулируемых цен (тарифов) может свести их все (за исключением такого нарушения, как отсутствие достаточного экономического анализа расходов, т. к. его проведение требует гибкости человеческого мышления и не может быть «переложено» на искусственный интеллект и роботов) к нулю, а исключение экономически необоснованных расходов из НВВ регулируемых организаций или их недорегулирование – к минимуму.

## 6. ЭФФЕКТЫ ЦИФРОВИЗАЦИИ ТАРИФНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В рамках цифровой трансформации тарифообразования ключевыми задачами являются:

- разработка единых электронных форм подачи обосновывающих материалов, которая позволит сократить число запросов органов регулирования и распространить единую методологию ведения документооборота;
- разработка единых форм экспертных заключений;
- создания личного кабинета для осуществления взаимодействия регулируемых организаций и органов регулирования, улучшение его качества и сокращение длительности;
- оказание регулируемым организациям консультативной и методологической помощи в онлайн-формате.

Комитет по ценам и тарифам Московской области стал «первопроходцем» в области цифровизации тарифного регулирования и разработал проект, направленный на:

- создание универсального шаблона расчета тарифов, внедрение личного кабинета для взаимодействия регулируемых организаций с органом регулирования;
- формирование автоматизированной информационной аналитической системы «Тариф»;
- разработку электронного архива;
- интеграцию баз данных с внешними информационными системами;
- налаживание электронного документооборота в органе регулирования, автоматизацию управления корреспонденцией, возможность использования ЭЦП.

Эффектами от внедрения Комитетом по ценам и тарифам Московской области цифровых технологий в тарифообразование стало снижение более чем в 6 раз числа отказов в установлении регулируемых цен (тарифов), вызванных по большей части несовершенством организационного механизма взаимодействия органа регулирования и регулируемых организаций; снижение более чем в 5 раз количества досудебных тарифных споров и разногласий, а также судебных дел с помощью запуска личного кабинета, посредством которого компании могут направить запрос или жалобу

представителю Комитета по ценам и тарифам Московской области; сокращение объемов обосновывающих материалов, автоматизация стандартных вычислений, повышение охвата проверяемых на предмет завышения тарифов организаций с 4% до 100%, аккумулирование отчетности в едином электронном хранилище, а также снижение платы за коммунальные услуги для миллиона сельских жителей [16].

Таким образом, можно выделить следующие положительные эффекты цифровизации тарифообразования (табл. 3).

Таблица 3. Эффекты цифровизации тарифообразования

Для органов регулирования	Для регулируемых организаций	Для потребителей
сокращение время- и трудоемкости принятия тарифных решений	сокращение время- и трудоемкости представления обосновывающих материалов	экономически обоснованные регулируемые цены (тарифы)
сокращение числа нарушений	прозрачность тарифообразования	сокращение числа отключений электроэнергии
оптимизация хранения документов	обеспечение достаточным для осуществления регулируемой деятельности объемом финансовых средств	повышение надежности электросетевого комплекса и качества услуг
улучшение взаимодействия в процессе тарифообразования		достойное качество жизни

Примечание:

- Составлено автором.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования было установлено, что существует много научных трудов, посвященных процессу регулирования цен (тарифов) с применением цифровых технологий. Однако вопросы, связанные с оценкой полезных эффектов для заинтересованных сторон, представлены недостаточно широко. Поэтому в дальнейшем исследование автора будет посвящено аспектам совершенствования механизма взаимодействия сторон в процессе установления регулируемых цен (тарифов) в электросетевом комплексе и вопросам оценки полезных эффектов цифровизации данного процесса.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГИС — государственная информационная система;

ед. — единица;

ЖКХ — жилищно-коммунальное хозяйство;

млрд. — миллиард;

ИПЦ — индекс потребительских цен;

НВВ — необходимая валовая выручка;

НДС — налог на добавленную стоимость;

Правила № 1178 — Правила государственного регулирования (пересмотра, применения) цен (тарифов) в электроэнергетике, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 29.12.2011 № 1178

«О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике»;  
руб. — рубль;  
тыс. — тысяча;  
СПИ — срок полезного использования;  
ТЭК — топливно-энергетический комплекс;  
ФАС России — Федеральная антимонопольная служба;  
ФГИС ЕИАС — федеральная государственная информационная система «Единая Информационно-Аналитическая система»;  
Энергетическая стратегия — Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 года № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года»;  
ЭЦП — электронная цифровая подпись.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 29.12.2011 № 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике».
2. **Постановление** Правительства Российской Федерации от 21.04.2004 № 24 «Об утверждении стандартов раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии».
3. **Указ** Президента Российской Федерации от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы».
4. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».
5. **Указ** Президента Российской Федерации от 21.07.2010 № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года».
6. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 02.09.2021 № 2424-р «Об утверждении Национального плана («дорожной карты») развития конкуренции в Российской Федерации на 2021-2025 годы».
7. **Протокол** президиума Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам от 04.06.2019 № 7 «Об утверждении Паспорта национального проекта «Национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации»».
8. **Ведомственный проект** «Цифровая энергетика». URL: <https://minenergo.gov.ru/node/14559?ysclid=11sz9vai1w> (дата обращения: 11.05.2022).
9. **Концепция** внедрения механизмов тарифообразования для организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности, на долгосрочный период от 29.06.2021 № 6571п-П51, утвержденная Аппаратом Правительства Российской Федерации.
10. **Цифровизация** тарифного регулирования: на примере сферы водоснабжения и водоотведения. URL: <https://ac.gov.ru/publications> (дата обращения: 11.05.2022).
11. **Тарифная** политика в Российской Федерации в отраслях коммунальной сферы: приоритеты, проблемы, перспектива: докл. к XXI Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 2020 г. / Е. В. Яркин, И. А. Долматов (рук. авт. кол.), М. А. Панова и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2020. 174 с.
12. **Попов Н.В.** Эволюция государственного регулирования тарифов в сфере энергетики и ЖКХ на основе перехода к системе умного регулирования // Управленческое консультирование. 2021. № 6. С. 148–157.
13. **Шведова В.Ю.** Методы экономического регулирования деятельности территориальных сетевых организаций: автореф. дис. ... канд. эк. наук: 08.00.05 / В.Ю. Шведова: ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» М., 2021. 24 с.
14. **Реализация** концепции долгосрочного тарифного регулирования в Российской Федерации / В.Г. Королёв, И.А. Капитонов, Д.В. Бердников [и др.]. Выкса: Издательство ИКСА, 2021. 132 с.
15. **Кийски А.В., Попов Н.В.** Цифровизация тарифного регулирования как инструмент достижения баланса экономических интересов участников рынка энергетики и ЖКХ // Теория и практика управления государственными функциями и услугами. Тарифное регулирование: Сборник научных трудов по итогам II национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 07 ноября 2019 года / под ред. И.В. Федосеева. СПб.: СПбГЭУ, 2019. С. 76-81.
16. **Центр** подготовки руководителей и команд цифровой трансформации ВШГУ РАНХиГС. URL: <https://cdto.ranepa.ru/case2> (дата обращения: 13.05.2022).



*П.И. Пысина, И.М. Бернадинер, П.В. Хорева*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ТЕПЛОВОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ ПЕЧИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье представлена разработанная технологическая схема установки высокотемпературного обезвреживания медицинских отходов классов Б и В, а также приведены результаты по топливно-энергетическим затратам. Для ознакомления с классами медицинских отходов был приведен действующий на сегодняшний день в Российской Федерации нормативный документ, разделивший их по уровню опасности. Приведены результаты материального и теплового расчетов вращающейся барабанной печи. Проведен экономический анализ высокотемпературной печи для утилизации опасных медицинских отходов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В Российской Федерации наблюдается значительный рост объемов образования медицинских отходов (далее МО). Во многих больницах и медицинских учреждениях по всей стране остро ощущается нехватка надежного и экологически эффективного оборудования по дезинфекции и обезвреживанию опасных отходов.

Безопасная утилизация МО имеет важное значение в любое время, особенно сейчас, когда глобальная пандемия коронавируса (COVID-19) продолжает оказывать воздействие на многие страны. Каждый компонент отходов может потенциально распространять болезни, если о нем не позаботиться должным образом.

На сегодняшний день объем образования медицинских отходов вырос примерно на 30 %, по сравнению с 2018 г. Вопрос их утилизации актуален и требует незамедлительного решения.

Помимо этого, в стране очень важным является экономия топливно-энергетических ресурсов и охрана окружающей среды. Цены на топливо и электроэнергию растут с неопределимой скоростью. И хотя Россия обладает большими запасами ресурсов, они не бесконечны. В связи с этим необходимо стремиться к снижению топливно-энергетических затрат за счет проведения эффективных энергосберегающих мероприятий.

Для решения вышеперечисленных проблем авторами разработана и исследована технологическая схема установки высокотемпературного обезврежи-

вания медицинских отходов с применением вращающейся барабанной печи.

### **2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ**

Существуют различные классификации медицинских отходов по степени опасности для экологии и живых существ.

Отходы собирают, хранят, перевозят и уничтожают согласно классу их опасности.

В Российской Федерации действует согласно Постановлению Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года №3 Об утверждении СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» [1]. Этот документ разделил отходы на классы по уровню их опасности для человека и природы.

Приведенная ниже таблица 1 «Классификация медицинских отходов» помогает сориентироваться в многообразии отходов, образующихся в медицинских учреждениях.

Таблица 1. Классификация медицинских отходов [1]

Класс опасности	Характеристика морфологического состава
Класс А Безопасные отходы	Отходы, не имеющие контакта с биологическими жидкостями пациентов, инфекционными больными. Канцелярские принадлежности, упаковка, мебель, инвентарь, потерявшие потребительские свойства. Пищевые отходы центральных пищеблоков, а также всех подразделений организации, осуществляющей медицинскую и/или фармацевтическую деятельность, кроме инфекционных, в т.ч. фтизиатрических.
Класс Б Опасные отходы	Инфицированные и потенциально инфицированные отходы. Материалы и инструменты, загрязненные кровью и/или другими биологическими жидкостями. Патолого-анатомические отходы. Органические операционные отходы. Пищевые отходы из инфекционных отделений, материалы, контактировавшие с больными инфекционными болезнями вызванными микроорганизмами 3 – 4 групп патогенности.
Класс В Чрезвычайно опасные отходы	Материалы, контактировавшие с больными инфекционными болезнями, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения и требуют проведения мероприятий по санитарной охране территории. Отходы из микробиологических, клинко-диагностических лабораторий, фармацевтических, иммунобиологических производств, работающих с микроорганизмами 1 – 2 групп патогенности. Биологические отходы вивариев, живые вакцины, непригодные к использованию. Отходы лечебно-диагностических подразделений фтизиатрических стационаров (диспансеров), загрязненные мокротой пациентов, отходы микробиологических лабораторий, осуществляющих работы с возбудителями туберкулеза.
Класс Г Токсикологически опасные отходы	Лекарственные, диагностические, дезинфицирующие средства, не подлежащие использованию. Ртутьсодержащие предметы, приборы и оборудование. Отходы сырья и продукции фармацевтических производств. Отходы от эксплуатации оборудования, транспорта, систем освещения и другие.
Класс Д Радиоактивные отходы	Все виды отходов, в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает допустимые уровни, установленные нормами радиационной безопасности.

### 3. ОПИСАНИЕ СХЕМЫ

На рис. 1 представлена технологическая схема установки высокотемпературного обезвреживания медицинских отходов. Термическое обезвреживание медицинских отходов происходит во вращающейся барабанной печи. В нее через автоматический узел загрузки бункерного типа, поступают медицинские отходы классов Б и В, через горелочное устройство подаются топливо – природный газ и горячий воздух с температурой 325 °С, а также реагент для нейтрализации HCl. В результате образуются отходящие газы, с температурой 1000 °С.

После 1-й ступени сжигания медицинских отходов, отходящие газы направляются в циклонную камеру дожигания. В нее подводится дополнительное топливо – природный газ и горячий воздух из воздухоподогревателя. На выходе из камеры дожигания температура отходящих газов составляет 1200 °С.

После процесса дожигания дымовые газы с температурой 1200 °С направляются в воздухоподогреватель, где происходит снижение их температуры до 1039 °С. Далее дымовые газы проходят через котел-утилизатор. В него подается питательная вода и образуется перегретый пар, а температура отходящих газов снижается до 500 °С. Пар поступает на паровую турбину, где вырабатывается механическая энергия. С помощью генератора она преобразуется в электрическую и направляется к потребителям и на собственные нужды комплекса.

Отработавший пар направляется в конденсатор, где происходит непрерывный процесс его конденсации за счет отдачи теплоты парообразования охлаждающей воды, подаваемой циркуляционным насосом. Удельный объем насыщенного пара значительно больше объема воды, и поэтому при конденсации образуется вакуум.

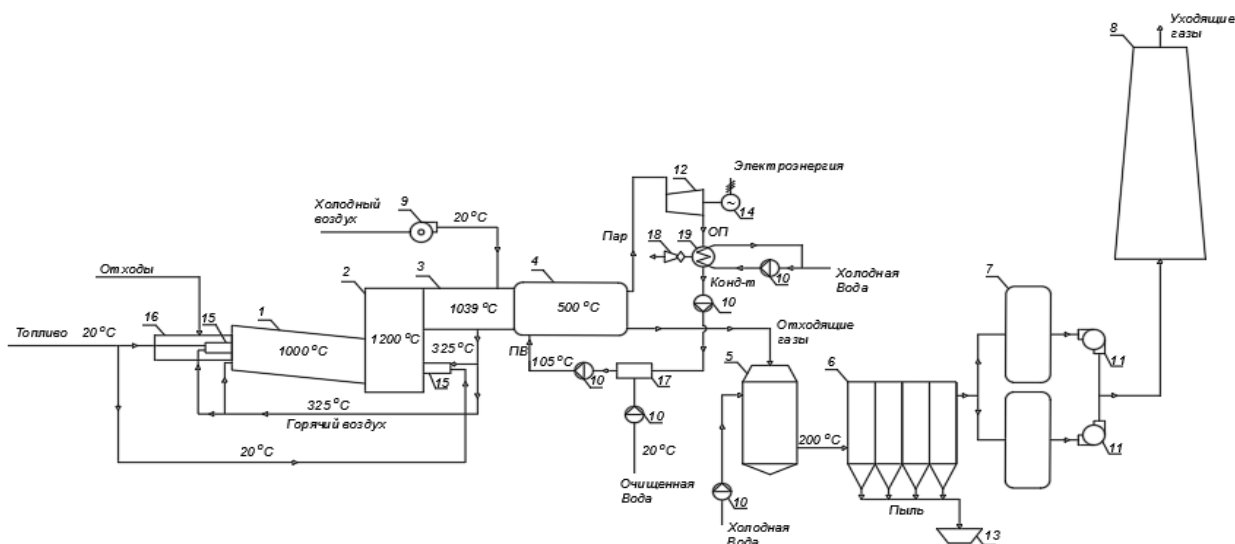


Рис. 1. Технологическая схема обезвреживания медицинских отходов: 1 – вращающаяся барабанная печь; 2 – камера дожига; 3 – воздухоподогреватель; 4 – котел-утилизатор; 5 – испарительный скруббер; 6 – рукавный фильтр; 7 – угольный фильтр; 8 – дымовая труба; 9 – воздуходувка; 10 – насос; 11 – дымосос; 12 – паровая труба; 13 – бункер; 14 – электрический генератор; 15 – горелочное устройство; 16 – загрузочный узел; 17 – деаэратор; 18 – эжектор; 19 – конденсатор.

Чтобы поддерживать создаваемое разрежение, необходимо непрерывно отсасывать воздух при помощи специального воздушного насоса (эжектора). Образующийся конденсат откачивается насосом, а затем поступает в деаэратор. На выходе образуется питательная вода с температурой 105 °С, которая направляется в котел-утилизатор. Благодаря такой системе, можно добиться необходимой энергоэффективности.

Отходящие газы с температурой 500 °С поступают в испарительный скруббер, где происходит резкое охлаждения до 200 °С, что позволяет практически мгновенно пройти температурный коридор, характеризующийся благоприятными условиями нового синтеза диоксинов (Температурный коридор варьируется в пределах 250 - 400 °С) [2].

На следующем этапе загрязненные газы проходят очистку от вредных примесей, поступая последовательно в рукавный [3] и в угольный фильтры [4].

Очищенные продукты сгорания при помощи дымососа направляются в дымовую трубу и далее в атмосферу.

Применение такой технологической схемы позволяет добиться высокой энергоэффективности и

соблюдения нормативных показателей выбросов вредных веществ.

### 3.1. Тепловой расчет вращающейся барабанной печи

Во вращающуюся барабанную печь производительностью 3 т/ч отходов (Рис. 2) подаются медицинские отходы классов Б и В в соотношении 1/4. Общий выход продуктов сгорания составил 5,031 м<sup>3</sup>пг/кг<sub>отх.</sub> В качестве дополнительного топлива используется природный газ «Московское кольцо» [5], общий выход продуктов сгорания которого составил 12,455 м<sup>3</sup>пг/м<sup>3</sup>т. В ходе выполнения расчета теплового баланса печи были найдены:

- Химическая теплота сгорания отходов.
- Физическая теплота отходов.
- Физическая теплота воздуха, идущего на окисление отходов.
- Химическая теплота сгорания топлива (природный газ).
- Физическая теплота воздуха, идущего на окисление топлива.
- Теплота нейтрализующего реагента.
- Теплота отходящих газов.
- Теплота, затраченная на испарение влаги, содержащейся в отходах.
- Потери теплоты в окружающую среду.

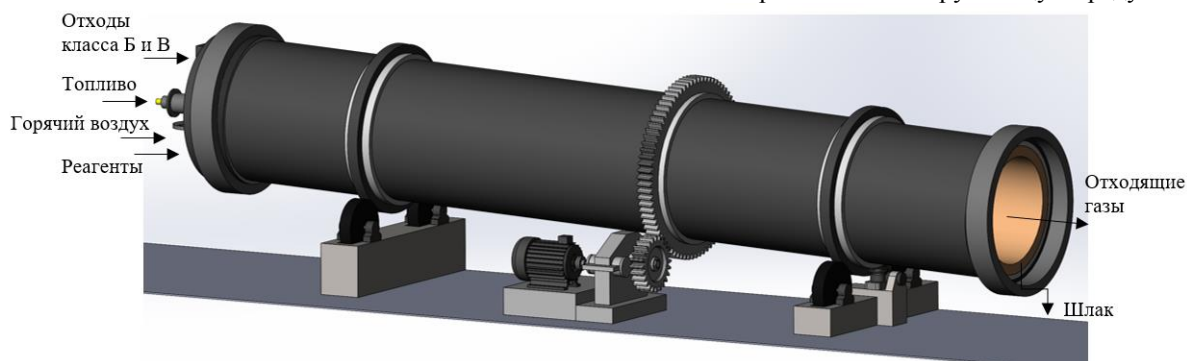


Рис. 2. Вращающаяся барабанная печи

#### 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Энергосбережение – это уменьшение потребления топлива, тепловой и электрической энергии за счет их наиболее полного и рационального использования во всех сферах деятельности человека. На разработанной установке высокотемпературного обезвреживания медицинских отходов можно снизить потребление дополнительного топлива за счет уменьшения всех видов тепловых потерь при эксплуатации вращающейся печи. Например, поддержание оптимального режима сжигания топлива с коэффициентом избытка воздуха, близким к единице.

Правильная дозировка окислителя и топлива имеет большое значение. С увеличением избытка воздуха резко уменьшается температура в зоне горения, а при большом избытке воздуха – может настолько снизиться, что возможен рост потерь теплоты с отходящими газами. Поэтому не рекомендуется подавать в печь воздуха больше, чем это необходимо для обеспечения нормального горения топлива. Недостаток воздуха, в свою очередь приводит к неполноте сгорания, т.е. повышению содержания оксида углерода в отходящих газах, что может привести к значительному увеличению расхода топлива.

Если на сжигание топлива подавать подогретый воздух, то это будет способствовать снижению расхода топлива.

В рабочую камеру печи подается горячий воздух из воздухоподогревателя. В работе было проведено исследование с использованием единицы переноса (метод  $\epsilon$ -NTU), результаты которого представлены на Рис. 3.

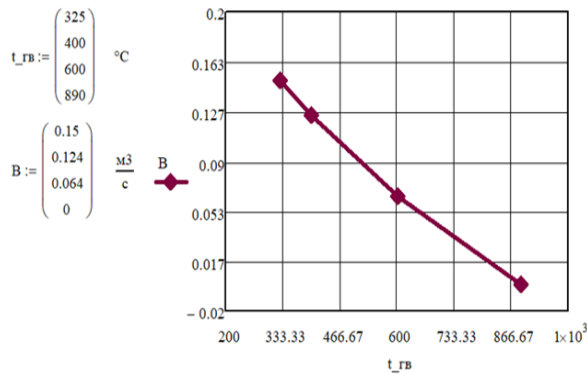


Рис. 3. Зависимость расхода топлива от температуры горячего воздуха

При  $NTU = 0,3$  температура горячего воздуха составила  $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ , отсюда расход природного газа  $0,15\text{ м}^3/\text{с}$ , а объем отходящих газов –  $31608,71\text{ м}^3/\text{ч}$ . С последующим увеличением  $NTU$  было выявлено, что при температуре горячего воздуха  $890\text{ }^{\circ}\text{C}$  расход топлива для вращающейся печи был равен 0, то есть отсутствовали затраты дополнительного топлива, а объем отходящих газов на выходе из печи составил примерно  $25\text{ }000\text{ м}^3/\text{ч}$ .

После предварительного экономического расчета было решено подобрать оптимальную  $NTU$  с

целью обеспечения полного горения топлива и уменьшения затрат.

Следует обратить внимание на то, что каждая единица теплоты, вносимая с подогретым воздухом, идущим на сжигание топлива, более ценна, чем полученная от горения топлива. Скорость горения газозвудушных смесей растет с повышением их температуры. Пределы воспламенения также расширяются, что улучшает процесс выгорания горючих составляющих и уменьшает необходимые расходы воздуха. Даже при сжигании такого высококалорийного топлива, как природный газ, для создания интенсивного нагрева необходимо подавать воздух, нагретый до температур  $300 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По итогам исследования было принято решение провести дальнейшие расчеты при температуре горячего воздуха  $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для выполнения расчета капитальных затрат по объекту проектирования определена стоимость устанавливаемого оборудования.

В таблице 2 представлены результаты стоимости каждого элемента вращающейся барабанной печи. Итоговая стоимость печи составила  $11709867,26\text{ руб.}$  Капитальные затраты по объекту проектирования складываются из следующего:

- Проектные и изыскательные работы:  $425600\text{ руб.}$
- Технический и авторский надзоры:  $57300\text{ руб.}$
- Государственная экспертиза:  $60000\text{ руб.}$
- Монтажные и пусконаладочные работы:  $731000\text{ руб.}$
- Стоимость оборудования:  $11709\text{ }867,26\text{ руб.}$
- Резерв средств на непредвиденные расходы:  $75000\text{ руб.}$

Таблица 2. Стоимость вращающейся печи

Наименование	Цена, руб.
Материал для вращающейся печи:	
- Углеродистая сталь	1975109,4
- Шамотный кирпич	147142,86
- Вермикулит обожженный	125351
Бандаж	2550000
Венцовая шестерня	345000
Узел подвенцовой шестерни	200000
Опорные ролики	3700000
Редуктор	1100000
Подшипники	207264
Муфта	100000
Электродвигатель	160000
Гидроупор	1100000

Сумма капитальных затрат составила  $13058767,26\text{ руб.}$

Для работы вращающейся барабанной печи расходуется определенное количество электроэнергии. Стоимость электроэнергии на 2022 год:  $6,17\text{ руб/кВт}\cdot\text{ч}$ . Принимаем, что оборудование работает  $7296\text{ ч/год}$ . С учетом всей потребляемой

мощности, затраты на электроэнергию составили 1692613,632 руб/год.

Для экономии электроэнергии в схему установки включен котел-утилизатор КУН 24/13 [6]. Он вырабатывает пар, который направляется в паровую турбину типа К-1,3-1000 и при помощи генератора преобразуется в электроэнергию, направляемую потребителям и на собственные нужды установки. В связи с этим затраты на электроэнергию сведены к минимуму.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день объем образования медицинских отходов вырос примерно на 30 %, по сравнению с 2018 г. Вопрос их утилизации актуален и требует незамедлительного решения.

Для утилизации большого числа опасных отходов и решения топливно-энергетических проблем была разработана высокотемпературная и экологически безопасная теплотехнологическая схема установки высокотемпературного обезвреживания медицинских отходов с применением вращающейся барабанной печи.

Проведено исследование с использованием метода  $\epsilon$ -NTU, после которого было найдено решение об экономии топливных затрат на оборудование. Для повышения энергоэффективности в схему был включен котел-утилизатор типа КУН 24/13. Он позволяет задействовать теплоту отходящих газов, вырабатывая пар. С ним в комплекте в схему включены паровая турбина и генератор, вырабатывающий электроэнергию. Проведен расчет капитальных затрат и затрат на энергетическое обслуживание вра-

щающейся барабанной печи. По оценке затрат на электроэнергию было определено, что они полностью замещаются электроэнергией, выработанной при сжигании отходов. В связи с этим можно сделать вывод, что предложенная схема энергоэффективна.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий», 28.01.2021 г. – 69с.
2. Диоксины и другие токсиканты при высокотемпературной переработке и обезвреживании отходов: учебное пособие/ И.М. Бернадинер; под ред. М.В. Киселевой. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 48 с.
3. Рукавный фильтр KE-8-128 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spacemotor.ru/c/rukavnye-filtry-tipa-ke-7/ke-324.html> (Дата обращения: 08.06.2022).
4. Угольный адсорбер [Электронный ресурс]. URL: <https://gas-cleaning.ru/product/coal-adsorber> (Дата обращения: 07.06.2022).
5. ПАО «Газпром» ООО «Газпром трансгаз Москва» Московское ЛПУМГ/ Паспорт № ГПП-2-04-2020 качества газа горючего природного за апрель 2020г.
6. Котел-утилизатор типа КУН 24/13 [Электронный ресурс]. URL: [https://sinref.ru/000\\_uchebniki/02550\\_kotli/002\\_parovie\\_kotli\\_maloi\\_moshosti\\_kotli\\_utilizatori/053.htm](https://sinref.ru/000_uchebniki/02550_kotli/002_parovie_kotli_maloi_moshosti_kotli_utilizatori/053.htm) (Дата обращения: 05.06.2022).

*Е.А. Пехова, Д.Г. Шувалова*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БАЛАНСА ИНТЕРЕСОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной статье рассмотрен путь достижения энергосбережения с помощью цифровизации, при соблюдении баланса интересов. Предложено решение для достижения системного эффекта на рынке электроэнергетики. Отражен экономический эффект от активного участия потребителя в энергосистеме.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Энергосбережение – одна из самых важных задач XXI века. Мы живем в мире, где энергетические ресурсы ограничены, стоимость энергии высока и происходит негативное влияние на окружающую среду, связанное с производством энергии, — всё это приводит к поиску альтернатив: стремление к снижению потребления энергии, нежели постоянное увеличение ее производства. Поэтому энергосбережение с каждым годом становится все более актуальной проблемой.

В рамках достижения энергоэффективности энергетики, в настоящее время, происходит трансформация энергетической сферы, где всё большую популярность обретает процесс цифровизации. Цифровизация – это внедрение цифровых технологий в разные сферы жизни для повышения её качества и развития экономики. Она помогает выполнять рутинные задачи и принимать решения без участия человека. Технологии, которые окажут наибольшее влияние на трансформацию энергетической сферы, включают в себя: продвинутую аналитику данных, в том числе искусственный интеллект, облачные и квантовые вычисления, роботизацию, носимые устройства и многое другое.

Рассматривая применение цифровизации, как достижение энергоэффективности с экономической точки зрения, то стоит выделить, что в основе достижения максимального экономического эффекта лежит соблюдение баланса интересов участников рынка энергетики.

### **2. БАЛАНС ИНТЕРЕСОВ ПРИ ЦИФРОВИЗАЦИИ**

Баланс интересов – это взаимосвязь заинтересованностей, желаний экономических субъектов,

которые могут быть представлены в форме постоянно изменяющихся показателей и характеризуются равновесной связью. Правильное соблюдение баланса, связей между субъектами рынка приведет к эффективному использованию ресурсов на производстве, а также получению экономически эффективного результата субъектам рынка, а не соблюдение приведет к экономическим потерям. Также следует помнить, что интересы субъектов всегда изменчивы, а значит необходимо корректировать или заново согласовывать условия взаимодействия. [1]

Чтобы нагляднее рассмотреть баланс интересов, происходящий в энергетике, была создана «Модель баланса интересов при цифровизации» (Рис. 1). В нем отражаются главные участники процесса цифровизации: поставщики ресурсов, рынок энергетики, регулирующие органы и конечные потребители.

Проанализировав модель баланса интересов можно выделить следующее:

- Поставщики ресурсов заинтересованы в том, чтобы за счет цифровизации процесс закупок был упрощен, где возможно дальнейшее снижение время-затрат и появление прозрачности действий, а также появляется необходимость в формировании новых специальностей. Цифровизация позволит получить выигрыш за счет появления новых рабочих мест, в которых нуждаются предприятия при внедренной цифровизации.
- Организации, действующие на рынке энергетики, имеют интерес к увеличению доходности и конкурентоспособности своей деятельности, но для того, чтобы этого достичь необходимо быстро адаптироваться в меняющихся условиях. Главным выигрышем для них является появление возможности экономии на затратах, а также формирование новой бизнес-модели, которая поможет принимать верные, а главное, приносящие



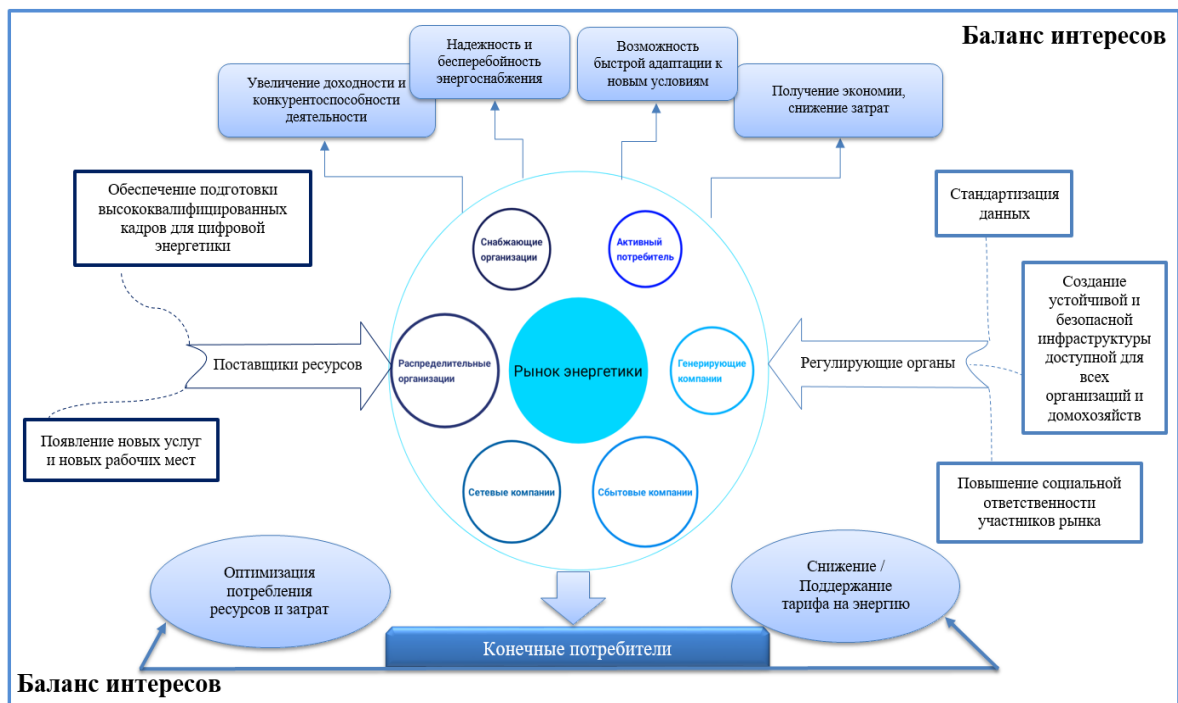


Рис. 1 Модель баланса интересов при цифровизации

- экономический эффект, управленческие решения.
- Регулирующим органам необходимо, чтобы экономика отрасли развивалась, новые технологии эффективно использовались, а предприятия получали прибыль, с которой в дальнейшем будет уплачен налог. При этом необходимо поддерживать корректные отношения в рамках закона между участниками рынка, что можно отразить как интерес в социальной ответственности участников рынка. Цифровизация поможет регулирующим органам получить прозрачность экономических операций и возможность их мониторинга.
- Активный потребитель, как и конечный потребитель энергии заинтересованы в том, чтобы их затраты на оплату используемой энергии снижались. Конечные потребители могут этого достичь с помощью цифровизации в плане применения искусственного интеллекта, что поможет им отслеживать объем потребления.

Таким образом, баланс интересов позволяет достичь системного эффекта, который в свою очередь приведет к энергосбережению на разных этапах создания энергии (производство, передача, потребление).

### 3. СИСТЕМНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Говоря о цифровизации, следует понимать применение инновационных технологий, которые помогут производству стать эффективнее, потребителю экономнее, при этом использовать информацию в нужном виде для более эффективного результата.

В рамках электроэнергетики, предлагается следующая схема применения цифровых технологий, где будет достигнут эффект энергосбережения как для отдельных пользователей данных технологий, так и для рынка в целом:

- В теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) внедряется технология «цифровой двойник».
- Сетевые компании устанавливают датчики мониторинга передаваемой энергии.
- Конечные потребители становятся «Активными потребителями», применяя цифровые технологии: умные розетки, кондиционеры, обогреватели и иную технику, которая оснащена программным обеспечением (программой) через которое можно управлять режимами потребления энергии. (Рис. 2)

«Цифровой двойник» - это виртуальный прототип реальных производственных активов - скважины, турбины, ветроэлектрической установки и т.д. Это сложный программный продукт, создается он на основе самых разнообразных данных и с помощью многочисленных IoT-датчиков. Цифровая модель помогает менять параметры работы оборудования и вносить улучшения гораздо быстрее и безопаснее, чем при экспериментах на реальных объектах. [2]

В части передачи электроэнергии (линии электропередач) устанавливают датчики для мониторинга передаваемого количества электроэнергии. В процессе передачи энергии потребителям с помощью Big Data компании собирают и обрабатывают информацию о динамике потребления, уровне платежей и дебиторской задолженности.

Активный потребитель – использует умные устройства для отслеживания объема потребленной энергии, а также корректирует работу техни-

ки в доме, что позволяет экономить энергию, а также регулировать режимы потребления.



Рис. 2 Пример применения цифровых технологий на рынке электроэнергетики для достижения системного энергосбережения

## 4. АКТИВНЫЙ ПОТРЕБИТЕЛЬ В РАМКАХ ЦИФРОВИЗАЦИИ

### 4.1. Роль потребителя на рынке

В настоящее время, потребители являются пассивными в отношении использования электроэнергии и электросетей. У них ограничены возможности в управлении этой системой. Они не могут выбрать условия потребления электрической энергии. [4]

В тоже время, потребитель является неотъемлемой частью модели функционирования рынка электроэнергетики. Без него она просто не будет существовать. В этом случае цифровые технологии дадут возможность соблюсти интересы конечного потребителя, а именно контролировать потребление энергии, а также оптимизировать свои затраты на оплату потребленной энергии. Появится активный потребитель на рынке.

Под активным потребителем понимается – конечный потребитель рынка электроэнергии, который, зная свои потребности, может оптимизировать объем потребления с целью сокращения затрат или генерировать энергию для себя и для продажи, получая доход.

В данном случае будут соблюдаться интересы двух сторон – конечных потребителей и компаний, которые производят или распределяют электроэнергию. Это может быть осуществлено следующим образом: если потребитель будет принимать активное участие на рынке, то он сам будет получать выгоду (экономия) за счёт оптимизации своих затрат, то есть удовлетворит свои экономические интересы, вторая сторона (энергокомпания) получит желаемый эффект оптимальной загрузки станции в течение дня и тем самым уменьшит износ оборудования, получив возможность сократить издержки, влияющие на формирование стоимости электроэнергии. [5]

Поэтому следует обращаться к соблюдению баланса интересов при использовании цифровых технологий для достижения большего эффекта.

### 4.2. Эффект от применения цифровых технологий потребителем

Для генерирующих компаний эффект от применения цифровизации потребителем будет следующий:

- снижение нагрузки на станцию, что также повлияет на сглаживание графиков нагрузки;
- более равномерное потребление электроэнергии в районах. Это также повлияет на срок эксплуатации генерирующего оборудования, а значит сократит издержки на ремонт или модернизацию на станции;
- если предположить, что потребитель будет участвовать на рынке, с помощью финансовой поддержки инвестиционных проектов по модернизации или внедрению новых технологий, то генерирующие компании получают от этого полезный эффект в форме снижения затрат на реализацию проекта.

Для сетевых компаний эффект будет достигаться следующий:

- если рассматривать участие потребителя в рамках строительства собственной небольшой генерирующей установки, то эффектом для сетевых компаний станет снижение инвестиционных затрат в строительство новых объектов производства электроэнергии;
- снижение потерь при передаче электроэнергии по сетям, так как места производства данной энергии станут ближе к их потребителям. Соответственно возможно и получение большего полезного эффекта от выработанной электроэнергии;
- необходимость внедрения новых устройств и технологий, для того, чтобы контролировать собственную генерацию.

Активный потребитель, как и конечный потребитель энергии заинтересованы в том, чтобы их затраты на оплату используемой энергии снижались. Конечные потребители могут этого достичь с помощью цифровизации в плане применения искусственного интеллекта, что поможет им отслеживать объем потребления и оптимизировать. У активного потребителя больше возможностей, так как помимо искусственного интеллекта они применяют распределенную энергетику, где появляется возможность получения дополнительного дохода с помощью продажи излишек выработанной энергии.

Для государства также будут достигнуты эффекты:

- формирование конкурентного рынка электроэнергетики, так как будут появляться новые производители;
- энергосбережение, будет достигнуто с помощью распределенной генерации;
- постоянное развитие и возможность внедрения новых технологий на рынок;
- формирование новых специальностей и новых рабочих мест;
- обеспечение безопасности и устойчивости функционирования энергосистем.

В данной работе будет более подробно рассмотрен экономический эффект от применения цифровых технологий конечным потребителем.

## 5. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ОТ АКТИВНОГО УЧАСТИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Для расчета экономической эффективности от активного участия потребителя электроэнергетики необходимо определить условия, в которых будет происходить оптимизация энергии.

Потребитель проживает в Московской области, в частном доме, где общий объем потребления энергии составит 575,4 кВт\*ч/мес. В данное потребление входит пользование крупной бытовой техникой, утюг, фен, водонагреватель и отопление, водоснабжение, кондиционирование осуществляется с помощью электричества.

Предлагается следующий вариант внедрения цифровизации:

- Климат – контроль с возможностью удаленного управления (отопление, кондиционирование).
- Электричка (диммируемое освещение, датчик движения, автономные прожектора на солнечных батареях).

Стоимость комплектующих составит [3]:

- Терморегулятор rz terneo 4820120220326 – 2258 руб.
- Диммер GUSI ELECTRIC Ugra 500W – 941 руб.
- Светильник светодиодный с датчиком движения Эра 5 Вт – 859 руб.
- Общая стоимость внедрения составит 16 396 руб.

Учитывая, что потребитель будет регулировать и контролировать объем потребления с помощью

данных устройств, объем потребляемой электроэнергии снизится и составит 497 кВт\*ч/мес. Срок окупаемости вложенных средств наступит через 4 года после установки устройств.

В целом, энергосбережение происходит в небольшом количестве со стороны потребителя, но всё же эффект из технологического также переходит в экономический, что является стимулом для потребителей приобретать грамотность в использовании цифровых технологий, а также получения навыков умения оптимизировать свое потребление.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате, говоря об энергосбережении можно обратиться к цифровизации, инновационным технологиям. Приведенное в работе решение для создания системного эффекта позволит создать баланс интересов между предприятиями и потребителями. Возникновение «активного потребителя» способствует энергосбережению, так как потребитель имеет возможность оптимизировать и контролировать объем потребления энергии, а также получает экономический эффект от внедрения цифровых технологий. Кроме того, данное решение оказывает влияние и на остальных участников цифровизации: государство, генерирующие компании, сетевые компании. Энергосбережение следует достигать, соблюдая баланс интересов, чтобы каждый участник процесса понимал для какой цели это осуществляется и какие выгоды возможны.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭЦ – сокращенное название теплоэлектроцентрали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л. Г. Матвеева, О. А. Чернова Концептуальная модель баланса интересов субъектов электроэнергетического рынка // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. — 2017. — Том 16. — № 4. — с. 556-574;
2. Статья Цифровой двойник Digital Twin of Organization, DTO - Деловой портал TAdviser;
3. Официальный сайт «Все Инструменты.ру»;
4. ScienceDirect – Electric Power Systems Research;
5. Активный потребитель: реалии и прогнозы / И. О. Волкова, ВШЭ – Москва, 2014.

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИТИКИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОТРАСЛЕВОМ РЫНКЕ****АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрены основные законодательные акты, направленные на повышение энергоэффективности.

На основе анализа нормативных актов был разработан показатель энергоэффективности, который учитывает мощность энергостанции, стоимость оборудования и индекс цен на производственную подгруппу «Производство и распределение электроэнергии, газа и воды»

**1. ВВЕДЕНИЕ**

На сегодняшний день энергетика является одной из важнейших отраслей промышленности. Для страны необходимо, чтобы энергетика развивалась, так как все отрасли связаны непосредственно с непрерывным энергообеспечением.

Разработка и внедрение новых и совершенствование имеющихся технологий и технических средств являются важнейшими направлениями в работе для успешного развития российского энергохозяйства.

Необходимо осуществлять мониторинг и оценку эффективности нового оборудования еще до его реализации. Новое оборудование должно быть не только дешевле по стоимости, но и эффективнее в промышленных целях. Проблеме повышения энергоэффективности государство уделяет большое внимание.

**2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Государство заинтересовано в развитие одной из основных сфер производства и интерес только растет. Сегодня действуют несколько законодательных актов, каждый из которых направлен на рост энергоэффективности ТЭК, и федеральная программа, которая рассчитана до 2035 года.

Постановление Правительства РФ от 31.12.2009 N 1225 (ред. от 17.12.2010) «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности». Данный документ направлен на задачи по повышению энергоэффективности на муниципальный и региональный уровень. [1]

Так же в этом нормативном акте указаны целевые показатели региональных программ в области энергосбережения и повышения энергоэффективности. Туда вошли:

- энергоемкость валового регионального продукта субъекта Российской Федерации

- отношение расходов на приобретение энергетических ресурсов к объему валового регионального продукта

- доля объема производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, в совокупном объеме производства электрической энергии на территории субъекта Российской Федерации (без учета гидроэлектростанций установленной мощностью свыше 25 МВт);

- удельный расход энергии на снабжение государственных органов субъекта Российской Федерации и государственных учреждений субъекта Российской Федерации (на 1 м<sup>2</sup> общей площади); [1]

Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2018 г. N 703-р закрепляет комплексный план мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики Российской Федерации. План предусматривает реализацию мероприятий, обеспечивающих повышение энергетической эффективности экономики Российской Федерации, в отношении предприятий промышленности, регулируемых организаций, организаций с государственным участием, организаций бюджетной сферы, многоквартирных домов. [2]

Закреплены целевые показатели плана (Динамика энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации за счет технологического фактора; Динамика потерь в распределительных сетях; Динамика удельного расхода топлива при производстве; Динамика совокупных расходов бюджетной системы на электроэнергию (в сопоставимых ценах) и т.д.)

Планом предусмотрены мероприятия по повышению энергоэффективности, которые учитывают изменения в системе оценки деятельности органов исполнительной власти. Так же предусмотрено устранение существующих барьеров для привлечения внебюджетных инвестиций в целях реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергоэффективности через механизм энергосервисного контракта (контракта) в бюджетной сфере и внедрение механизма снижения уровня износа основных средств регулируемых субъектов в целях обеспечения их энергоэффективности. [2]

В 2020 году правительством была разработана «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» от 09 июня 2020 г №1523-р.

Стратегия направлена на энергетическую безопасность, приоритетность удовлетворения внутреннего спроса в сырье энергетики, развитие конкуренции ТЭК на внутреннем рынке и максимальное использование отечественного оборудования.

На этапе реализации данной стратегии продолжится совершенствование существующей модели отношений и ценообразования электрической и тепловой энергии с целью обеспечения баланса интересов потребителей и производителей энергии, в основном снижение перекрестного субсидирования цен. (тарифы) между группами потребителей.

Произойдет сокращение накопленных избыточных мощностей, масштабная модернизация действующих производственных мощностей и демонтаж неэффективного морально устаревшего производственного оборудования. [3]

В дальнейшем обновление генерирующих мощностей на основе перспективных инновационных технологий и оптимизация их (мощностей) структуры по типам электростанций будут продолжены в соответствии с динамикой спроса на электроэнергию и мощность

Увеличение производства энергоресурсов с 2030 г. практически прекратится, а развитие топливно-энергетического комплекса пойдет преимущественно по пути качественного улучшения и повышения эффективности как экспортных поставок, так и внутреннего потребления энергоресурсов. [3]

Со стороны государства будет осуществляться управление ТЭК:

- повышение инвестиционной активности и развитие конкуренции в сфере энергетики;
- законодательное закрепление принципа долгосрочного (не менее 5 лет) не увеличения уровня фискальной нагрузки;
- внедрение метода эталонных расходов (бенчмаркинга) в сфере регулирования тарифов на услуги энергетической инфраструктуры;
- повышение уровня платежной дисциплины потребителей энергетических ресурсов. [3]

В результате реализации данной стратегии будет обеспечено устойчивое, надежное и эффективное удовлетворение внутреннего спроса на продукцию организаций топливно-энергетического комплекса и услуги в сфере энергетики. При этом отрасли топливно-энергетического комплекса будут вносить существенный вклад в снижение энергоемкости экономики, в том числе за счет снижения удельного расхода топлива на производство электрической энергии и потребления энергии на собственные нужды отраслей топливно-энергетического комплекса, особенно в электроэнергетике и газовой промышленности.

Все вышеперечисленные документы определяют целостную систему правовых, административных и экономических мер, стимулирующих эффективное использование энергии, а именно:

- создание экономических механизмов, стимулирующих эффективное использование энергии;
- поддержка специализированного бизнеса в области энергосбережения;
- популяризация энергосбережения. [1]

Эффект от реализуемых нормативных актов можно оценить как с экономической, так и с технологической точки зрения.

В предыдущей статье автора «Модель оценки экономических последствий государственного участия на отраслевом рынке энергомашиностроения» разработана анализа влияния государственной поддержки на темпы развития отраслевого рынка и предприятий, действующих на нем. [4]

1.  $Pr_2 > Pr_1$
2. Прибыль 2 = Выручка – себестоимость – процент по кредиту (при условии, что  $\%2 - \%1 < 0$ ) – налог на прибыль (налоговые отчисления после – налоговые отчисления до  $< 0$ )
3. Налог – субсидии  $> 0$
4.  $CR_{-32} < CR_{-31}$
5. Стоимости отечественных ресурсов  $<$  общей стоимости ресурсов

Рис. 1. «Экономико-математическая модель влияния государственной помощи на промышленные производственные комплексы» [5]

Каждое уравнение учитывает факторы влияния государственной политики не только на предприятия, но на само государство и отраслевой рынок. Первое неравенство учитывает изменение прибыли предприятия, второе – изменение выручки за счет изменения суммы налогов и процентных отчислений. Третье учитывает интерес государства. Никто не хочет работать без положительного результата и государство в том числе. Эффект государство получит в виде налоговых отчислений, которые по сумме должны быть больше, чем вложенные субсидии. Четвертое неравенство оценивает ситуацию на отраслевом рынке через коэффициент концентрации. Пятое неравенство указывает, что использование отечественных разработок и ресурсов должен быть больше, чем от импортных.

В пятом неравенстве речь идет не только о стоимости ресурсов, но и о потенциале роста энергоэффективности. Этот рост будет осуществляться за счет новых технологий, что потребует инвестиций, но в конечном счёте приведет к промышленному росту.

В рамках ранее разработанной системы необходимо учитывать ограничительную часть. В системе все показатели финансовые и если добавить технологический, то нарушается целевая функция. Поэтому необходимо добавить показатель, который оценивает энергоэффективность со стороны экономики.

Для того чтобы оценить влияние политики государства на энергоэффективность необходимо создать показатель, который объединит технологические и экономические показатели энергоэф-



фективности. Таким показателем выступит совокупность изменений основных факторов энергоэффективности (Iэф)

$$I_{эф} = Tr_{м} * Tr_{ст} * Tr_{И.ц.}, \quad (1)$$

где

Iэф – индекс энергоэффективности;

Tr м – темп роста мощности энергообъекта (млн кВт)

Tr ст – темп роста стоимости оборудования (млн. руб)

Tr И.ц. – темп роста индекса цен производителей промышленных товаров по виду экономической деятельности «Производство и распределение электроэнергии, газа и воды» (%)

Чтобы сказать, что энергообъект эффективен, темп роста мощности должен расти, а темп роста цены уменьшаться. Если предположить идеальный сценарий, то в результате индекс цен производителей промышленных товаров по виду экономической деятельности «Производство и распределение электроэнергии, газа и воды» будет увеличиваться с меньшей скоростью.

В результате получается, что

$I_{эф} \Rightarrow \max$

$Tr_{м} \Rightarrow \max$

$Tr_{ст} \Rightarrow \min$

$Tr_{И.ц.} \geq 1, \text{ но } \Rightarrow \min \quad (2)$

Данная доработка позволит оценить эффект от государственного воздействия не только по экономическим показателям, но и техническим. Технические показатели представлены в виде процентного соотношения и таким образом технические показатели можно сопоставить с экономическими.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность – важная задача развития экономики. Именно поэтому необходимо регулировать деятельность энергетических компаний, а также разрабатывать и реализовывать про-

граммы поддержки и развития со стороны государства.

На сегодняшний день основным нормативным актом является энергетическая стратегия до 2035 года, которая содержит комплекс мер и план по повышению энергоэффективности.

Разработанный индекс в суммарном эффекте покажут на сколько эффективны меры государственного воздействия на рост энергоэффективности. Результаты помогут скорректировать не только государственную политику по отношению, но и скорректировать стратегию развития предприятия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Постановление Правительства РФ от 31.12.2009 N 1225 (ред. от 17.12.2010) «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности»  
(ссылка для посещения: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_97014/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_97014/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/))
2. Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2018 г. N 703-р О комплексном плане мероприятий по повышению энергетической эффективности экономики РФ  
(ссылка для посещения [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_296507/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_296507/))
3. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» от 09 июня 2020 г №1523-р.  
(ссылка для посещения [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_354840/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/f62ee45faefd8e2a11d6d88941ac66824f848bc2/))
4. Овчинникова Ю.А., Шувалова Д.Г. Модель оценки экономических последствий государственного участия на отраслевом рынке энергомашиностроения // Экономика, предпринимательство и право. – 2021. – Т. 11. – № 12. – С. 3121-3132. – DOI 10.18334/epp.11.12.113875. – EDN HUOWZ



*И.А. Зайцев, Д.А. Смирнова, Д.В. Никифорова*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ Г. КЛИН

### АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрено понятие государственно-частного партнерства, в частности концессионного соглашения, как источник привлечения частного капитала в энергетическую отрасль. Проанализирована статистика подобных соглашений. Описан вариант модернизации тепловых сетей г. Клин в рамках концессии. Проведена оценка тарифных последствий после реализации мероприятий по повышению энергоэффективности тепловых сетей г. Клин.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетика является ключевой отраслью российской экономики. Главная цель – преобразование первичной во вторичную (в тепловую или электрическую) энергию и обеспечить ее распределение на потребности промышленности, народного хозяйства и населения, а также осуществлять экспорт оставшейся после распределения на собственные нужды энергии в страны дальнего зарубежья и СНГ.

Как можно увидеть, энергоотрасль очень сильно влияет на уровень жизни граждан и экономику нашей страны. Состояние сектора в данный момент времени находится в плачевном состоянии. Морально и физически устаревшее оборудование, а также неэффективное управление на законодательном уровне являются ключевыми проблемами энергетической отрасли.

Высокий уровень инвестиций мог бы улучшить текущее состояние и задать вектор развития отстающих технологий в нашей стране.

Для усовершенствования социальной и экономической сфер в России на протяжении долгого времени развивались механизмы эффективного взаимодействия частного капитала и государства, которые направлены на координацию усилий сторон и обеспечение учета их интересов. Взаимодействие государства и бизнеса осуществляется в различных формах и регламентируется официальными документами. Одной из таких форм является концессия.

Концессия (концессионное соглашение) – это форма партнерства государства и частного капитала, в ходе которого государство в целях повышения качества и эффективности использования государственной собственности привлекает частный сектор к выполнению отдельных публичных функций по владению и пользованию государственной или муниципальной собственностью на взаимовыгодных условиях. [1]

Тесная связь частного бизнеса и государственных институтов – будущее развития экономической области нашего государства.

### 2. ПОНЯТИЕ КОНЦЕССИИ И СТАТИСТИКА КОНЦЕССИОННЫХ СОГЛАШЕНИЙ

При взаимодействии частного сектора и государства в рамках концессионного соглашения происходит создание или реконструкция за счет средств частного капитала объектов недвижимого имущества (или недвижимое и движимое имущество, которые связаны между собой технологически), находящихся в государственной или муниципальной собственности. В ходе осуществления такого партнерства инвестор получает возможность эксплуатировать объект на возмездной основе, привлекая доход в свою пользу. [1]

Объектами концессионного соглашения, как правило, выступают социально значимые объекты, которые не могут быть приватизированы, например, аэродромы, автомобильные и железные дороги, объекты ЖКХ и другие инфраструктурные сооружения, а также системы общественного транспорта, объекты здравоохранения, образования, культуры и спорта.

Несмотря на то, что Федеральный закон «О концессионных соглашениях» от 21.07.2005 N 115-ФЗ был принят 21 июля 2005 года (далее – Закон N 115-ФЗ), специфическое взаимодействие государства и частного сектора было известно в отечественной практике с XII века.

История развития концессии связана с «кормлением», сформировавшимся в XII веке и существовавшим вплоть до реформ Петра I и «откупом», представляющим собой передачу государством за определенную плату частным лицам (откупщикам) права взимания налогов и других государственных доходов.

В современной России первое концессионное соглашение на федеральном уровне 17 июля 2009 г. подписали ОАО «Главная дорога» и Федеральным дорожным агентством (Росавтодор). Предметом соглашения является реализация проекта «Строительство нового выхода на Московскую кольцевую автомобильную дорогу с федеральной автомобильной дороги М-1 «Беларусь» Москва – Минск». Срок действия соглашения – 30 лет, общая стоимость строительства автодороги – 25,7 млрд рублей, из

которых 11 млрд – средства Инвестиционного фонда РФ, оставшаяся часть – средства концессионера.

Первое в России муниципальное концессионное соглашение было заключено в 2016 году между городским поселением Наро-Фоминск Наро-Фоминского муниципального района Московской области и компанией-инвестором ООО «Наро-Фоминская платная дорога». В соответствии с условиями соглашения концессионер обязался спроектировать и построить к 2019 году в Наро-Фоминске автомобильную дорогу с современным мостом и

путепроводом за счёт собственного капитала. Объём инвестиций в проектирование, строительство и эксплуатацию дороги длиной 2,6 км, пролегающей от Кубинского шоссе до автодороги «Наро-Фоминск—Васильчиново», составит более одного млрд рублей.

Концессия имеет большой потенциал для привлечения инвестиционных средств и данный вид государственно-частного партнерства давно себя зарекомендовал. Это подтверждают статистические данные, представленные на рисунке 1.

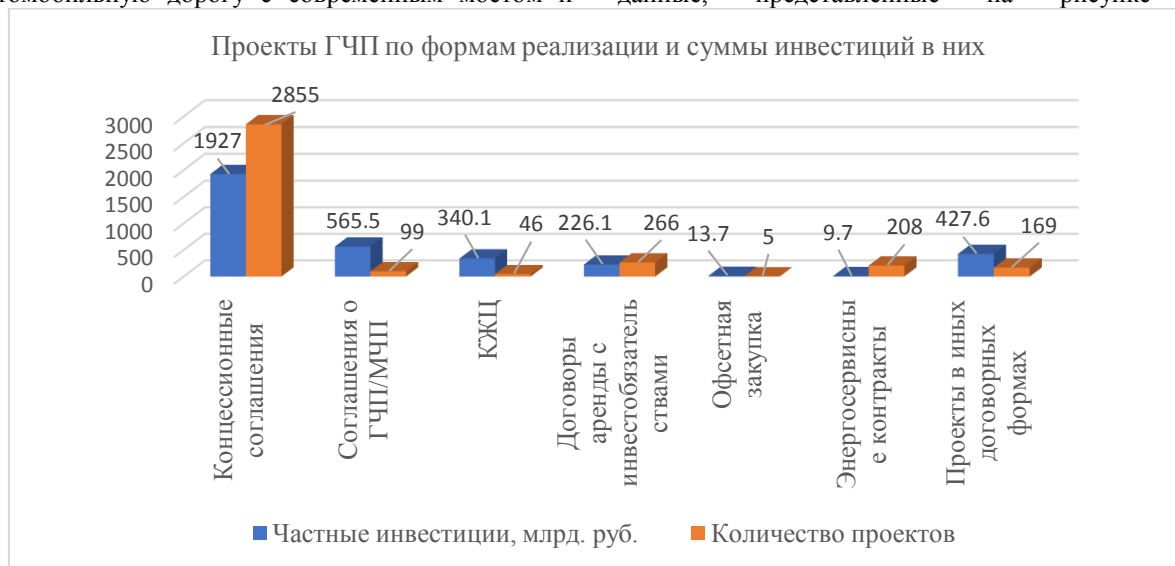


Рис. 1. Проекты ГЧП по формам реализации и суммы инвестиции в них

Можно заметить, что количество заключенных концессионных соглашений, а также величина инвестиций в них сильно превосходят те же показатели по другим формам договоров. Это говорит о повышенной заинтересованности участников в государственно-частном партнерстве данного вида.

### 3. МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ Г. КЛИН

Администрацией г.о. Клин опубликовано Постановление О целесообразности концессионного соглашения в отношении объектов теплоснабжения, расположенных в границах муниципального образования городской округ Клин Московской области.

Согласно проекту концессионного соглашения в отношении объектов теплоснабжения г.о. Клин планируются следующие виды работ:

- реконструкция и модернизация котельных, тепловых сетей и центральных тепловых пунктов,
- строительство котельных, тепловых сетей и центральных тепловых пунктов. [2]

В настоящее время в России порядка 30% тепловых сетей находится в аварийном или близком к аварийному состоянию. Поэтому строительство надежных и экономичных теплосетей является первоочередной задачей в рамках повышения энергоэффективности системы теплоснабжения любого города нашей страны. Под экономичностью тепловых сетей предполагается низкий расход средств на

строительство, монтаж и эксплуатацию, а также минимальные теплотери в трубопроводах.

Современные способы прокладки трубопроводов позволяют осуществлять строительство теплосетей в 3-4 раза быстрее при практически равных затратах. Уменьшение сроков установки стало возможным при использовании элементов заводской готовности.

Современный материал труб и их изоляции увеличивает срок их службы до 30 лет и более.

За весь период эксплуатации качественные трубы нового образца практически не нуждаются в капитальном ремонте, за исключением возникновения системных и посторонних повреждений. Это позволяет сократить эксплуатационные затраты приблизительно в 9 раз и ремонтные затраты практически в 3 раза. [3]

Главное преимущество обновленного трубопровода – потери тепла в трубах данной конструкции минимальны. По проекту концессионного соглашения планируется снижение потерь в тепловых сетях до 3%, что позволит снизить объем отпуска тепловой энергии на 12,47%. Так же в результате проведенных работ планируется повышение энергоэффективности и уменьшение удельного расхода топлива с 163,0 кг. у.т/Гкал до 159,9 кг. у.т/Гкал. [2]

### 4. РАСЧЕТ ТАРИФА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫХ ЗАТРАТ (ЭОЗ)

Для расчета тарифа на тепловую энергию использовались следующие методы:

- метод экономически обоснованных расходов (затрат);
- метод индексации установленных тарифов;
- метод обеспечения доходности инвестированного капитала (RAB метод). [4, 5, 6]

Стартовым методом для расчета тарифа является метод экономически обоснованных затрат (ЭОЗ). В работе проведены расчеты, используя этот метод, с учетом и без учета концессионного соглашения.

Основополагающей и самой финансово-затратной статьей является топливо. Неудивительно, поскольку при данном развитии техники и технологии в нашей стране доля топливных ресурсов в себестоимости затрат продукции составляет:

- для 35% предприятий – 6-10% от себестоимости;
- для 17% предприятий – 11-15% от себестоимости;
- для 17% предприятий – 16-25% от себестоимости.

В состав топливных расходов входит удельный расход топлива на производство одной Гкал тепловой энергии, расчетная цена на единицу топливно-энергетического ресурса (то есть цена с учетом затрат на доставку и хранение), а также расчетный объем отпуска тепловой энергии с источника.

Установленный удельный расход топлива в 2021 году равнялся –  $G_{уд} = 163,0$  кг. у.т/Гкал.

Установленный удельный расход топлива в 2021 году с учетом концессионного соглашения –  $G_{уд\ Конц} = 159,9$  кг.у.т/Гкал.

Расчетные цены на единицу ТЭР в 2021 году с учетом и без учета концессионного соглашения –  $Ц_{ед.ТЭР} = 5932,82$  руб/тыс. м<sup>3</sup> газа.

Расчетный объем отпуска тепловой энергии от источника в 2021 году –  $Q_{т.э} = 73955$  Гкал.

Расчетный объем отпуска тепловой энергии от источника в 2021 году с учетом концессионного соглашения –  $Q_{т.э.Конц} = 65757,73$  Гкал.

Снижение объема составило 12,47%. Этого удалось добиться путем снижения потерь в распределительных сетях до 3% от расчетного отпуска тепловой энергии в сеть.

Используя вышеперечисленные данные и принимая коэффициент для пересчета в тонны условного топлива  $k = 1,15997$ , рассчитаем затраты на топливо.

Затраты на топливо вычислим по формуле:

$$Z_{топливо} = \frac{G * Q * Ц_{ед.ТЭР}}{10^3 * k} \quad (1)$$

Затраты на топливо в 2021 году:

$$\begin{aligned} Z_{топливо}^{2021} &= \frac{G_{уд} * Q_{т.э} * Ц_{ед.ТЭР}}{10^3 * k} \\ &= \frac{163,0 * 73955 * 5932,82}{10^3 * 1,15997} \\ &= 61868,52 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Затраты на топливо в 2021 году с учетом концессионного соглашения:

$$\begin{aligned} Z_{топливоКонц}^{2021} &= \frac{G_{уд\ Конц} * Q_{т.э\ Конц} * Ц_{ед.ТЭР}}{10^3 * k} \\ &= \frac{159,9 * 65757,73 * 5932,82}{10^3 * 1,15997} \\ &= 53964,14 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

Затраты на покупаемые энергоресурсы, холодную воду и теплоноситель в 2021 году.

$$Z_{э.ресурсы}^{2021} = 10791,6 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на покупаемые энергоресурсы, холодную воду и теплоноситель в 2021 году с учетом концессионного соглашения остаются без изменения.

$$Z_{э.ресурсыКонц}^{2021} = 10791,6 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на сырье и материалы в 2021 году с учетом концессии не меняются.

$$Z_{С.М.}^{2021} = Z_{С.М.Конц}^{2021} = 952,49 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на ремонт ОПФ в 2021 году составили:

$$Z_{ремонт}^{2021} = 16808,8 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на ремонт ОПФ в 2021 году составили с учетом концессионного соглашения. Данная статья снизилась за счет обновления основных производственных фондов на 11,1% и составила:

$$Z_{ремонтКонц}^{2021} = 15127,92 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на оплату труда и страховых взносов в 2021 году с учетом концессии не изменились:

$$Z_{ЗП}^{2021} = Z_{ЗПКонц}^{2021} = 22120,36 \text{ тыс. руб.}$$

Также, используя метод ЭОЗ, учитываем амортизационные отчисления. В 2021 году они принимали значение:

$$A = 1299,84 \text{ тыс. руб.}$$

Амортизационные отчисления в 2021 году с учетом концессионного соглашения увеличатся за счет ввода нового оборудования до:

$$A_{Конц} = 3433,46 \text{ тыс. руб.}$$

Последней статьей являются прочие расходы, которые в 2021 году равнялись значению  $Z_{прочие} = 1050,12$  тыс. руб., а в этом же году с учетом концессионного соглашения отсутствовали.

Внереализационные расходы и расходы, не учитываемые при налогообложении, отсутствовали в обоих случаях.

$$Z_{внереал.} = 0 \text{ тыс. руб.}$$

и

$$Z_{безН/О} = 0 \text{ тыс. руб.}$$

Для расчета тарифа используем следующую формулу:

$$T = \frac{НВВ}{Q_{полез}} \quad (2)$$

где  $Q_{полез}$  – это полезный отпуск тепловой энергии.

Значение  $Q_{полез} = 63785$  Гкал с учетом и без учета концессионного соглашения в 2021 году.

Суммарное значение НВВ при методе ЭОЗ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} НВВ &= Z_{топливо} + Z_{э.ресурсы} + Z_{С.М.} + Z_{ремонт} + Z_{ЗП} + \\ &+ A + Z_{внереал.} + Z_{безН/О} \end{aligned} \quad (3)$$

Рассчитаем значение НВВ для 2021 года.

$$НВВ_{безКонц}^{2021} = 114891,73 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем значение НВВ для 2021 года с учетом концессионного соглашения.

$$НВВ_{Конц}^{2021} = 106390,54 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем тариф на тепловую энергию в 2021 году.

$$T_{\text{БезКонц}}^{2021} = 1801,23 \text{ руб./Гкал}$$

Рассчитаем тариф на тепловую энергию в 2021 году с учетом концессионного соглашения.

$$T_{\text{Конц}}^{2021} = 1667,96 \text{ руб./Гкал}$$

Таким образом, можно отметить, что в результате реализации мероприятий по повышению энергоэффективности тепловых сетей г. Клин в рамках концессионного соглашения тепловой баланс меняется в сторону уменьшения потерь в тепловых сетях и, соответственно, уменьшения отпущенной тепловой энергии, происходит уменьшение удельного расхода топлива. Данные изменения позволяют сократить топливную составляющую затрат, на которую приходится большая часть НВВ. Несмотря на то, что амортизационные отчисления увеличиваются, необходимая валовая выручка по методу экономически обоснованных затрат после заключения концессионного соглашения уменьшается, что позволяет снизить тариф на тепловую энергию с 1801,23 руб./Гкал до 1667,96 руб./Гкал.

## 5. РАСЧЕТ ТАРИФА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ИНДЕКСАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫХ ТАРИФОВ

Проведем расчет тарифа методом индексации установленных тарифов. Суть данной методики заключается в том, что используется тариф, который был установлен в прошлом рассчитываемом периоде, и умножается на коэффициент индексации.

Индексация – государственный инструмент, установленный для повышения денежных доходов и сбережений людей, в связи с увеличением потребительских цен.

Целью индексации является поддержание покупательской способности денежных средств граждан. Индексация зачастую не используется в качестве единственного метода регулирования доходов населения, а действует в связке с другими методами. Также может быть полностью заменена на другой принцип регулирования, если есть такая необходимость.

Для применения рассматриваемого метода государственного регулирования цен необходимо вычислить необходимую валовую выручку, которая включает в себя на первом этапе текущие расходы.

Величина текущих расходов складывается из операционных расходов, которые включают в себя такие основные затраты, как затраты на оплату труда рабочих и административно-управленческого персонала, на ремонтные работы основных средств, затраты на приобретение сырья и различных материалов.

К текущим расходам относятся расходы на покупку энергетических ресурсов (например уголь, газ, энергия солнца и геотермальных источников), холодной воды и теплоносителя, так же относятся неподконтрольные расходы и амортизация основных и нематериальных активов предприятия.

Вторая часть НВВ формируется из суммы нормативной прибыли (НП) организации. НП состоит из расходов на инвестиции, утверждаемые составленным инвестиционным планом, расходов на погашение и эксплуатацию заемных средств, которые были привлечены для реализации инвестиционного плана предприятия.

Третья часть – это расчетная предпринимательская прибыль (РПП). РПП организации – это сумма, действительная при определении необходимого регулируемого валового дохода организации при расчете тарифов, все еще принадлежащая регулируемой организации и действующая по своему усмотрению.

Для расчета методом индексации установленных тарифов следует принять индексы, которые устанавливает Федеральная служба государственной статистики.

Принято:

- Индекс роста потребительских цен –  $I_{\text{потреб}} = 3,6\%$ ;
- Индекс роста цен на электроэнергию –  $I_{3/3} = 3,9\%$ ;
- Индекс роста цен на водоснабжение –  $I_{\text{вода}} = 3,6\%$ ;
- Индекс роста цен на тепловую энергию –  $I_{т/3} = 3,6\%$ ;
- Индекс роста цен на природный газ –  $I_{\text{газ}} = 3,0\%$ ;
- Индекс роста цен на снабженческую сбытовую надбавку –  $I_{\text{надб}} = 3,0\%$ ;
- Индекс роста цен на транспортировку газа –  $I_{\text{тр.газ}} = 3,2\%$
- Индекс эффективности операционных расходов –  $I_{\text{иор}} = 1\%$
- Индекс изменения количества активов по производству тепловой энергии –  $I_{\text{актив}} = 0\%$ .

Задаемся следующими необходимыми коэффициентами из предложения концессионера:

- Коэффициент эластичности –  $K_{\text{эл}} = 0,75$ ;
- Коэффициент на реализацию потребителям –  $K_{\text{потреб}} = 1,0$ ;

Коэффициент индексации операционных расходов рассчитывается на основе концессионного соглашения по формуле:

$$K_{\text{ор}} = \left(1 - \frac{I_{\text{иор}}}{100}\right) (1 + I_{\text{потреб}}) (1 + K_{\text{эл}} \times I_{\text{актив}}) \quad (4)$$
$$K_{\text{ор}} = 1,025 \approx 1,03$$

Рассчитаем операционные затраты (расходы) организации.

$$OP = (З_{\text{С.М.}} + З_{\text{ЗП}} + З_{\text{ремонт}}) K_{\text{ор}} \quad (5)$$

Индексируем  $Z_{\text{ЗП}}$  на 2022 год.

$$Z_{\text{и.зп}} = Z_{\text{зп}} \left(1 + \frac{I_{\text{потреб}}}{100}\right)$$

Индексированные затраты на 2022 год с учетом и без учета концессии будут одинаковыми.

$$Z_{\text{и.зп}}^{2022} = Z_{\text{и.зп.конц}}^{2022} = 22916,69 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на сырье и материалы в 2022 году с учетом и без учета концессии будут так же одинаковыми.

$$Z_{\text{С.М.}}^{2022} = Z_{\text{С.М.конц}}^{2022} = 952,49 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на ремонт основных производственных фондов в 2022 году остаются равными данной статье затрат 2021 года:

$$З_{\text{ремонт}}^{2022} = 16808,8 \text{ тыс. руб.}$$

$$З_{\text{ремонтКонц}}^{2022} = 15127,92 \text{ тыс. руб.}$$

Операционный затраты на 2022 год без учета концессионного соглашения:

$$ОР = (З_{\text{С.М.}} + З_{\text{ЗП}} + З_{\text{ремонт}})_{\text{КОР}}$$

Прогнозируемые операционный затраты на 2022 год без учета концессионного соглашения:

$$ОР^{2022} = 41898,32 \text{ тыс. руб.}$$

Прогнозируемые операционный затраты на 2022 год с учетом концессионного соглашения:

$$ОР_{\text{Конц}}^{2022} = 40167,02 \text{ тыс. руб.}$$

Далее найдем затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году. В данную часть входят расходы на топливо и расходы на прочие покупаемые энергоресурсы, холодную воду и теплоноситель.

$$З_{\text{ТЭР}} = З_{\text{топливо}} + З_{\text{э.ресурсы}} \quad (6)$$

Проиндексируем топливную составляющую без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{\text{Итопливо}}^{2022} = З_{\text{топливо}}^{2021} \left( 1 + \frac{И_{\text{газ}}}{100} + \frac{И_{\text{тр.газ}}}{100} \right) = 65704,37 \text{ тыс. руб.}$$

Проиндексируем топливную составляющую с учетом концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{\text{ИтопливоКонц}}^{2022} = З_{\text{топливоКонц}}^{2021} \left( 1 + \frac{И_{\text{газ}}}{100} + \frac{И_{\text{тр.газ}}}{100} \right) = 57310,52 \text{ тыс. руб.}$$

Проиндексированные расходы на прочие покупаемые энергоресурсы, холодную воду и теплоноситель с учетом и без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{\text{Иэ.ресурсы}}^{2022} = З_{\text{Иэ.ресурсыКонц}}^{2022} = З_{\text{э.ресурсы}}^{2021} \left( 1 + \frac{И_{\text{вода}}}{100} \right) = 11180,09 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году с учетом концессии:

$$З_{\text{ТЭР}}^{2022} = З_{\text{Итопливо}}^{2022} + З_{\text{Иэ.ресурсы}}^{2022} = 76884,46 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году с учетом концессии:

$$З_{\text{ТЭРКонц}}^{2022} = З_{\text{Итопливо}}^{2022} + З_{\text{Иэ.ресурсыКонц}}^{2022} = 68490,61 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем неподконтрольные расходы (НПР) организации. В рассматриваемом случае они будут равны:

$$\text{НПР} = З_{\text{прочее}} + А, \quad (7)$$

где  $З_{\text{прочее}}$  – прочие затраты,  $А$  – амортизация основных средств.

Прогнозируемые прочие затраты и амортизация в 2022 году без учета концессионного соглашения:

$$З_{\text{прочее}}^{2022} = З_{\text{прочее}}^{2021} = 1050,12 \text{ тыс. руб.}$$

$$А^{2022} = А^{2021} = 1299,84 \text{ тыс. руб.}$$

Прогнозируемые прочие затраты и амортизация в 2022 году с учетом концессионного соглашения:

$$З_{\text{прочееКонц}}^{2022} = З_{\text{прочееКонц}}^{2021} = 0 \text{ тыс. руб.}$$

$$А_{\text{Конц}}^{2022} = А_{\text{Конц}}^{2021} = 3433,46 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитываем прогнозируемые НПР.

Без учета концессионного соглашения:

$$\text{НПР}^{2022} = З_{\text{прочее}}^{2022} + А^{2022} = 1050,12 + 1299,84 = 2349,96 \text{ тыс. руб.}$$

Без учета концессионного соглашения:

$$\text{НПР}_{\text{Конц}}^{2022} = З_{\text{прочееКонц}}^{2022} + А_{\text{Конц}}^{2021} = 0 + 3433,46 = 3433,46 \text{ тыс. руб.}$$

Текущие затраты (ТЗ) находим по формуле:

$$\text{ТЗ} = \text{НПР} + З_{\text{ТЭР}} + ОР \quad (8)$$

Рассчитаем ТЗ без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$\text{ТЗ}^{2022} = \text{НПР}^{2022} + З_{\text{ТЭР}}^{2022} + ОР^{2022} = 121132,75 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем ТЗ с учетом концессионного соглашения на 2022 год:

$$\text{ТЗ}_{\text{Конц}}^{2022} = \text{НПР}_{\text{Конц}}^{2022} + З_{\text{ТЭРКонц}}^{2022} + ОР_{\text{Конц}}^{2022} = 112091,09 \text{ тыс. руб.}$$

Значения нормативной и расчетной предпринимательской прибыли в 2022 году без учета концессионного соглашения будут равны нулю.

$$\text{НП}^{2022} = \text{РПП}^{2022} = 0 \text{ тыс. руб.}$$

Значение расчетной предпринимательской прибыли в 2022 году с учетом концессионного соглашения будет равно нулю.

$$\text{РПП}_{\text{Конц}}^{2022} = 0 \text{ тыс. руб.},$$

а значения НП будет составлять 1,82% от объема капитальных вложений на 2022 год реализации инвестиционной программы:

$$\text{НП}_{\text{Конц}}^{2022} = 0,0182K^{2022} = 776,63 \text{ тыс. руб.}$$

Найдем итоговые значения НВВ по формуле:

$$\text{НВВ}_{\text{Индекс}} = \text{ТК} + \text{НП} + \text{РПП} \quad (9)$$

НВВ без учета концессионного соглашения:

$$\text{НВВ}_{\text{Индекс}}^{2022} = \text{ТЗ}^{2022} + \text{НП}^{2022} + \text{РПП}^{2022} = 121132,75 \text{ тыс. руб.}$$

НВВ с учетом концессионного соглашения:

$$\text{НВВ}_{\text{ИндексКонц}}^{2022} = \text{ТЗ}_{\text{Конц}}^{2022} + \text{НП}_{\text{Конц}}^{2022} + \text{РПП}_{\text{Конц}}^{2022} = 112867,73 \text{ тыс. руб.}$$

Для расчета тарифа используем следующую формулу:

$$Т = \frac{\text{НВВ}_{\text{Индекс}}}{Q_{\text{полез}}}, \quad (10)$$

где  $Q_{\text{полез}}$  – это полезный отпуск тепловой энергии.

Значение  $Q_{\text{полез}} = 63785$  Гкал с учетом и без учета концессионного соглашения в 2022 году.

Рассчитаем тариф методом индексации установленных тарифов на тепловую энергию в 2022 году.

$$Т_{\text{Индекс}}^{2022} = \frac{\text{НВВ}_{\text{Индекс}}^{2022}}{Q_{\text{полез}}} = \frac{121132,75}{63785} = 1899,08 \text{ руб./Гкал}$$

Рассчитаем тариф методом индексации установленных тарифов на тепловую энергию в 2022 году с учетом концессионного соглашения.

$$Т_{\text{ИндексКонц}}^{2022} = \frac{\text{НВВ}_{\text{ИндексКонц}}^{2022}}{Q_{\text{полез}}} = \frac{112867,73}{63785} = 1769,51 \text{ руб./Гкал}$$

Расчет тарифа на тепловую энергию с помощью метода индексации установленных тарифов так же, как и расчет по методу экономически обоснованных

затрат, показал возможность уменьшения тарифа благодаря заключению концессионного соглашения с 1899,08 руб./Гкал до 1769,51 руб./Гкал при сохранении всех преимуществ реализации мероприятий по повышению энергоэффективности тепловых сетей и получения желаемой доходности концессионером.

## 6. РАСЧЕТ ТАРИФА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ДОХОДНОСТИ ИНВЕСТИРОВАННОГО КАПИТАЛА

НВВ при расчете тарифа методом доходности инвестированного капитала:

$$НВВ_{РАВ} = ТЗ_{РАВ} + ВК + ДК \quad (11)$$

Прогнозируемые операционные затраты на 2022 год без учета концессионного соглашения:

$$ОР_{РАВ}^{2022} = (З_{С.М.}^{2022} + З_{ЗП}^{2022} + З_{ремонт}^{2022}) К_{ОР} = 39881,65 \text{ тыс. руб.}$$

Прогнозируемые операционные затраты на 2022 год с учетом концессионного соглашения:

$$ОР_{РАВКонц}^{2022} = (З_{С.М.Конц}^{2022} + З_{ЗПКонц}^{2022} + З_{ремонтКонц}^{2022}) К_{ОР} = 38200,77 \text{ тыс. руб.}$$

Найдем затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году.

$$З_{ТЭР} = З_{топливо} + З_{э.ресурсы} \quad (12)$$

Топливная составляющая без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{РАВтопливо}^{2022} = З_{топливо}^{2021} = 61868,52 \text{ тыс. руб.}$$

Топливная составляющая с учетом концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{РАВтопливоКонц}^{2022} = З_{топливоКонц}^{2021} = 53964,71 \text{ тыс. руб.}$$

Расходы на прочиекупаемые энергоресурсы, холодную воду и теплоноситель с учетом и без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$З_{РАВэ.ресурсы}^{2022} = З_{РАВэ.ресурсыКонц}^{2022} = З_{э.ресурсы}^{2021} = 10791,60 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году без учета концессии:

$$З_{РАВТЭР}^{2022} = З_{РАВтопливо}^{2022} + З_{РАВэ.ресурсы}^{2022} = 72660,12 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на приобретение (производство) энергетических ресурсов, холодной воды и теплоносителя в 2022 году с учетом концессии:

$$З_{РАВТЭРКонц}^{2022} = З_{РАВтопливоКонц}^{2022} + З_{РАВэ.ресурсыКонц}^{2022} = 64756,31 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем неподконтрольные расходы (НПР) организации. В рассматриваемом случае они будут равны:

$$НПР = З_{прочее} + А, \quad (13)$$

где  $З_{прочее}$  – прочие затраты,  $А$  – амортизация основных средств.

Прогнозируемые прочие затраты и амортизация в 2022 году без учета концессионного соглашения:

$$З_{РАВпрочие}^{2022} = З_{прочие}^{2022} = З_{прочие}^{2021} = 1050,12 \text{ тыс. руб.}$$

$$А_{РАВ}^{2022} = А^{2022} = А^{2021} = 1299,84 \text{ тыс. руб.}$$

Прогнозируемые прочие затраты и амортизация в 2022 году с учетом концессионного соглашения:

$$З_{РАВпрочиеКонц}^{2022} = З_{прочиеКонц}^{2022} = З_{прочиеКонц}^{2021} = 0 \text{ тыс. руб.}$$

$$А_{РАВКонц}^{2022} = А_{Конц}^{2022} = А_{Конц}^{2021} = 3433,46 \text{ тыс. руб.}$$

Соответственно, НПР без учета концессионного соглашения:

$$НПР_{РАВ}^{2022} = З_{РАВпрочие}^{2022} + А_{РАВ}^{2022} = 2349,96 \text{ тыс. руб.}$$

НПР с учетом концессионного соглашения:

$$НПР_{РАВКонц}^{2022} = З_{РАВпрочиеКонц}^{2022} + А_{РАВКонц}^{2022} = 3433,46 \text{ тыс. руб.}$$

Текущие затраты (ТЗ) находим по формуле:

$$ТЗ = НПР + З_{ТЭР} + ОР \quad (14)$$

Рассчитаем ТЗ без учета концессионного соглашения на 2022 год:

$$ТЗ_{РАВ}^{2022} = НПР_{РАВ}^{2022} + З_{РАВТЭР}^{2022} + ОР_{РАВ}^{2022} = 114891,73 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем ТЗ с учетом концессионного соглашения на 2022 год:

$$ТЗ_{РАВКонц}^{2022} = НПР_{РАВКонц}^{2022} + З_{РАВТЭРКонц}^{2022} + ОР_{РАВКонц}^{2022} = 106390,54 \text{ тыс. руб.}$$

Величина тарифа без учета концессии в данном методе будет совпадать с тарифом по методу экономически обоснованных затрат.

Рассчитываемые ниже величины относятся к расчету прогнозируемого тарифа с учетом принятого концессионного соглашения.

Найдем величину средств, которые обеспечивают возврат инвестированного капитала по формуле:

$$ВК = \frac{ПИК}{СВК}, \quad (15)$$

где ПИК – полный размер инвестиционного капитала, а СВК – срок возврата капитальных средств.

$$ПИК = 1341173,85 \text{ тыс. руб.}$$

$$СВК = 24 \text{ года}$$

Тогда,

$$ВК = \frac{ПИК}{СВК} = \frac{1341173,85}{24} = 55882,24 \text{ тыс. руб./год}$$

Рассчитаем доход на инвестиционный капитал.

$$ДК = НД \times БИК + ЧОК \quad (16)$$

Норма доходности:

$$НД = 1,82\% = 0,0182$$

База инвестиционного капитала для рассчитываемого периода:

$$БИК = 42672,41 \text{ тыс. руб.}$$

Нормативная величина чистого оборотного капитала (ЧОК) равна 5% от НВВ за прошлый расчетный период.

$$ЧОК = 0,05НВВ_{Конц} = 0,05 \times 106390,54 = 5319,53 \text{ тыс. руб.}$$

Находим значение ДК:

$$ДК = НД \times БИК + ЧОК = 6096,16 \text{ тыс. руб.}$$

Рассчитаем необходимую валовую выручку по данному методу:

$$НВВ_{РАВ} = ТЗ_{РАВКонц}^{2022} + ВК + ДК = 168368,94 \text{ тыс. руб.}$$

Для расчета тарифа используем следующую формулу:

$$Т = \frac{НВВ_{РАВ}}{Q_{полез}}, \quad (17)$$

где  $Q_{полез}$  – это полезный отпуск тепловой энергии.

Значение  $Q_{полез} = 63785$  Гкал с учетом концессионного соглашения в 2022 году.



$$T_{RAB\text{Конц}}^{2022} = \frac{HBB_{RAB}}{Q_{\text{полез}}} = \frac{168368,94}{63785} = 2639,63 \text{ руб./Гкал}$$

По результатам расчета с помощью метода доходности инвестированного капитала получилось самое высокое значение тарифа на тепловую энергию, 2639,63 руб./Гкал. Данный результат связан с особенностями расчета по RAB-методу. И не является опровержением экономической эффективности мероприятий по повышению энергоэффективности тепловых сетей в рамках концессионного соглашения.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены расчеты тарифа с помощью трех методов регулирования тарифов в сфере теплоснабжения, а именно:

- Методом экономически обоснованных затрат (затрат);
- Методом индексации установленных тарифов;
- Методом обеспечения доходности инвестированного капитала.

Используя метод ЭОЗ, как базовый метод расчета тарифа на теплоэнергию, были получены затраты на топливную составляющую, прочие энергоресурсы, холодную воду и носитель тепловой энергии, а также на сырье и материалы, ремонтные работы основных производственных фондов, оплату труда рабочего и административно-управленческого персонала, амортизационные отчисления и прочие расходы на регулируемый 2021 год. Затраты на топливо и потери в тепловых сетях оказали самое сильное влияние на величину HBB. По концессионному соглашению было изменение удельного расхода топлива (газа) на выработку одной Гкал тепловой энергии со значения в 163,0 кг. у.т/Гкал. До 159,9 кг. у.т/Гкал., а путем снижения потерь в распределительных сетях до 3% от расчетного отпуска тепловой энергии в сеть удалось добиться значимого снижения объема на 12,47%. Далее по методу индексации и RAB методу были получены значения необходимой валовой выручки на 2022 год регулирования. Каждое значение HBB было поделено на полезный отпуск тепловой энергии, тем самым были получены значения тарифов для данного года и данного метода регулирования

Тариф, установленный на 2021 год с учетом концессии, оказался ниже тарифа в этом же регулируемом году без учета. Такой же исход был и в регулируемом 2022 году. Можно сказать, что концессионное соглашение окажется эффективным. Тари-

фы за 2022 с эффектом концессии и без, рассчитанные методом обеспечения доходности инвестированного капитала корректно сравнить не удалось из-за особенностей расчета.

Проведя расчеты с учетом и без эффекта концессии, можно заметить, что данный вид государственно-частного партнерства является выгодным для всех сторон договора.

Помимо экономического эффекта стоит отметить, что заключение концессионного соглашения позволит достигнуть еще и ряд энергетических эффектов благодаря данной модернизации: снизится количество аварий на теплотрассе за счет повышения надежности нового трубопровода, повысится качество поставляемой тепловой энергии за счет снижения потерь в распределительных сетях.

Так же будет достигнут социальных эффект, заключающийся в снижении темпов роста тарифа на тепловую энергию и в обеспечении бесперебойного теплоснабжения.

Таким образом, повышение энергоэффективности тепловых сетей г. Клин в рамках концессионного соглашения не только экономически эффективно, но и является социально значимым проектом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** "О концессионных соглашениях" от 21.07.2005 N 115-ФЗ (последняя редакция)
2. **Официальный сайт** Российской Федерации для размещения информации о проведении торгов [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://torgi.gov.ru/resources/org.apache.wicket.Application/downloadableResource?class=ContractDocument&id=55075172>
3. **Смирнова Д.А., Шувалова Д.Г.** Концессия как инструмент повышения энергоэффективности при тарифном регулировании // Энергосбережение – теория и практика: Труды Десятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. (Москва, 19-23 октября 2020 г.) – Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2020. – С. 398-403.
4. **Федеральный закон** "О теплоснабжении" от 27.07.2010 N 190-ФЗ
5. **Методические указания** по расчету регулируемых цен (тарифов) в сфере теплоснабжения, утвержденные приказом ФСТ России от 13.06.2013 г. № 760-э.
6. **Основы ценообразования** в сфере теплоснабжения и Правила регулирования цен (тарифов) в сфере теплоснабжения, утвержденные постановлением Правительства Российской Федерации от 22.10.2012 г. № 1075 «О ценообразовании в сфере теплоснабжения».

*Д.А. Смирнова, Д.Г. Шувалова*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **КОНЦЕССИЯ КАК КОМПЛЕКСНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе сделан обзор текущего состояния энергетической отрасли в России. Выявлены особенности инвестирования в энергетическую отрасль, которые создают проблемы по привлечению частного капитала в данную сферу. Рассматриваются различные формы государственно-частного партнерства, в особенности концессия. Разработан механизм согласования целей участников концессии как комплексного инструмента повышения энергоэффективности. В работе приведены результаты расчета эффекта от применения разработанного механизма.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Энергетика является ключевой отраслью российской экономики. Главная цель данной области состоит в том, чтобы преобразовать первичную (например, газ, уголь, солнечная энергия) во вторичную (в тепловую или электрическую) энергию и обеспечить ее распределение на потребности промышленности, народного хозяйства и населения, а также осуществлять экспорт неизрасходованной энергии в страны дальнего зарубежья и СНГ.

В области энергетики имеются проблемы в целом в мире и конкретно в России. Основные из них: источники энергии невозобновляемы, причем распределяются по планете неравномерно; современная энергетическая отрасль приносит колоссальный вред экологической составляющей; всё вышеперечисленное приводит к появлению новых социальных и международных сложностей.

Стоит обратить пристальное внимание еще на одну важную проблему, которая преследует страну годами – это изношенное и морально устаревшее оборудование. Если рассмотреть сегодняшнее состояние ТЭС в Московской области, то при 2,5 тысяч котельных на всей территории более 60% из них нуждается в модернизации, приоритетно порядка 6% котельных — это большие котельные, которые используют жидкое или твердое топливо, и соответственно эффективны.

На все действия по смене положения отрасли необходимы инвестиции, а их в данной сфере привлекается совсем мало.

### **2. ОСОБЕННОСТИ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ ОТРАСЛЬ**

Говоря об инвестиционной деятельности в сфере энергетики, наблюдается тенденция того, что частные инвесторы не стремятся вложить свои средства в проекты данной отрасли. Если задаться вопросом «почему», то однозначный ответ в голову не придет.

Несмотря на:

- большое количество потребителей;
  - широкий спектр возможностей для инвестирования;
  - постоянное развитие отрасли,
- инвесторы не принимают твердые решения о финансировании проектов в энергетической отрасли.

Проблема инвестирования в энергоотрасль вызвана несколькими причинами.

Во-первых, энергетика отличается длительным периодом окупаемости вложенных инвестиций [1]. Считается, что приблизительный срок окупаемости крупных проектов составляет в среднем от пяти до тридцати лет в зависимости от установленной мощности оборудования и финансовых возможностей рынка продаж тепловой и электрической энергии.

Во-вторых, особенностью электроэнергетики является довольно высокая доля государственного участия. Поэтому инвестиции преимущественно могут быть государственными. Это является проблемой для реализации многих инвестиционных проектов, ибо средства государства резко ограничены.

В-третьих, недостаточный объем инвестиций связан с рядом факторов и особенностей функционирования ТЭК РФ. К факторам, снижающим приток реальных инвестиций, можно отнести следующие:

- недостаточное бюджетное финансирование (или отсутствие такого), без которого развитие комплекса достаточно сильно сдерживается;
- высокие издержки производства;
- нерациональная налоговая политика;
- плохая институциональная структура комплекса;

- низкая эффективность регулирования со стороны государства;
- сырьевая направленность государства.

Вышеперечисленные экономические и организационные проблемы энергетической отрасли затрудняют привлечение инвестиций. В сегодняшнее время важно, что политические решения государства были ориентированы на повышение инвестиционной привлекательности российской энергетики для частных инвестиций. Поэтому необходимо применять механизмы государственно-частного партнёрства.

### 3. ФОРМЫ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОТРАСЛИ

Согласно данным Министерства экономического развития Российской Федерации: государствен-

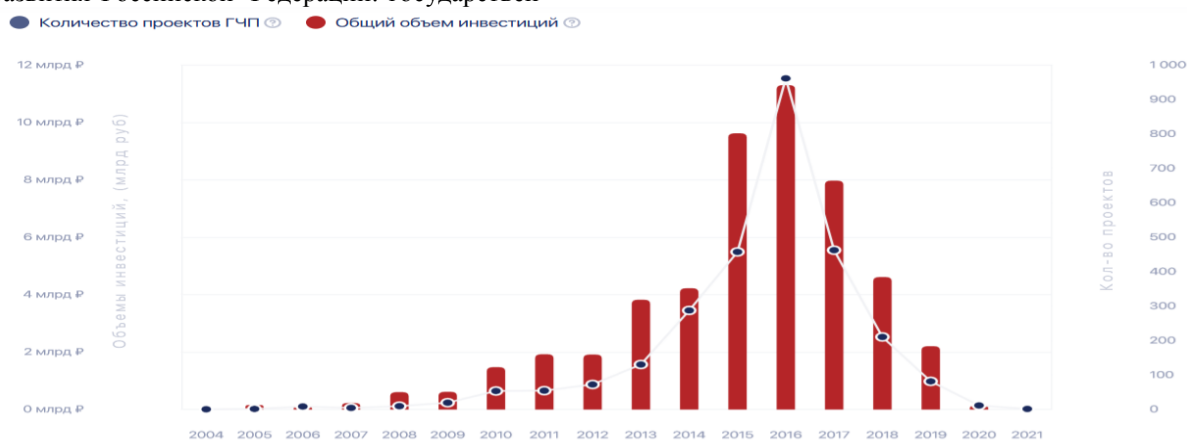


Рис. 1. Диаграмма «Проекты ГЧП в России» [2]

Партнерство государства и частного бизнеса может принимать одну из основных форм [3]:

1. Государственные (муниципальные) контракты.
2. Арендные или лизинговые отношения.
3. Соглашение о разделе продукции.
4. Контракты жизненного цикла.
5. Операторские контракты.
6. Государственно-частные предприятия.
7. Концессионные соглашения.

По оценке Министерства энергетики Российской Федерации, предлагаемые изменения в законодательстве будут способствовать привлечению дополнительных инвестиций в модернизацию энергообъектов, в том числе в изолированных и отдаленных районах нашей страны, для которых модель концессионного соглашения является одной из эффективных форм сотрудничества государства и частного бизнеса.

Концессионное соглашение представляет собой договор о передаче в пользование на возвратной основе на определенный срок (или без указания срока) совокупности исключительных прав, являющихся собственностью правообладателя. В рамках концессии концессионер обязуется создать и (или) реконструировать за собственный счет предоставленное ему во временное пользование на

но-частное партнерство (ГЧП) — юридически оформленное на определенный срок и основанное на объединении ресурсов, распределении рисков сотрудничество публичного партнера, с одной стороны, и частного партнера, с другой стороны, осуществляемое на основании соглашения о государственно-частном партнерстве, в целях привлечения в экономику частных инвестиций, обеспечения доступности и повышения качества товаров, работ, услуг, обеспечение которыми потребителей обусловлено полномочиями органов государственной власти и органов местного самоуправления. На рисунке 1 представлена статистика проектов ГЧП в России с 2004 г. по данным платформа поддержки инфраструктурных проектов «РОСИНФРА».

определенный срок имущество, собственником которого является концедент. [4]

С каждым годом, по мере совершенствования законодательной базы в области концессионных соглашений, число заключаемых концессий постепенно растет. По данным центра государственно-частного партнерства, в 2021 году было заключено 2790 концессионных соглашений (рисунок 2). По статистике муниципальных концессий в разрезе по населенным пунктам было выявлено, что основными отраслями муниципальных концессионных соглашений являются производство, распределение и передача тепловой и электрической энергии. Среди наиболее крупных, заключенных в отношении объектов теплоэнергетики, можно выделить концессионные соглашения ПАО «Газпром теплоэнерго».

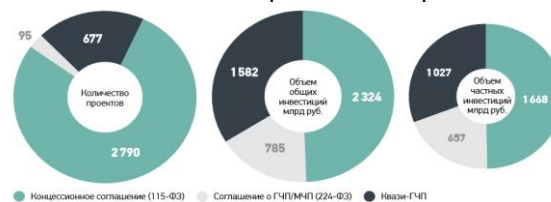


Рис. 2. Договорные формы ГЧП [2]

Однако, отсутствует механизм, позволяющий согласовать цели участников государственно-частного партнерства.

#### 4. МЕХАНИЗМ СОГЛАСОВАНИЯ ЦЕЛЕЙ УЧАСТНИКОВ ГОСУДАРСТВЕННО-ЧАСТНОГО ПАРТНЕРСТВА

Концессию можно рассматривать как систему интересов стейкхолдеров, которые связаны между собой комплексом различных отношений. Интересы участников концессионного соглашения реализуются в условиях действующего законодательства при условии отсутствия ущемления прав прочих лиц. Баланс интересов стейкхолдеров является основной задачей как корпоративного, так и проектного управления.

Процессу заключения концессионного соглашения предшествует этап проведения конкурса. [5] На этом этапе основными взаимодействующими участниками являются концессионер и концедент. Параллельно этим этапам осуществляется взаимодействие концессионера и регулятора на этапе согласования долгосрочных параметров регулирования тарифов. Так же концессионер и регулятор взаимодействуют на этапе согласования органами регулирования перехода организации от регулирования тарифов с применением правил регулирования тарифов, действующих на день заключения концессионного соглашения, к регулированию тарифов с применением правил регулирования тарифов, действующих на день установления тарифов. Каждый из этих этапов рассмотрены подробнее, проанализированы временные интервалы взаимодействия и выявлены резервы их сокращения. На рисунке 3 представлен укрупненно процесс взаимодействия участников в рамках концессионного соглашения общей длительностью до 100 дней.

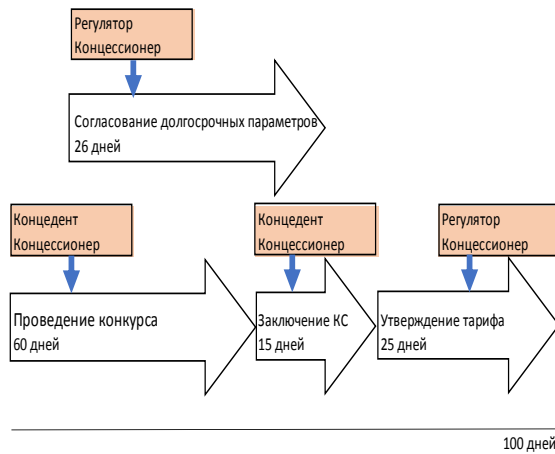


Рис. 3. Процесс взаимодействия участников в рамках концессионного соглашения

Для согласования целей участников государственно-частного партнёрства разработан механизм, представленный на рисунке 4, который обеспечит потенциальный рост «морального» состояния оборудования.

В рамках тарифной программы взаимодействуют концессионер, концедент и регулятор, у каждого из которых свой основной интерес, представленный выше в виде целевой функции. В рамках разработанного механизма предлагается наложить на регулятор дополнительную функцию либо создать координационный центр, который будет вести отдельный мониторинг по каждому виду сотрудничества, сопоставлять тарифные заявки до и после государственно-частного партнерства, вести параллельный анализ динамических рядов таких показателей, как амортизационные отчисления, траты на ремонт, плата концеденту.

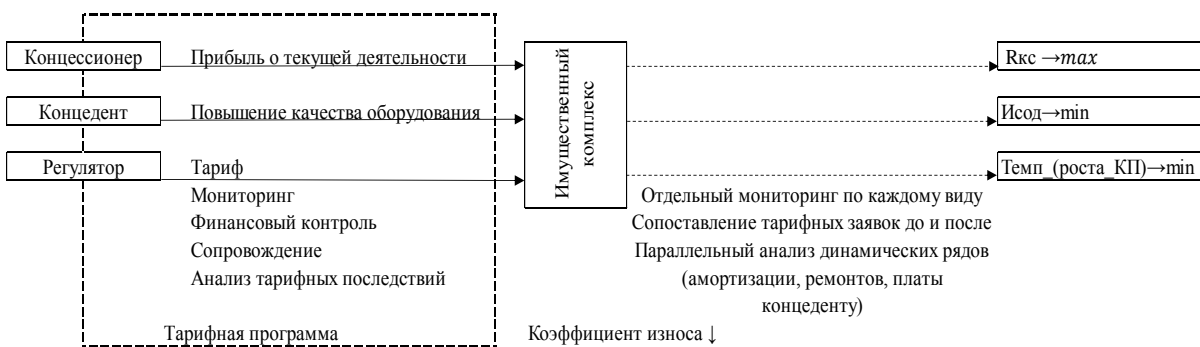


Рис. 4. Механизм согласования целей участников ГЧП, где  $R_{КС}$  – рентабельность продаж от деятельности объекта концессии,  $I_{сод}$  – издержки на содержание оборудования,  $Темп_{роста\_КП}$  – темп роста коммунальных платежей

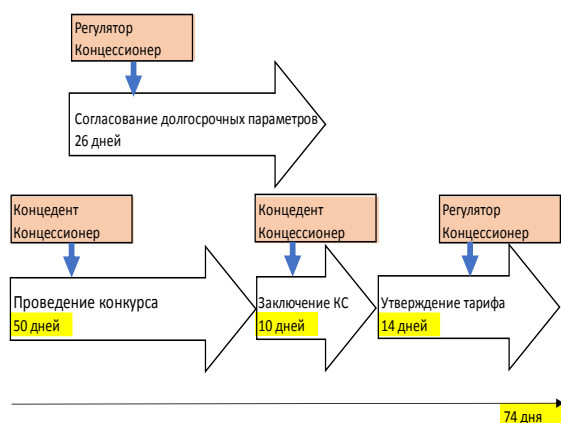


Рис. 5. Процесс взаимодействия участников в рамках концессионного соглашения с применением разработанного механизма

Благодаря разработанному механизму возможно ускорить отдельные этапы взаимодействия в рамках концессионного соглашения. Сокращенные сроки этапов представлены на рисунке 5.

## 5. РАСЧЕТ ЭФФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗРАБОТАННОГО МЕХАНИЗМА

Эффект от применения разработанного механизма можно представить как экономию транзакционных издержек для каждого участника на каждом этапе взаимодействия в рамках концессионного соглашения. Транзакционные издержки – это издержки, не связанные с процессом производства, но связанные с взаимным обменом прав собственности.

На этапе проведения конкурса взаимодействующими участниками являются концессионер и концедент. Данный этап можно сократить на 10 дней. Учитывая заработную плату соответствующих сотрудников, вовлеченных на этом этапе, можно посчитать изменение транзакционных издержек.

Для указанных участников будет экономия транзакционных издержек, а именно: для концессионера – 40,9 тыс. руб., для концедента – 27,3 тыс. руб.

Таблица 1. Экономия транзакционных издержек за счет применения разработанного механизма

Этап	Участник	Сокращение длительности	Экономия ТИ, тыс. руб.
Проведение конкурса	Концессионер	10 дней	40,9
	Концедент		27,3
Согласование параметров	Регулятор	10 дней	31,8
	Концессионер		40,9
Заключение КС	Концессионер	5 дней	20,45
	Концедент		13,6
Утверждение тарифа	Регулятор	9 дней	28,6
	Концессионер		36,8
ИТОГО экономия ТИ		Концессионер	139,05
		Концедент	40,9
		Регулятор	60,4

Аналогично рассмотрены остальные этапы и участники взаимодействия в рамках концессионного соглашения и рассчитана экономия транзакционных издержек, представленная в таблице 1.

По расчету можно сделать вывод, что предложенный механизм эффективен для каждого участника концессионного соглашения, поскольку выявляется возможность снизить транзакционные издержки суммарно для концессионера на 139,05 тыс. руб., для концедента – на 40,9 тыс. руб., для регулятора – на 60,4 тыс. руб.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующую проблему изношенных и устаревших основных фондов в энергетике можно решить, используя различные формы государственно-частного партнерства. Наиболее эффективной показала себя такая форма сотрудничества, как концессия. Концессионное соглашение позволяет привлечь в отрасль частный капитал, но необходимо согласовывать интересы всех участников взаимодействия. При рассмотрении процесса сотрудничества участников в рамках заключения концессионного соглашения были выявлены резервы повышения эффективности данного процесса за счет сокращения отдельных этапов. Разработан механизм согласования целей участников взаимодействия при заключении концессионного соглашения, который позволит использовать выявленные временные резервы. Эффект от предложенного механизма будет достигаться за счет снижения транзакционных издержек.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков А.С. Модель оценки прогнозируемого срока окупаемости инвестиций в энергосбережение // Вестник МГСУ. 2015, №12. С.136-146. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-otsenki-prognoziruemogo-sroka-okupaemosti-investitsiy-v-energoberezhnie>
2. Официальный сайт «РОСИНФРА» - платформа поддержки инфраструктурных проектов [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://rosinfra.ru/>
3. Добрин Алексей Юрьевич. Экономическое обоснование механизмов государственно-частного партнерства в транспортном строительстве: дис. кандидат наук: 08.00.05 - Экономика и управление народным хозяйством: теория управления экономическими системами; макроэкономика; экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами. ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта». 2016. 157с.
4. Федеральный закон от 21 июля 2005 г. № 115 – ФЗ «О концессионных соглашениях» (последняя редакция).
5. Постановление Правительства РФ от 22 октября 2012 г. N 1075 "О ценообразовании в сфере теплоснабжения" (с изменениями и дополнениями).

*Р.И. Туктамышев, Д.А. Смирнова*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА

### АННОТАЦИЯ

В данной работе обоснована актуальность темы газификации частного дома, описан процесс газификации. Приведены расчеты ежемесячных платежей за отопление дома электроэнергией и газом, выявлена экономия при переходе на отопление газом. Посчитана стоимость газификации частного владения, учитывающая плату за оборудование и услуги газораспределительной компании. Проведена оценка экономической эффективности перехода с отопления дома электроэнергией на отопление газом.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газ является высокоэффективным энергоносителем и ценным химическим сырьем. Как источник энергии, он необходим человеку в быту и на производстве. Помимо этого, газ имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами топлива и сырья: стоимость добычи природного газа гораздо ниже, а производительность труда значительно выше, чем при добыче угля и нефти и других видов топлива; высокие температуры в процессе горения и удельная теплота сгорания позволяют эффективно использовать газ как энергетическое и технологическое топливо; высокая жаропрочность (более 2000°C); полное сгорание, значительно облегчающее условия труда персонала, обслуживающего газовое оборудование; отсутствие в природных газах окиси углерода предотвращает возможность отравления при утечках газа, что особенно важно при газоснабжении коммунальных и бытовых потребителей; при работе на природном газе обеспечивается возможность автоматизации процессов горения, достигаются высокие коэффициенты полезного действия. [1]

По ряду объективных и субъективных причин централизованное теплоснабжение постоянно снижает свою эффективность, что ведет к неоправданному росту тарифов на тепловую энергию. [2] Поэтому большой интерес вызывает поквартирное теплоснабжение, когда теплоснабжение квартиры осуществляется от собственного источника, которым в запроектированной системе поквартирного теплоснабжения является газовый настенный котел. Таким образом, тема газификации частных владений актуальна для рассмотрения с технической точ-

ки зрения и требует оценки экономической эффективности.

Целью данной работы является оценка экономической эффективности газификации жилого дома с отапливаемой площадью 220 м<sup>2</sup> в городе Кувандык, Оренбургской области.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: расчет стоимости газификации частного дома; расчет экономической выгоды с переходом от отопления электроэнергией на отопление газом; расчет экономической выгоды для газовой компании при газификации частного дома.

### 2. ПРОЦЕСС ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТНОГО ДОМА

Газификация – это деятельность по реализации научно-технических и проектных решений, осуществлению строительных и монтажных работ, а также организационных мер, направленных на использование газа в качестве топливного и энергетического ресурса на объектах жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных участках.

Централизованное газоснабжение представляет собой транспортировку и доставку газа до объекта потребителя. Подключение делится на два этапа – организация и установка. Сначала необходимо собрать и подготовить всю техническую документацию, подать заявление в газовую службу.

После одобрения газовая служба подводит газовую магистраль к участку, присоединяет к газораспределительной сети, устанавливает газовый счетчик и запускает газ.

Документы, необходимые для рассмотрения в газовой службе.

- документы, подтверждающие право собственности заявителя на дом и земельный участок;
- документ, подтверждающий соответствие технических условий дома с газораспределительной сетью (ТУ);
- копия паспорта;
- схему земельного участка и прилегающей территории;
- расчёт планируемого расхода газа;
- проект газификации.



В заявление указывается адрес дома, паспортные данные и почтовый адрес, адрес электронной почты и номер телефона.

Заявление принимается в электронном виде или в отделе приема документов.

Газовая служба рассматривает заявление в течении 3-х дней. Если не хватает каких-либо документов, то у клиента есть 20 дней для того, чтобы собрать недостающие документы.

После подачи заявления клиентом газифицируемому объекту присваивается категория. Категория зависит от расстояния объекта до газовой магистрали, требуемой мощности, давления внутри газопровода и других факторов.

Первая категория – объекты на расстоянии до 200 метров от газопровода, потребляющие не более 42 м<sup>3</sup> газа в час при давлении до 0,3 МПа. В первую категорию попадают только те объекты, газопровод к которым можно подвести открытым способом – вырыть траншею. Если между домом и газопроводом дорога, придется делать под ней тоннель – это уже другая категория.

Вторая категория – до 500 м<sup>3</sup> газа в час при давлении до 0,6 МПа при расстоянии до 300м в границах города или до 500 м в сельской местности. Газопровод должен проходить по территории одного муниципального образования.

Третья категория совпадает по условиям со второй, но газопровод проходит по территории двух и более муниципальных образований.

Для каждой категории есть исключение. Если требуется индивидуальный проект, стоимость подключения будет зависеть от результата проектирования.

Для газификации частного дома требуется основной документ – технические условия. Технические условия выдает газораспределительная организация. Все технические условия, установка газового оборудования с соблюдением норм безопасности обязательны к выполнению.

Для подключения к газу частный дом и участок, на котором он расположен, должны быть зарегистрированы в Росреестре. Если недвижимость находится в ипотеке, может потребоваться согласие банка-залогодержателя.

Кроме документов на собственность, к заявлению нужно приложить:

- Топографическую карту участка.
- Проект дома.
- Проект и расчет МЧРГ (если планируемый расход более 5 м<sup>3</sup>/час).
- Ситуационный план — схему участка с домом и прилегающей территорией.

Оборудование обычно устанавливают в специальном помещении дома – котельной. Рекомендуется заранее купить оборудование и подключить его к системе отопления дома для того, чтобы газификация прошла быстрее. Потребуется котел, счетчик, датчики газа и обустройство вентиляции в котельной. Точный список оборудования и требования к установке указываются в проекте.

Урегулировав все вопросы в газовой службе, необходимо обратиться в проектную организацию, которых существует на сегодняшний день огромное количество. При обращении в ту или иную проектную организацию или проектный институт обязательно стоит проверить наличие лицензии на выполнение данного вида работ.

Разница стоимости услуг порой достигает от 10 до 50 тысяч рублей. Но будет лучше сразу спросить в газовой службе, какую проектную фирму они рекомендуют.

Если требуется выезд на дом инженера - проектировщика для осуществления всех необходимых замеров, необходимо обратить внимание, чтобы этот пункт был оговорен в договоре.

Именно с проектировщиком согласовывается размещение газовых приборов в доме и марка желаемого отопительного оборудования. Когда проект будет готов, ответственное лицо (проектировщик) должен будет в обязательном порядке согласовать его с техническим отделом газовой службы. Данная процедура может занять от 10 до 14 календарных дней.

После составления проектной документации и получения разрешения на газификацию, клиент и компания заключают договор о подключении. Этот документ заключается в установленном Гражданским Кодексом РФ порядке. Согласно договору, исполнитель (ГРО) обязан подключить дом или другое капитальное строение к газораспределительной сети с учётом всех параметров, указанных в технических условиях. Заявитель должен оплатить услуги по технологическому присоединению. Договор заключается письменно в двух экземплярах. Каждый экземпляр содержит следующие условия:

- список технических работ по подключению;
- обязательства сторон;
- сроки проведения работ;
- стоимость проекта газоснабжения (за исключением случаев, когда проект разработан сторонней организацией);
- размер и сроки внесения заявителем платы за технологическое подключение;
- порядок разграничения принадлежности сетей газопотребления и газораспределения;
- ответственность сторон за несоблюдение пунктов договора.

Здесь перечислены основные условия договора. В договор могут быть внесены дополнительные условия в зависимости от дополнительных факторов.

После оформления всех юридических формальностей исполнитель отправляет в исполнительный орган по регулированию тарифов заявку об установлении стоимости технологического присоединения. При этом нужно уведомить заказчика не позднее 5 дней с момента отправки заявления. К заявке прилагается договор о подключении, положительное экспертное заключение сметных и проектных документов, сметная документация с указанием стоимости каждого вида работ.

Изучив всю документацию, орган исполнительной власти в течение 22 дней без учёта выходных утверждает размер платы по каждому виду работ в отдельности. В случае отказа заявителя от подключения домовладения к газопроводу после заключения соглашения и проведения экспертиз, собственник домовладения компенсирует исполнителю все подтверждённые расходы.

Плата за подключение обязывает подрядчика провести газораспределительную сеть к точке подключения и подготовке объекта к пуску газа не позднее сроков, установленных договором. Разводка коммуникаций по участку и внутри дома заявителя оплачивается отдельно. Если эти работы будут проведены специалистами газораспределительной организации, то их стоимость рассчитают по тарифным ставкам. Чтобы сэкономить время для проведения работ в границах участка и внутри капитального строения, можно привлечь сторонние компании. В этом случае оплату начисляют по рыночным ценам.

Если к границе участка проложена газораспределительная сеть, монтажные работы по проведению газа в частный дом для граждан первой категории, должны начаться не позднее 9 месяцев после оплаты технологического присоединения. Подключение дома к газопроводу должно быть выполнено в 10-дневный срок с момента начала работ.

Заключительный этап монтажных работ – установка счётчика, подключение газовых приборов, проверка системы на возможные утечки, проверка вентиляции и контрольный пуск газа. Эти работы могут проводить только сотрудники ГРО. После этого подписывается акт готовности, собственник дома получает квитанцию технадзора, и документы опять направляются в газораспределительную организацию. В течение трёх недель должны прийти работники горгаза и опломбировать газовый счётчик. Затем с потребителем заключается договор на

поставку газа и включают капитальное строение в систему газоснабжения.

### 3. ЗАТРАТЫ НА ГАЗИФИКАЦИЮ ЧАСТНОГО ДОМА ДЛЯ КЛИЕНТА

Газораспределительная организация АО «Газораспределение Оренбург» выполняет газификацию индивидуального жилого дома, расположенного по адресу Оренбургская область, Кувандыкский р-н, г. Кувандык, ул. Теннисная.

Максимальный расход газа 5,3 м<sup>3</sup>/час. Газопровод к объекту – котельное административное здание, расположенное по адресу Кувандыкский р-н, г. Кувандык, ул. Маршала Жукова, д. 5а. Срок подключения объекта капитального строительства к сетям газораспределения составляет до 8 месяцев.

В настоящее время природный газ является наиболее привлекательным энергетическим ресурсом для отопления индивидуальных жилых домов, прежде всего из-за его экономичности. Удельная теплота сгорания 1 м<sup>3</sup> природного газа – 8000 Ккал, а 1кВт·ч электроэнергии позволяет получить всего 864 Ккал. Тарифы в Оренбургской области на данный момент составляют:

Газ - 6,44 руб/м<sup>3</sup>

Электроэнергия – 3.3 руб/ кВт.ч

При существующих тарифах цена 1 Гкал при использовании газа составляет 805 рублей, а при использовании электроэнергии – 3919,4 рублей.

В среднем, в одном частном доме на отопление тратится 0,0010609 Гкал на 1 м<sup>2</sup> в день. Отапливаемая площадь в доме составляет 220 м<sup>2</sup>. В таблице 1 представлена представлены ежемесячные платежи при отоплении электроэнергией с учетом температурного режима и графика необходимого отопления. В таблице 2 аналогично представлены ежемесячные платежи при отоплении газом.

Таблица 1. Ежемесячные платежи за отопление электроэнергией

Месяц	S Общ (кв.м)	Кол-во отапливаемых дней	Средний норматив в день (Гкал/день)	Потребление в месяц (Гкал/месяц)	Стоимость 1 Гкал (в руб)	Плата за услугу в месяц
Январь	220	31	0,0010609	7,235338	3 919,4	28 358,18
Февраль	220	28	0,0010609	6,535144	3 919,4	25 613,84
Март	220	31	0,0010609	7,235338	3 919,4	28 358,18
Апрель	220	30	0,0010609	7,00194	3 919,4	27 443,4
Май	220	10	0,0010609	2,33398	3 919,4	9 147,8
Сентябрь	220	8	0,0010609	1,867184	3 919,4	7 318,24
Октябрь	220	31	0,0010609	7,235338	3 919,4	28 358,18
Ноябрь	220	30	0,0010609	7,00194	3 919,4	27443,4
Декабрь	220	31	0,0010609	7,235338	3 919,4	28 358,18
Итого		230	0,244	53,71157		210 399,4

Таблица 2. Ежемесячные платежи за отопление газом

Месяц	S Общ (кв.м)	Кол-во отапливаемых дней	Средний норматив в день (Гкал/день)	Потребление в месяц (Гкал/месяц)	Стоимость 1 Гкал (в руб)	Плата за услугу в месяц
Январь	220	31	0,0010609	7,235338	805	5 824,45
Февраль	220	28	0,0010609	6,535144	805	5 260,79
Март	220	31	0,0010609	7,235338	805	5 824,45
Апрель	220	30	0,0010609	7,00194	805	5 636,56
Май	220	10	0,0010609	2,33398	805	1 883,54
Сентябрь	220	8	0,0010609	1,867184	805	1 503,08
Октябрь	220	31	0,0010609	7,235338	805	5 824,45
Ноябрь	220	30	0,0010609	7,00194	805	5 636,56
Декабрь	220	31	0,0010609	7,235338	805	5 824,45
Итого		230	0,244	53,71157		43 218,28

Таблица 3. Расчет чистого дисконтированного потока платежей

Дата		01.05.22	01.06.22	01.07.22	01.08.22	01.09.22	-	01.03.25	01.04.25
Шаг	0	1	2	3	4	5	-	35	36
Инвестиции	100216,09	-	-	-	-	-	-	-	-
Ежемесячные платежи при отоплении электроэнергией		9 147,8	0	0	0	7 318,24	-	28 358,1	27 443,4
Индекс-дефлятор тарифа на электроэнергию				1,036			-		
Ежемесячные платежи при отоплении электроэнергией с учетом роста тарифа		9 147,8	0	0	0	7 581,7	-	34 058,4	32 959,7
Плата за газ		0	0	0	0	0	-	5 824,4	5 636,6
Индекс-дефлятор цены за газ							-		
Плата за газ с учетом роста цены на газ		0	0	0	0	0	-	6 513,4	6 303,4
Процент за кредит		1 000	976,79	953,35	929,67	905,76	-	65,62	33,07
Ежемесячные платежи после газификации		10 147,8	976,79	953,35	929,67	8 487,46	-	6 579,10	6 336,44
Разница ежемесячных платежей		-1 000	-976,79	-953,35	-929,67	-905,76	-	27 479,30	26 623,3
Чистый поток платежей	-100216,9	-1 000	-976,79	-953,35	-929,67	-905,76	-	27 479,3	26 623,3
Чистый дисконтированный поток платежей		-984,2	-946,26	-909,0154	-872,477	-836,6515	-	15766,2	15034,5
Чистый дисконтированный поток платежей нарастающим итогом	-100216,9	-	-102147,4	-103056,4	-103928,9	-104765,6	-	205158,4	220192,9

Первоначальные затраты на газификацию частного дома составляют 45 216,09 рублей за газификацию дома и затраты на стоимость газового котла 55 000 рублей. Складывая все затраты на газификацию и стоимость котла, получаем величину капитальных затрат:

$$A = 45\,216,09 + 55\,000 = 100\,216,09 \text{ рублей.}$$

#### 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТНОГО ДОМА ДЛЯ КЛИЕНТА

Годовые затраты при отоплении электроэнергией составляют 210 399,4 рублей. Годовые затраты при отоплении газом составляют 43 218,28 рублей. Ежегодная экономия получается 167 181,12 руб. Смотря на полученные результаты, видно, что при отоплении газом все затраты окупаются за год, а точнее:

$$100\,216,09 \div 167\,181,12 = 0,6 \text{ год или } 7,2 \text{ месяца}$$

Расчет показал, что простой срок окупаемости газификации дома составит 7,2 месяца.

В работе был рассмотрен альтернативный источник финансирования газификации – кредит для частного лица. Сумма кредита предполагается 100 000 руб., т.е. оплата газового котла и оказываемых услуг полностью за счет заемных средств. Кредит берется на 3 года под 12% годовых.

Так как кредит берется на три года, а выплаты процентов происходят каждый месяц, следовательно, будет 36 месяцев оплаты по кредиту, или 36 шагов.

В работе составлена таблица 3 для расчета всех необходимых значений, учитывая темп инфляции и рост цен на тарифы по оплате электроэнергии и газа в Оренбургской области.

Тариф на электроэнергию повышается раз в полгода на определенный индекс-дефлятор тарифа. Первого июля 2022 года данный индекс равняется 1,036. Далее каждые полгода, индекс-дефлятор равняется 1,03 исходя из данных, представленных на официальном сайте Оренбургской области [3]. Для того, чтобы получить актуальные цены с учетом индекса-дефлятора необходимо умножить строку с базовыми ценами, на строку с учетом индекса-дефлятора.

Далее по аналогии рассчитывается величина оплаты за газ, учитывая индекс-дефлятор повышения цен на тариф. Данный индекс 1 июля 2023 года равняется 1,055, а 1 июля 2024 года, равняется 1,06.

Так как кредит берется на три года, необходимо учесть в общем потоке платежей суммы ежемесячных выплат процентов по кредиту согласно кредитному договору.

В строке «Ежемесячные платежи после газификации» указывается сумма, которую клиент будет платить каждый месяц за энергию с учетом процентов за кредит. Первые 8 месяцев клиент оплачивает электроэнергию, так как в это время идет газификация дома. Далее клиент переходит на оплату газа с учетом процента за кредит.

Далее рассчитывается разница между оплатой электроэнергии и оплатой газа с учетом процента за кредит на каждом шаге расчетного периода. В строке «Чистый поток платежей» указывается поток денежных средств, учитывающий объем инвестиций в размере 100 216,9 рублей и ежемесячную разницу в платежах до и после газификации частного дома. Для того, чтобы рассчитать точную сумму денежных средств, которые удалось сэкономить после перехода на отопление газом, рассчитывается чистый дисконтированный доход по формуле:

$$NPV = \sum_1^n \frac{P_t}{(1+d)^t} - I_0 \quad (3)$$

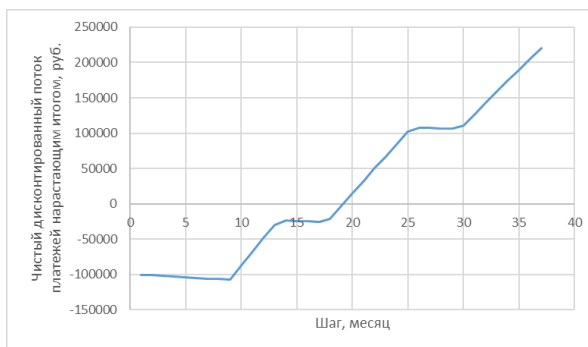


Рис. 1. Дисконтированный срок окупаемости проекта

Чистый дисконтированный доход по проекту газификации частного дома с учетом заемного источника финансирования составил 220 192,86 рублей. Составим график потока платежей, чтобы понять, через какое время данный проект окупится и начнет приносить прибыль. Из рисунка 1 видно, что вложенные денежные средства с учетом выплаченных процентов по кредиту окупятся через 19 месяцев. Данный проект можно признать экономически эффективным даже с учетом заемных источников финансирования.

#### 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗИФИКАЦИИ ЧАСТНОГО ДОМА ДЛЯ КОМПАНИИ

Перечень материалов для газификации, на примере частного дома, расположенного по адресу: Оренбургская обл., г. Кувандык, ул. Теннисная, представлен в таблице 4.

Таблица 4. Затраты на материалы при газификации на примере частного дома

№	Материал	Стоимость
1	Отвод гнутый короткий 25	166,00
2	Отвод гнутый короткий 20	63,00
3	Труба водогазопров. ГОСТ 3262-75 32*3,2	40,15
4	Кран шаровый 11Б27п ДУ25 Ру 16 газ рычаг м-м	434,00
5	Кран шаровый латунный 11Б27п ДУ20 РУ40 рычаг LD Pride	323,00
6	Кран газовый шаровый 11Б27П Ду 15 Ру 16	162,00

7	Резьба стальная ДУ 25	84,00
8	Резьба ДУ 20 мм	13,00
9	Резьба 15 черн.	7,00
10	Труба газовая 20х2,8	1782,95
11	Труба водогазопров. 25*2,8 ГОСТ 3262-75	1271,85
12	Труба водогазопров. 15*2,8 ГОСТ 3262-75	554,70
13	Труба ПЭ100 газопроводная SDR11D32х3	61,00
14	Ввод цокольный полиэтилен-сталь 32х25 ПЭ 100 SDR11 2,0мх\ х 1,5м ГБ АГ-Р	13628,00
15	Муфта электросварная с легко улаемым упором ПЭ100 SDR11 D32	818,00
16	Провод установочный ПуГВ 1*4 белый	410,00
17	Лента сигнальная «ГАЗ» с логотипом «Опасно ГАЗ» - 200 мм, 250п.м	20,00
18	Муфта 25	124,00
19	Сгон	70,00
20	Сгон изолирующий ИССГ-25	710,00
21	Контргайка 25	195,00
	итого	20937,65

Затраты компании на материалы обошлись в 20937,65 рублей. Полная газификация дома для клиента обойдется в 45 216,09 рублей. Валовая прибыль компании составила 24 278,44 рублей.

Основная ставка по налогу на прибыль составляет 20 процентов (п. 1 ст. 284 НК РФ).

$$24\ 278,44 \times 0,2 = 4\ 855,68 \text{ руб.}$$

Компания выплатит 4 855,68 руб. налогов на прибыль от данной сделки.

Чистая прибыль компании по данной сделке составит:

$$24\ 278,44 - 4\ 855,68 = 19\ 422,76 \text{ руб.}$$

Чистая прибыль компании составит 19 422,76 руб., что говорит о том, что данная сделка эффективна.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен расчет стоимости газификации частного дома, расположенного в г. Кувандык, по адресу ул. Теннисная, а также, оценена экономическая выгода отопления дома газом вместо

электричества. При анализе результатов расчета было выявлено, что отопление дома газом значительно экономичнее и эффективнее, чем отопление электроэнергией. Для клиента был проведен расчет для двух вариантов финансирования:

- 1) оплата услуг газификации и покупка необходимого оборудования за счет собственных средств,
- 2) использование кредита банка для газификации своего дома.

Рассчитана ежегодная экономия платежей за теплоснабжение дома, за счет которой проект по газификации дома окупится за 7,2 месяца. Данное значение получено, используя показатели оценки экономической эффективности без учета фактора времени.

Так же была проведена оценка экономической эффективности с учетом фактора времени при ставке дисконтирования 20% и с учетом темпов роста цен на газ и электроэнергию. В этом случае дисконтированный срок окупаемости проекта составит 19 месяцев. Чистый дисконтированный доход за расчетный период 3 года получится 220 192,86 рублей.

Помимо экономической выгоды для клиента была рассчитана экономическая выгода для компании, которая проводит газификацию дома. Подробно были учтены все затраты на газификацию, а также был учтен налог на прибыль. Было выяснено, что данный проект по газификации частного дома экономически выгоден и приносит прибыль.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шелгинский А.Я.** Системы отопления жилых, общественных и производственных зданий: учебное пособие по курсам "Энергетические системы обеспечения жизнедеятельности", "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" для студентов, обучающихся по направлению "Теплоэнергетика". Москва : Изд. дом МЭИ, 2012. - 113 с
2. **Жила В.А.** Газоснабжение : учебник для студентов вузов по специальности "Теплогазоснабжение и вентиляция" Москва : Издательство АСВ, 2014. – 368 с.
3. **Официальный сайт** Оренбургской области [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.ural56.ru/news/665581/>

## **ИНЖИНИРИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе рассматривается инженеринговый проект модернизации 4 энергоблока Костромской ГРЭС и его влияние на основные экономические элементы затрат.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Повышение энергетической эффективности и обеспечение энергосбережения являются одними из основных направлений государственной политики в части обеспечения энергетической безопасности страны. Одной из составляющих этих направлений является рынок инженеринговых услуг, спектр которых постоянно расширяется. Основой инженеринга является практическое применение технических и технологических решений. Основное внимание современного инженеринга направлено прежде всего на разработку и реализацию технических решений с целью снижения расходов ресурсов в технологиях и, как следствие, затрат на производство. Исходя из этого инженеринг можно назвать одним из способов повышения энергоэффективности объекта.

### **2. ВЛИЯНИЕ ИНЖИНИРИНГА НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС**

Инженеринг способствует ускоренному росту выпуска инновационной продукции и повышает привлекательность отрасли для инвестиционной деятельности, с помощью использования передовых достижений науки в решении производственных задач. Российские инженеринговые компании, в том числе ПАО «Интер РАО», имеют колоссальный потенциал и могут быть крайне полезны российской экономике. Благодаря достаточно накопленному опыту они готовы занять активную позицию в развитии инновационной экономики страны. Применение информационных технологий позволят оптимизировать производственные процессы с использованием вычислительных возможностей компьютеров, что позволяет применять на производстве автоматизированные системы управления. Их использование позволит сократить нагрузку на сотрудников, а также обеспечит стабильное и качественное производство. Помимо качества новые технологии позволяют производить продукцию за меньшую себестоимость и с меньшим количеством используемых ресурсов.

Также инженеринговыми компаниями проводится энергоаудит деятельности, с помощью ко-

торого оцениваются затраты на энергоносители, динамика материальных затрат, затраты и объемы потребляемых энергоресурсов и расчет необходимого их количества.

### **3. ЭФФЕКТ ИНЖИНИРИНГОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

В данной статье на примере ПАО «Интер РАО» более подробно рассмотрен эффект от расширения деятельности в области инженеринга.

Компания предоставляет на рынке инженеринга следующие услуги [1]:

- проектирование объектов энергетики;
- поставка основного и вспомогательного оборудования;
- пусконаладочные работы и ввод объекта в эксплуатацию;
- выполнение функции инженера-заказчика;
- энергетический консалтинг;
- вывод из эксплуатации объектов энергетики.

Согласно годовому отчету компании за 2020 год, выручка составила 986,3 млрд. руб. из них 17,0 млрд. руб. (1,72%) составляет выручка от результатов инженеринговой деятельности.

Костромская ГРЭС – одна из самых крупных и технически совершенных тепловых электростанций России, имеющая рекордные показатели по экономии условного топлива среди предприятий своего класса. Она занимает третье место по установленной мощности (3600 МВт без учета эффекта модернизации) и вырабатывает около 1,5% от общего объема производимой в России электроэнергии (ежегодный отпуск электроэнергии станцией составляет порядка 15 млрд кВт\*ч) [2].

В настоящее время электроэнергия Костромской ГРЭС поставляется на федеральный оптовый рынок через региональные энергетические компании Костромской, Ивановской, Ярославской, Владимирской, Московской и Нижегородской областей – всего более чем сорока регионов России и в страны ближнего зарубежья. Эта станция эксплуатируется с 1969 года, в связи с чем оборудование является технологически устаревшим, а проектное значение удельного расхода топлива составляет 327 г.у.т./кВт·ч.

Костромская ГРЭС включена в госпрограмму модернизации российской энергетической отрасли КОМмод (конкурентный отбор проектов модернизации тепловой генерации). Предстоящие



мероприятия: замена цилиндра высокого давления с заменой или модернизацией части (цилиндра) среднего давления турбины с промежуточным перегревом пара для конденсационной паровой турбины, станционный номер БЛ4ТГ4, с увеличением установленной мощности с 300 до 330 МВт. Замена трубопроводов острого пара, пром-перегрева, питательной воды технологического соединения «котел-турбина» для конденсационной паровой турбины, станционный номер БЛ4ТГ4, с увеличением установленной мощности 330 МВт. Модернизация кроме увеличения мощности была также направлена на снижение расхода ресурсов, особенно удельного расхода топлива. Суммарные капитальные вложения в модернизацию оцениваются в 1 468,5 млн. руб. [3].

По итогу реализации масштабной модернизации на первом этапе 20 декабря 2021 года на Костромской ГРЭС был введен в эксплуатацию 8 энергоблок в рамках реализации президентской программы. Его установленная мощность также была увеличена с 300 МВт до 330 МВт.

Проведенные работы позволили не только продлить ресурс оборудования на 25 лет и обеспечить его надежную работу, но и существенно

**Таблица 1. Сводная таблица по издержкам до и после модернизации**

Издержки, млн. руб.	До модернизации	Доля, %	После модернизации	Доля, %	Прирост, %
Всего, в т.ч.:	1 599	100	1 592,61	100	-0,4
- топливо	1 039,35	65	997,78	62,7	-4
- амортизационные отчисления	207,87	13	228,66	14,4	+10
- ремонт	143,91	9	158,3	9,9	+10
- ЗП	95,94	6	95,94	6,0	0
- прочие	111,93	7	11,93	7,0	0

Таким образом, в результате проведения предстоящих мер по модернизации энергоблока снизились расходы ресурсов и затраты на производство электроэнергии, что говорит об увеличении эффективности.

В конечном счете, при реализации масштабной модернизации всех 8 энергоблоков станции ее установленная мощность увеличится на 240 МВт и составит 3840 МВт [2]. Учитывая опыт уже реализованных проектов, удельный расход топлива снизится на 60-72 г.у.т./кВт·ч. Это позволит станции увеличить выработку продукции, снизить себестоимость отпускаемой электроэнергии и тариф на нее, что улучшит ее конкурентоспособность на рынке сбыта.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инжиниринг является универсальным средством для повышения эффективности энергетических объектов. Использование в своей деятельности энергетического аудита, достижения информацион-

улучшить показатели эффективности станции. Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии был снижен в среднем на 10-12 г.у.т./кВт·ч [4]. Это позволит сократить расходы топлива на 4,81-4,84 млн. т.у.т. в год, то есть на 3,1-3,7%. В денежном эквиваленте годовая экономия составит около 18 млн. руб.

На основании этих данных был проведен расчет по основным элементам затрат блока, при условии неизменности режима работы: количество часов использования электрической мощности, цена используемого топлива, потери, связанные с транспортировкой топлива, доля затрат на ремонтные работы, норма амортизации, численность эксплуатационного персонала и т.д. Прочие затраты и заработная плата остались такими же, как и до модернизации. В связи с ростом установленной мощности, снизился штатный коэффициент и по итогу общая численность обслуживающего персонала не изменилась, в следствие их заработная плата осталась на прежнем уровне.

В результате, получились следующие изменения по элементам затрат, представленные в таблице 1.

ных технологиях и строительство решают главную проблему энергосбережения – повышение эффективности энергетических объектов страны.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГРЭС – сокращенное название государственной районной электростанция.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Услуги** // "Интер ПАО - Инжиниринг" URL: <http://ira-engineering.ru/ru/servise/> (дата обращения: 21.06.2022).
2. **Костромская ГРЭС** // Интер ПАО URL: <https://ira-generation.ru/stations/kostromag/>
3. **РАСПОРЯЖЕНИЕ** от 2 августа 2019 г. № 1713-п // Правительство России URL: <http://government.ru/docs/all/123337/>
4. **Статья**. Интер ПАО ввело в эксплуатацию 1-й энерго-объект в рамках президентской программы модернизации тепловой генерации // Neftegaz.ru URL: <https://neftegaz.ru/news/energy/717085-inter-raovvelo-v-ekspluatatsiyu-1-y-energoobekt-v-ramkakh-prezidentskoy-programmy-modernizatsii-tep/>

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА АТОМНОЙ ЭНЕРГОСТАНЦИИ

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время развитие атомных электростанций замкнутого цикла весьма актуально, т.к. данная технология направлена на повторное использование уранового топлива и является частью политики энергосбережения. Внедрение замкнутого цикла приведет не только к экономии топливно-энергетических ресурсов, но и к сокращению отходов и, как следствие, к улучшению экологической составляющей, а также к снижению удельных капитальных вложений в создаваемые объекты атомной энергетики.

Атомная энергетика – одно из основных направлений развития науки в России, так как именно в этой сфере наша страна занимает одно из лидирующих положений. Она является частью такого направления как низкоуглеродная экономика.

Актуальность рассмотрения ядерной энергетики как части общей политики энергосбережения, состоит в том, что данная технология имеет большую энергоёмкость ядерного топлива. Стоит отметить относительно недорогую стоимость уранового топлива. [0] По биржевым данным стоимость одного фунта необогащенного урана составляет 51,3\$.

Основным вопросом в ядерной энергетике является сохранение отработанного урана, применяемый метод является достаточно затратным и требует наличия свободных территорий и специально обученного персонала [2].

Решение данного вопроса возможно при реализации технологии замкнутого цикла, при которой из использованного топлива выделяются определенные химические элементы для повторного их использования [3].

Проведенный анализ тенденций развития атомной энергетики показал, что серийное сооружение реакторов со средним темпом ввода один реактор за два года позволит в период с 2028 г. до 2040 г. задействовать в топливный цикл атомной энергетики порядка 80 т плутония, утилизировать около 8800 тонн ОЯТ и приблизительно на 20% сократить ежегодное потребление природного урана на 1 ГВт установленной мощности.

Удельные капитальные затраты на постройку подобных реакторов ниже на 10% по сравнению с этим показателем для используемых на данный момент реакторов, стоимость которых 4000 долл./кВт.

В работе были рассмотрены примеры тенденций развития атомной энергетики (рис. 1). Существующие тепловые реакторы были объединены в две группы: РБМК и ВВЭР. В будущем на ввод в систему ядерной энергетики рассматриваются реакторы ВВЭР, ВВЭР ТОИ (модифицированный реактор ВВЭР с повышенной глубиной выгорания), ВВЭР МОКС (модифици-

рованный реактор ВВЭР на МОКС топливе), БН1200 на МОКС и СШУП топливе и БРЕСТ 1200 (далее используется аббревиатура БР1200) на СШУП топливе (возможный вариант пуска данного типа реакторов на нитридном обогащенном урановом топливе не рассматривался). Выше перечисленные реакторы модифицированы по принципу замкнутого цикла. Предполагается, что ВВЭР и ВВЭР ТОИ могут быть введены в эксплуатацию начиная с первого года прогнозного периода, БН 1200 – с 2030 г., БР1200 и ВВЭР МОКС – с 2040 г.

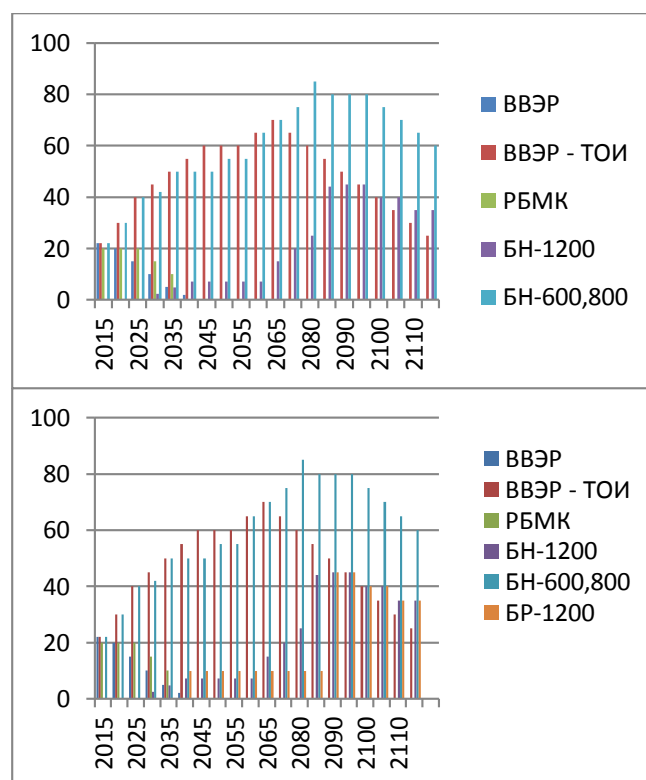


Рис. 1. Примеры типовых оптимальных структур ядерной энергетики (годовые данные объединены по пятилеткам): а) - вариант 1; б) – вариант 2. [5]

С учетом принятых консервативных предположений относительно стоимостных данных, удельные дисконтированные затраты на производство электроэнергии (ЛУЕС) тепловыми реакторами оказываются меньше, чем быстрыми. В расчетах норма дисконтирования принималась равной 5% [4]. В то же время, поскольку запасов природного урана недостаточно для обеспечения заданного роста мощностей ядерной энергетики, в ее структурах необходимы реакторы, работающие на плутониевом топливе: в варианте 1 – БН 1200 на МОКС топливе, в варианте 2 – БН 1200 и БР 1200 на СШУП топливе, оптимальная доля которых в системе на каждом временном интервале опре-

деляется из решения оптимизационной задачи. На рис. 1 можно увидеть модель ввода реакторов в систему.[5]

Далее в работе был рассмотрен вопрос о непосредственно стоимости данной технологии. Для этого был проведен анализ проекта, в котором идёт упор на экономию по выбору площадок для размещения производств. Для различных вариантов размещения был выполнен анализ следующих элементов текущих затрат [6]:

- затраты на обеспечение сырьем и комплектующими, химреагентами и вспомогательными материалами;
- затраты на обеспечение контейнерами, энергоносителями;
- затраты на охрану труда;
- величина амортизации зданий и сооружений, оборудования, транспортных средств;
- расходы на содержание и эксплуатацию, ремонт и техническое обслуживание зданий и сооружений;
- прочие расходы.

Были изучены аспекты технико-экономического обоснования выбора основных технических решений при создании реакторов замкнутого цикла (ЗЯТЦ) [6].

В работе также были рассмотрены вопросы снижения себестоимости, а также увеличения доли продаж электроэнергии от атомных станций [7]. Анализ результатов внедрения новых технологий показал, что в одном ядерном реакторе имеется возможность одновременно нарабатывать десятки различных радиоизотопов. Нарботка радиоизотопов в энергетических ядерных реакторах позволяет снизить их стоимость и увеличить объемы производств. Предварительные исследования показали, что при организации масштабной наработки радиоизотопов существенно может быть повышена экономическая привлекательность ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Их доля от стоимости продажи электроэнергии на БН-600 и БН-800 может составлять не менее 20%. При организации крупномасштабной наработки радиоизотопов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах БН-600 (800) целесообразно создание в «шаговой» доступности современного радиохимического производства по международным стандартам с возможной ежегодной реализацией продукции более 2 млрд руб., начиная с 2022 г.[7].

При достижении положительных результатов развития новых технологий в атомной энергетике снизится порог входа в отрасль, снизятся затраты на строительство, а также уйдет необходимость в территориях для хранения отработанного топлива.

Большая мощность способствует большому охвату территории, а также отвечает политике энергосбережения, тенденция которой соблюдается в настоящее время.

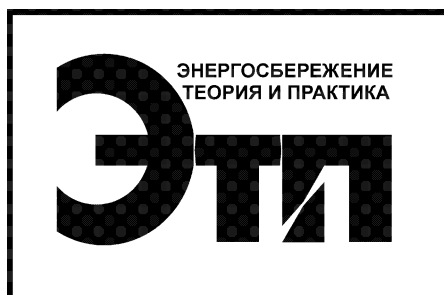
Изучение затрат на реакторы замкнутого цикла, а также получения расчетным методом стоимости электроэнергии с использованием данных технологий является абсолютно новым направлением в экономике энергетике.

Таким образом, при успешном проведении всех испытаний, постройка реакторов на замкнутом цикле в дальних регионах Российской Федерации позволит обеспечить людей доступной электрической энергией и позволит урегулировать уровень цен на электроэнергию по всей стране.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Развитие атомной энергетики в мире, Жучковой Т. А.,2018.
2. Выставка Е.В. Развитие атомной промышленности в XXI веке, 2021.
3. Официальный сайт Госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс] URL: <https://www.rosatom.ru/>
4. Гулевич А.В., Декусар В.М., Камаев А.А., Клинов Д.А., Мосеев А.Л. (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», Обнинск), Васильев Б.А., Васяев А.В., Шепелев С.Ф. (АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород) Роль быстрых натриевых реакторов в замыкании ядерного топливного цикла атомной энергетики, 2018.
5. А.А. Андрианов, И.С. Купцов, Т.А. Осипова, О.Н. Андрианова, Т.В. Утянская. Оптимизационные модели двухкомпонентной ядерной энергетики с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле,2018.
6. Жеребцов А.А., Мочалов Ю.С., Шадрин А.Ю., Зайков Ю.П., Горбачев М.К., Соколов К.А, Кислый В.А., Гончаров Д.А., Разработка обливкового проекта ЗЯТЦ промышленного энергокомплекса, 2018
7. Рисованный В.Д., Нарботка радиоизотопов в ядерных реакторах на быстрых нейтронах





ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

# ТРУДЫ

*одиннадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 8

*Снижение углеродного следа и охрана  
окружающей среды*

А.В. Клименко<sup>1</sup>, А.Г. Терёшин<sup>2</sup>, О.Е. Прун<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС», Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИИ В СНИЖЕНИИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

### АННОТАЦИЯ

В работе проведен анализ возможностей России по выполнению национальных обязательств по сокращению выбросов парниковых газов. Отмечается большой разброс оценок антропогенных выбросов метана и объемов эмиссии CO<sub>2</sub> при лесных пожарах, а также практически полное отсутствие проектов по утилизации метановых выбросов. Показано, что для России приоритетными направлениями снижения выбросов парниковых газов могут быть модернизация газотранспортной системы, использование технологий улавливания и утилизации шахтного метана и свалочного газа, а также совершенствование лесопользования и борьба с природными пожарами. Кроме существенного климатического эффекта, они способствуют расширению топливной базы отечественной энергетики и повышению качества окружающей среды.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Энергетика России в настоящее время основана на использовании ископаемого топлива, доля возобновляемых источников энергии (за исключением крупных ГЭС) в топливно-энергетическом балансе страны до сих пор не превышает 0,2% (без учета некоммерческого использования древесного топлива) (рис. 1). Несмотря на значительную выработку ГЭС и АЭС, доля безуглеродных источников энергии составляет менее 15%, (в среднем по миру – 18%) и, как было показано в [1], лишь преобладание

природного газа пока позволяет удерживать карбономоемкость национального энергопотребления на среднемировом уровне.

Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. [3], равно как и Стратегия низкоуглеродного развития России [4], не предполагают существенного роста доли НВИЭ в производстве энергии. Вместе с тем, согласно добровольным обязательствам, принятым нашей страной на Парижской конференции стран-участниц Рамочной конвенции ООН по изменению климата (2015 г.), выбросы парниковых газов в России к 2030 г. должны составлять 70–75% от уровня 1990 года, при условии максимально возможного учета поглощающей способности лесов. Национальная стратегия низкоуглеродного развития, принятая в 2021 г. [4], ставит еще более амбициозные цели – достижение углеродной нейтральности к 2060 г.

Каким же образом могут быть достигнуты эти ориентиры? Как было показано в [5], вслед за снижением выбросов углекислого газа при сжигании ископаемого топлива наиболее эффективным инструментом должны стать мероприятия по сокращению выбросов метана и увеличению площади лесов.

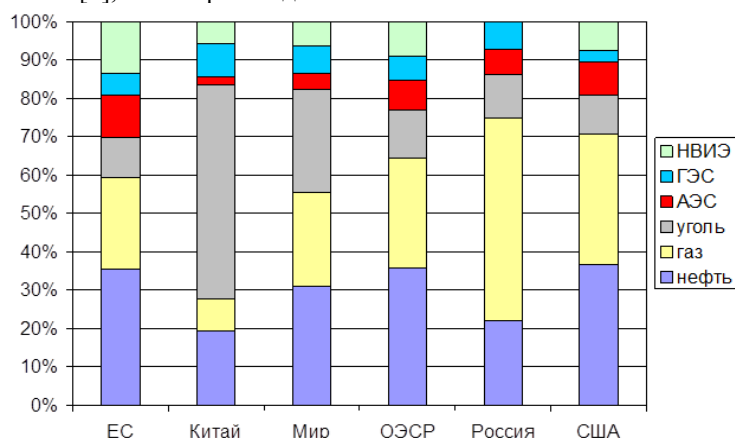


Рис. 1. Топливо-энергетические балансы мира, ЕС, стран ОЭСР, США, Китая и России [2]

### 2. СОКРАЩЕНИЕ ВЫБРОСОВ МЕТАНА

К сожалению, в отличие от эмиссии углерода при сжигании топлива расчеты выбросов метана представляют значительно более сложную задачу и

не отличаются необходимой точностью. Как видно из рис. 2, показывающего динамику выбросов CH<sub>4</sub> на территории страны за последние 50 лет, эти оценки могут различаться в несколько раз. Инвентаризация метановых выбросов, проводимая в 1994-



2021 гг. Росгидрометом, претерпела два существенных изменения: смена методики расчетов в 2011 г привела к увеличению оценок примерно в 1,5 раза, а модификация 2017 г. – к их снижению почти в два

раза, причем основные изменения коснулись энергетических источников – шахтного метана и утечек из газопроводов (рис. 2б).

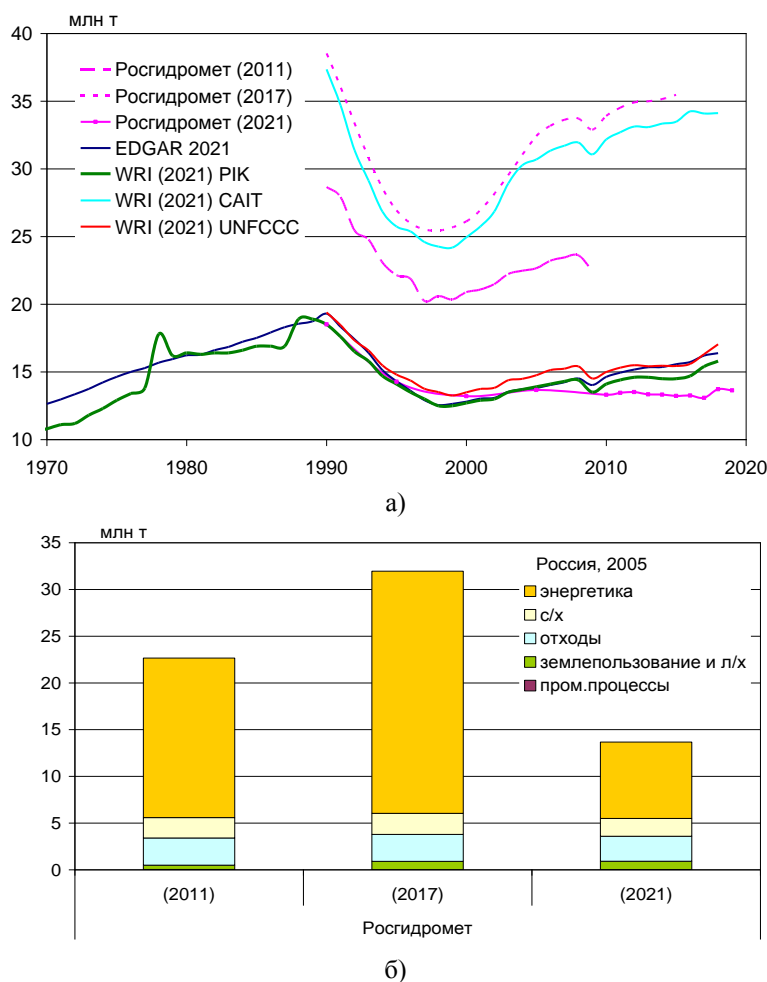


Рис. 2. Суммарные выбросы метана на территории России в 1990-2019 гг. (а) и их структура в 2005 г. по оценкам [6-8] (б)

Выбросы метана в настоящее время можно оценить в 15-35 млн. т ежегодно, т.е. примерно 20-50 млрд. м<sup>3</sup>, или около 10% от ежегодного потребления природного газа экономикой России. В мире разработаны и успешно применяются различные технологии улавливания и утилизации шахтного [11-12] и свалочного метана [13], а также производства биогаза из сельскохозяйственных отходов [14]. К сожалению, в России реализованы единичные проекты в этой области. Модернизация газотранспортной системы, использование технологий улавливания и утилизации шахтного метана и свалочного газа способны не только дать заметную экономию топлива, но и обеспечить существенный «климатический» эффект – потенциал глобального потепления метана в 25 раз выше, чем у диоксида углерода.

в силу известного факта, что ее леса составляют по площади 20%, а по запасу углерода более 10% от общего резервуара планеты. Одновременно малая плотность населения и слабое экономическое развитие лесных территорий делают затруднительным не только их охрану и восстановление, но даже учет. Если по вырубке лесов в ходе лесозаготовки, а также по лесовосстановлению ведется прямой учет, то основная опасность – лесные пожары, – оценивается по данным наблюдений – наземного и дистанционного зондирования. Рис. 3 демонстрирует разброс оценок гибели лесов в России от пожаров и соответствующих выбросов диоксида углерода.

### 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ И БОРЬБА С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ

Лесное хозяйство России занимает особое место в экономике и повседневной жизни страны хотя бы

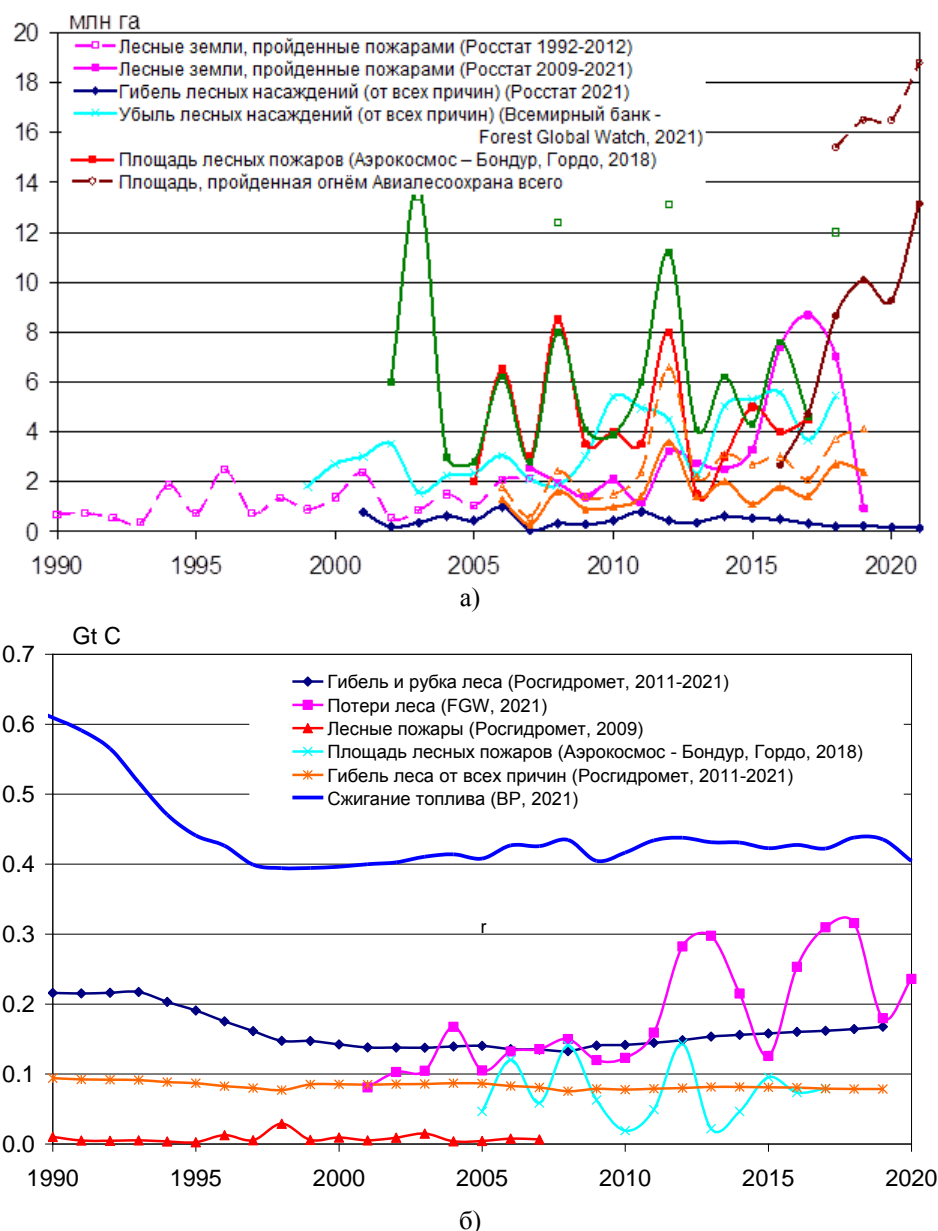


Рис. 3. Площади, пройденные огнем, гибель лесов от пожаров в России (а) и соответствующие выбросы диоксида углерода (б) по оценкам [6-20]

Споры относительно корректности различных оценок не только не утихают, но и разгораются со временем, в том числе и на международных площадках, поскольку эти оценки формируют научный базис для осуществления Россией ее национальных стратегий в области низкоуглеродного развития и охране климата, а также выполнения международных обязательств. В целом, можно констатировать, что в последние 20 лет наблюдается тенденция к росту потерь леса и эмиссии диоксида углерода в результате лесных пожаров, причем величина этих выбросов после 2010 г. находится в диапазоне 200–300 млн. т С (рис. 3). Таким образом, в России пожарная эмиссия составляет 50–75% от промышленной и в 3–5 раз превышает среднемировой показатель. Это предопределяет не только особую роль охраны лесов в осуществлении Россией релевантной климату стратегии, но и саму возможность ее исполнения.

Совершенствование лесопользования, в том числе развитие энергетического использования древесины [21] и борьба с природными пожарами могут обеспечить существенный вклад в достижение целей снижения выбросов парниковых газов.

На рис. 4 приведено сравнение возможных объемов сокращения выбросов парниковых газов за счет следующих групп мероприятий:

- 1) «НВИЭ 10%» – увеличение доли НВИЭ в энергобалансе страны до 10% (это потребует ввод более 50 ГВт солнечных и ветровых электростанций);
- 2) «Метан 25%/10%» – снижение утечек в газотранспортной системе на 25% и утилизация 10% шахтного и свалочного метана, а также отходов сельского хозяйства;
- 3) «Пожары 50%» – сокращение ежегодных лесных пожаров на 50% (целевой ориентир Указа Президента Российской Федерации от 15 июня 2022 г. №

382 "О мерах по сокращению площади лесных пожаров в Российской Федерации")

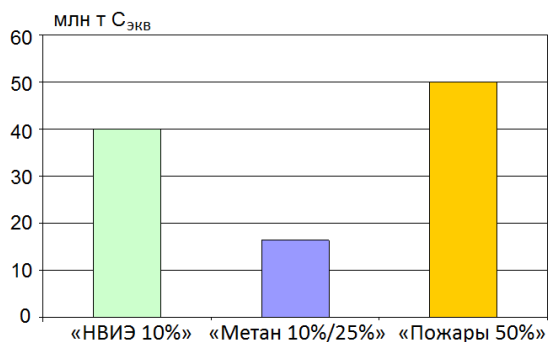


Рис. 4. Снижение выбросов парниковых газов за счет различных групп мероприятий

Как видно из приведенных результатов расчетов, совместная реализация «метановых» и «лесных» мероприятий дает эффект, почти в полтора раза превышающий эффект строительства гигантского парка НВИЭ-генерации.

#### 4. ВЫВОДЫ

Для России приоритетными направлениями снижения выбросов парниковых газов могут быть модернизация газотранспортной системы, использование технологий улавливания и утилизации шахтного метана и свалочного газа, а также совершенствование лесопользования и борьба с природными пожарами. Кроме существенного климатического эффекта они способствуют расширению топливной базы отечественной энергетики и повышению качества окружающей среды.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00680).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. От Рио до Парижа через Киото: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 5-15. DOI: 10.1134/S004036361911002X
2. BP Statistical Review of World Energy 2022. London: BP p.l.c., 2022. 58 p.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. Утв. расп. Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
4. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. расп. Правительства РФ от 29 октября 2021 года № 3052-р.
5. Клименко В.В., Микушина О. В., Терешин А.Г. Глазго-2021: трудная дорога к цели в 1.50C // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 505. С. 50–56. DOI: 10.31857/S2686740022040046
6. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским

- протоколом, за 1990–2009 гг. (ч.1) / Научн. рук. Ю.А.Израэль. М.: Росгидромет, 2011.
7. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2015 гг. (ч.1) М.: Росгидромет, 2017.
  8. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990-2019 гг. (ч.1) М.: Росгидромет, 2021.
  9. Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release EDGAR v6.0\_GHG (1970 - 2018) of May 2021. European Commission, Joint Research Centre (EC-JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). <https://edgar.jrc.ec.europa.eu>
  10. CAIT Climate Data Explorer. Washington, DC: World Resources Institute, 2022.
  11. Харионовский А.А., Данилова М.Ю. Использование угольного метана - важный фактор производственной и экологической безопасности угольных шахт (обзор) // Экология промышленного производства. 2018. № 1 (101). С. 60-70.
  12. Поздеев Е.Э., Комиссаров И.А. Международный опыт утилизации и перспективы использования дегазационного метана в условиях АО "СУЭК-Кузбасс" // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2021. № 3 (123). С. 61-65.
  13. Вострецов С.П. Оптимизация использования биогаза полигонов ТКО // Твердые бытовые отходы. 2017. № 9 (135). С. 42-45.
  14. Апажев А.К., Шекихачев Ю.А. Инновационные технологии и техника утилизации отходов животноводства // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова. 2021. № 3 (33). С. 79-83
  15. Бондур В.Г., Гордо К.А. Космический мониторинг площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий вредных примесей при лесных и других природных пожарах на территории Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 41–55.
  16. Бондур В.Г., Воронова О.С., Черепанова Е.В., Цидилина М.Н., Зима А.Л. Пространственно-временной анализ многолетних природных пожаров и эмиссий вредных газов и аэрозолей в России по космическим данным // Исследование Земли из космоса. 2020. № 4. С. 3–17.
  17. Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Черепанова Е.В. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 13–32.
  18. Лупян Е.А. Барталев С.А., Балашов И.Б., Егоров Б.А., Ершов Д.Б., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.Б., Сычуглов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158-175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
  19. Барталев С.А. Крупномасштабные изменения лесов России в XXI веке по данным спутниковых наблюдений // Лекции школы-конференции молодых ученых по проблемам дистанционного зондирования растительного покрова высокоширотных регионов в кон-

- тексте изменения климата и других воздействий. 16-17 ноября 2020 г. М.: ИКИ РАН, 2020. [http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8465\\_Bartalev\\_YS\\_S\\_2020\\_Eng.pdf](http://conf.rse.geosmis.ru/files/pdf/18/8465_Bartalev_YS_S_2020_Eng.pdf)
20. Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства. ФГУП «Авиалесоохрана». Сводный отчет о лесных пожарах по данным космического мониторинга. [https://public.aviales.ru/main\\_pages/public.shtml](https://public.aviales.ru/main_pages/public.shtml)
21. **Клименко В. В., Терешин А.Г., Микушина О.В.** Влияние изменений атмосферы и климата на энергетический потенциал лесов России // Доклады РАН. 2019. Т. 488, № 6. С. 612–618. DOI: 10.31857/s0869-56524886612-618

*Д.Д. Волкова, А.М. Боровкова*

Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В ЭНЕРГЕТИКЕ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены понятия и цели при определении риска. Проанализированы виды аварий и их последствия в энергетике. Была изучена статистика по количеству аварий на предприятиях за 10 лет. В качестве одной из актуальнейших задач современного этапа развития природопользования и технологического нормирования в сфере электроэнергетики, были идентифицированы экологические риски присуще энергетической отрасли. Выделена важность разработки новой комплексной методики, учитывающей аварийный режим работы предприятия и дополнительные факторы оценки.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Предприятия энергетической отрасли оказывают значительное негативное воздействие на все компоненты окружающей среды – атмосферу, гидросферу и литосферу. Кроме этого энергетическая отрасль — крупнейший источник антропогенных выбросов парниковых газов. По данным Института мировых ресурсов (WRI) за 2021 год, на долю энергетического сектора (включает транспорт, производство тепла и электроэнергии, жилые и коммерческие здания, промышленное производство, строительство и другое) приходится 76% мировых выбросов (37,2 Гт CO<sub>2</sub>-эквивалента).

Одним из возможных путей снижения антропогенного воздействия является ужесточение природоохранного законодательства. Так, например, вводятся нормы на выброс парниковых газов посредством Федерального закона № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов», устанавливаются платежи за использование природных ресурсов Постановлением Правительства № 255 «Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду», ужесточается ответственность за нарушение экологического законодательства. Но количество выбросов и сбросов в штатном режиме работы предприятий, а также число техногенных аварий и их негативных последствий постоянно растет. Аварии в энергетике связаны как с воздействием природных (ураганы, штормы, землетрясения) так и техногенных факторов (прорыв газопроводов, поломки электросетей).

Ярким примером одной из крупнейших техногенных аварий является произошедший в 2020 году разлив нефтепродуктов объемом более 20 000 тонн на ТЭЦ-3 в ОАО «Норильско-Таймырская энерге-

тическая компания» Причиной аварии стала разгерметизация резервуара с дизельным топливом с последующим попаданием нефтепродуктов в акватории водных объектов (реки Далдыкан и Амбарная). Это одна из крупнейших утечек нефтепродуктов в Арктической зоне, создавшая угрозу для экосистемы Северного Ледовитого океана. Экономический ущерб от аварии составил 146 107 млн. рублей.

Таким образом, для того, чтобы оценить степень негативного воздействия предприятия на окружающую среду и выработать мероприятия по снижению данного воздействия необходимо оценить экологический риск как в штатном, так и в аварийном режиме работы. В штатном режиме риск определяется в соответствии с Постановлением Правительства №1096 «О Федеральном государственном экологическом контроле (надзоре)» в зависимости от оказываемого негативного воздействия на окружающую среду. При возникновении аварийной ситуации возникают сложности при определении риска, т.к. последствия нанесения вреда имеют непредсказуемый характер.

Поэтому актуальным является определение экологического риска негативного воздействия на окружающую среду в аварийном режиме работы предприятия, которые позволят оценить весь спектр последствий.

### 2. ПОНЯТИЯ И ЦЕЛИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

В последние годы в России приоритеты в природоохранной политике, основанные на определении ПДК, ПДС, ПДВ и других норм и нормативных воздействий на природу, пересматриваются. Одна из причин – это низкая эффективность нормативного подхода из-за возможности субъективного подхода к «норме». В связи с этим, в основу государственной экологической политики в условиях прогрессирующего загрязнения постепенно закладывается концепция экологического риска.

Экологический риск представляет собой оценку вероятности появления негативных изменений в окружающей среде, вызванных антропогенным или иным воздействием[1].

Оценка экологического риска предприятия позволит [2]:

- по уровню экологического риска оценивать приемлемость и чрезмерную опасность видов деятельности, связанных с возможными аварийными ситуациями, имеющих неблагоприятные последствия для окружающей среды;
- обоснованно осуществлять процедуры экологического аудирования, экспертизы, сертификации и пр., адекватно оценивать экологическую опасность и ответственность за возможный ущерб окружающей среде;
- осуществлять управление экологическим риском, добиваясь снижения цены экологического риска при заданных ограничениях на затраченные ресурсы;
- осуществлять ранжирование неблагоприятных экологических воздействий по реальной и прогнозируемой опасности, ранжирование территорий по величине экологического риска;
- использовать категорию экологического риска в качестве основы для принятия решений по вопросам обеспечения экологической безопасности, в том числе на основе принятия правовых актов, распорядительных и нормативно-методических документов;
- формировать политику в области размещения новых и модификации существующих предприятий, имеющих экологически опасные виды деятельности, в соответствии с международными обязательствами и прозрачными и процедурами.

Степень риска аварии сложной технической системы, для которой, как правило, присуще наличие множества опасностей, определяется на основе анализа совокупности показателей рисков, выявленных при анализе нежелательных событий.

Основной элемент анализа риска - идентификация опасности (обнаружение возможных нарушений), которые могут привести к негативным последствиям. Для того чтобы оценивать и прогнозировать экологические риски предприятия, необходимо знать комплекс воздействующих на систему факторов или причин, вызывающих негативные последствия.

### 3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Энергетика включает в себя совокупность отраслей, снабжающих экономику энергоресурсами. В нее входят добыча природных ресурсов, переработка, транспортировка и передача. На сегодняшний день электроэнергетическая отрасль имеет наиболее высокие темпы развития и масштабы производства, оказывая все возрастающие как локальные экологические последствия, сопровождающимися загрязнением воздуха, воды и почвы, так и глобальные, связанные с изменением мирового климата в результате действия парникового эффекта [3]. Современный электроэнергетический комплекс России включает

около 700 электростанций единичной мощностью свыше 5 МВт. Общая установленная мощность электростанций России составляет около 230 ГВт и линии электропередачи всех классов напряжений протяженностью более 2,5 млн. км. Установленная мощность парка действующих электростанций по типам генерации имеет следующую структуру: тепловые электростанции — 68,4%, гидравлические — 20,9%, атомные — около 10,7% [4].

В функционировании электроэнергетических предприятий заложены следующие виды экологических аспектов [5]:

- выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, осуществляемые в ходе эксплуатации источников выделения;
- отходы производства;
- загрязнение сточных поверхностных вод;
- способствование климатическим изменениям;
- влияние на появление кислотных дождей;
- изменение экосистем и облика целых регионов добычи нефти, газа, угля, урана.

Степень указанных аспектов на окружающую среду во многом определяется числом произошедших аварий.

Динамика количества аварий на объектах энергетики в Российской Федерации за 2010-2021 года поднадзорных Ростехнадзору представлена на рисунке 1.

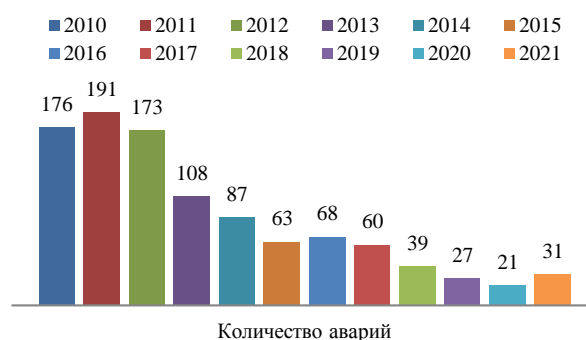


Рис.1. Динамика аварийности на поднадзорных Ростехнадзору объектах [6].

С 1 января по 31 декабря 2021 года по направлению государственного энергетического надзора произошла 31 авария. Из них в объекте электроэнергетики - 27, в сфере теплоснабжения - 2, На гидротехнических сооружениях – 2 аварии (рисунок 2).

За аналогичный период 2020 года произошла 21 авария. Из них 18 аварий на объекте электроэнергетики, 2 аварии в сфере теплоснабжения, 1 авария на гидротехническом сооружении (рисунок 3). Таким образом, отмечается значительный рост общего количества аварий на 47 % (10 аварий) по сравнению с аналогичным периодом 2020 года.



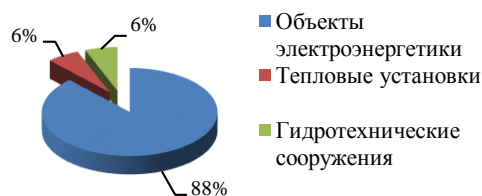


Рис. 2. Распределение аварий по видам объектов, поднадзорных Ростехнадзору в 2021 году.



Рис. 3. Распределение аварий по видам объектов, поднадзорных Ростехнадзору в 2020 году.

Анализ представленных статистических данных показал, что в период 2010-2020 г. наблюдалось

Таблица 1. Возникающие аварии и их последствия в энергетике

Аварийные ситуации	Причины аварий	Поступающие загрязнения	Последствия
<b>Тепловые электростанции</b>			
Возникновение пожара, разлив трансформаторного масла, выход из строя турбогенератора, обрушение ствола дымовой трубы, короткое замыкание в газотурбинной установке	Нарушение правил эксплуатации электрооборудования, старение парка оборудования, неудовлетворительное техническое состояние оборудования энергоблоков находящихся в резерве, что не позволяет при возникновении аварий оперативно вводить его в работу, ошибочные действия оперативного персонала при производстве оперативных переключений	Углекислый газ, водяные пары, азот, окислы серы (сернистый газ, серный ангидрид) зола, оксид углерода, углеводороды, бенз(а)пирен	Вредное воздействие на биосферу, которая включает в себя прилегающий к поверхности земли слой атмосферы, верхний слой почвы и верхние слои водных поверхностей
<b>Нефтяной комплекс</b>			
Разливы нефти и нефтепродуктов разного состава, пластовых вод и буровых растворов, буферных жидкостей, химических реагентов	Использованием устаревших технологий и техники, несоблюдением технологических режимов, недостаточной экологической культурой производств, низкая герметичность оборудования, плохой цементаж, прорывы и переполнение амбаров	Нефть, сточные воды различной степени минерализации, ПАВ, ингибиторы коррозии, газовый конденсат, сероводород, различные соли	Основное влияние нефти и нефтепродуктов на почвенно-растительный покров сводится к снижению биологической продуктивности почвы и фитомассы
<b>Атомные станции</b>			
Тепловые и ядерные взрывы	Повреждение тепловыделяющих элементов в результате быстрого возрастания мощности реактора, потеря теплоносителя в результате разрыва трубопровода, механические повреждения систем водоснабжения, разрыв трубопровода контура рабочего тела, изношенное оборудование	Выброс радиоактивных веществ во внешнюю среду	Гибель биоразнообразия
<b>Гидротехнические сооружения</b>			
Прорыв сооружения с возникновением сильных волн, прорыв плотины или дамбы, авария, приводящая к отложению речных наносов на большой местности	Действия сил природы (землетрясения, ураган, разлив, разрушение плотины паводковыми водами), нарушение техники безопасности, неправильная эксплуатация	Турбинное масло	Затопление обширных территорий, разрушение плодородного слоя почвы, загрязнения воды

Анализ причин возможных аварий и поступающих загрязнений показал, что каждый энергетический объект является уникальным, со своим спе-

цифическим причинно-следственным комплексом. В большинстве случаев не удается выделить доминирующую причину аварий. В то же время отмече-

существенное снижение числа аварий на энергетических объектах, однако наносимый материальный ущерб при этом ежегодно растет, также произошел значительный рост аварийности в 2021 году. Что касается воздействия на окружающую среду отдельных компонентов энергетического комплекса, то вклад каждой из них имеет свои особенности, определяющие специфику и характер экологического воздействия. Большинство крупных аварий происходит на этапе производства энергии (АЭС, ГЭС, ТЭС). Так же стоит выделить нефтяной комплекс, т.к. именно здесь происходят крупные аварии по разливу нефти, ярким представителем которого является ранее упомянутая авария на «Норникель». Структура причин возникновения аварийных ситуаций и оценка возможных последствий приведены в таблице 1.

на определенная логика развития событий. Обычно авариям предшествует стадия накопления повреждений конструкций или отклонений в условиях эксплуатации и технологических процессах.

#### 4. ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Оценка экологического риска – процедура анализа экологического риска, включающая в себя оценки вероятности возникновения неблагоприятного воздействия, вероятности поражения объектов окружающей среды, величины и цены экологического риска.

Для оценки экологического риска используют несколько подходов:

- 1) Количественный - установление пределов допустимых изменений их свойств. В качестве меры загрязнения используются нормативы ПДК загрязняющих веществ в воздухе, воде, почве.
- 2) Статистический - обработка статистических данных традиционными методами математической статистики.

Таблица 2. Анализ методик по оценке риска

Методика оценки	Описание	Плюсы	Минусы
Методика оценки по интенсивности, временному и количественному масштабу.	Количественно-количественная методика, основанная на методе экспертных оценок	- простота - имеет показатель, который оценивает общее состояние окружающей среды	- высокая субъективность метода - для получения достоверных результатов необходимо привлечение высококвалифицированных экспертов
Методика по расчету Уточненного суммарного показателя	Методика где определяется состояние трех природных сфер: гидросферы, литосферы и атмосферы. Для качественной оценки рассматриваемой территории в методике используется ранжирование	- простота - имеет общий показатель, оценивающий все среды - возможность районирования	- необходимость в получении достоверных значений концентраций
Комплексная методика на основании индексов качества окружающей среды	Оценка по трем методикам, оценивающим качество окружающей среды: индекс загрязнения атмосферы (ИЗА); индексу загрязнения почвы (ИЗП); индексу загрязнения воды (ИЗВ) и соотнесение результатов со шкалой ущерба	- имеет комплексный показатель - основана на численном методе расчета, а также включает в себя экспертный метод расчета, что снижает погрешность оценки риска	- для расчета комплексного показателя данной методики необходимо проводить расчет по трем методикам, что усложняет расчет - необходимость в получении достоверных значений концентраций

Исходя из анализа части методик можно сделать вывод, что традиционными целевыми показателями экологического риска предприятий остаются такие, безусловно, существенные экологические аспекты как, выбросы и сбросы загрязняющих веществ, образование и размещение отходов.

Между тем, в соответствии с признанием глобального и определяющего характера последствий хозяйственной деятельности на устойчивость экосистем возрастает актуальность эколого-экономической оценки деятельности предприятия с позиций эмиссии парниковых газов; вклада в изменение климата и выполнения международных обязательств. Особенно актуально это для энергетиче-

- 3) Прогнозный - использование математических моделей. Результатом работы моделей является поле концентраций загрязняющего вещества.
- 4) Экспертный - в основе лежат субъективные оценки экспертов.

Самый простой в освоении подход – экспертный. Так как в данном методе нет сложных вычислений или моделирования. Примером данного подхода служит «Методика оценки по интенсивности, временному и количественному масштабу» [7].

Более точным подходом является количественная оценка, при этом требует значительно большего количества вычислений, которые зависят от качества исходной информации. Примером данного подхода может служить «Методика по расчету уточненного суммарного показателя» [8].

Так же существует «Комплексная методика на основании индексов качества окружающей среды», которая включает в себя как экспертный, так и количественный подход [9]. Сравнительный анализ методик приведен в таблице 2.

ской отрасли, т.к. по вкладу выбросов парниковых газов она занимает 3 место.

Так же все методики направлены на оценку риска в нормальном режиме работы предприятия, что существенно усложняет расчет оценки в аварийной ситуации.

По этой причине задача оценки экологического риска на уровне предприятия требует своего дальнейшего исследования, особенно в условиях реализации концепции низкоуглеродного развития и экологизации производства, вызывающей изменения его технологической основы. При введении такого показателя, как уровень выбросов парниковых газов, природопользователи будут стремиться

уменьшить выброс вредных газов, тем самым понизив свой уровень риска.

Так же в качестве показателя экологического риска стоит брать и ранние взысканные экологические ущербы, в качестве платы за негативное воздействие в связи с авариями.

Таблица 3. Факторы при оценке экологического риска для предприятий энергетической отрасли

Использование энергии	Валовое потребление энергии от всех типов энергоносителей, выраженное в энергии использованных топливно-энергетических ресурсов
Выброс загрязняющих веществ в атмосферу	Валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу по организации за отчетный период
Сбросы сточных вод	Валовой объем отведенных сточных вод по организации за отчетный период, включая объем сточных вод, переданный на очистку
Объем отходов	Суммарный объем отходов, являющихся «опасными»
Число существенных аварий с экологическим ущербом	Число существенных аварий за отчетный период, по которым судом предъявлен ущерб окружающей среде
Взысканный экологический ущерб	Объем средств, взысканный судом в связи с произошедшими авариями с экологическим ущербом в отчетном периоде
Выбросы парниковых газов	Суммарный объем выбросов парниковых газов по организации за отчетный период: диоксид углерода (CO <sub>2</sub> ), метан (CH <sub>4</sub> ), закись азота (N <sub>2</sub> O), и др.

После идентификации рисков должна последовать их оценка. Она позволит ответить на вопрос, насколько значимы оцениваемые риски от намеченной хозяйственной деятельности для тех, кого они могут затронуть прямо или косвенно.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идентификация и оценка экологических рисков – важный момент при определении экологической политики компании, ее целей, задач и мероприятий в области защиты окружающей среды. Но в настоящее время нет единой методики для процесса идентификации и оценки экологических рисков. Для каждого предприятия применяется свой подход. Концепция управления экологическими рисками в организации должна быть разработана с учетом присущих ей конкретных условий.

В связи с данными проблемами и значимостью определения величины риска возникает необходимость усовершенствования и дополнения существующих методик, а также создания методик, которые позволяют оценивать комплексное влияние при нормальном режиме работы предприятия и аварийном с учетом предложенных факторов приведенных в таблице 3.

Данные факторы должны охватывать не только привычные показатели превышения нормативов воздействия, но и дополнительные экологические индикаторы, которые будут характеризовать деятельность предприятия в области управления выбросами парниковых газов, тем самым стимулируя предприятия снизить их выбросы.

Степень риска может быть оценена с помощью систем показателей, которые отражают отдельные аспекты устойчивого развития. После анализа всех загрязнителей от энергетического комплекса, в качестве экологических идентифицированных факторов могут выступать следующие показатели:

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марунин В.И.** Основы экологического риска. Практикум: учебное пособие/В.И. Марунин, Л.А. Авдоница, под редакцией Н.Н. Вершинина – Пенза: Издательство ПГУ 2012.
2. **Шмаль А.Г.** Факторы экологической опасности и экологические риски. Издательство: МП «ИКЦ БНТВ», 2010 г., г.Бронницы, — с.
3. **Арустамов Э.А.** Экологические основы природопользования. Учебник: М.: 2008. 320 с. 3.
4. **Мелешко В.П.** Потепление климата: причины и последствия // «Химия и жизнь», 2007, С. 35-41.
5. **Денисов В.В.** Промышленная экология. Учебное пособие: Ростов н/Д: Феникс, 2009. 720 с.
6. **Годовой отчет** о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2020 году.
7. **«Методологические аспекты оценки воздействия на природную среду социально-экономическую среду»** Авторы: Казахское агентство прикладной экологии, Компания «Magirosa» - раздел 7, рецензент – Темис Л. - компания «АДЖИПККО», Астана, 2004 – 44 с.
8. **Н. И. Куракина, Н. С. Шлыгина** «Оценка состояния донных отложений по результатам контрольных измерений концентраций загрязняющих веществ в восточной части Финского залива» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2015. – С. 72-78.
9. **Куракина Н.И.**, Ивличев Илья Андреевич «Методы оценки экологических рисков на основе разнородных данных» // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2015. – С. 46-51.

О.Е. Кондратьева<sup>1</sup>, О.А. Локтионов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

## ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К УЧЕТУ СПОСОБНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ЛЕСНЫМИ МАССИВАМИ

### АННОТАЦИЯ

Вопросы, касающиеся последствий климатических изменений, адаптации к ним и реализации подходов по сокращению выбросов парниковых газов имеют широкий охват рассмотрения как мировом, так и на национальном уровне. Одним из основных направлений реализации стратегических целей социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов, является увеличение поглощающей способности зеленых насаждений. В статье рассмотрена общепризнанная методика национальной инвентаризаций парниковых газов МГЭИК и методические подходы, которые реализуются в России, направленные на оценку поглощающей способности парниковых газов лесными массивами. Проведенный сравнительный анализ позволил описать ключевые отличия процедуры расчета бюджета углерода, количественную разницу в оценках абсорбции CO<sub>2</sub>-экв. и разработать рекомендации по дальнейшей модификации методологических подходов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время зафиксированные значения выбросов парниковых газов различными странами (рис.1 [1]) и предполагаемые уровни их снижения, согласно Парижскому соглашению [2], по результатам национальных инвентаризаций не коррелируют с заявлениями по ограничению глобального потепления на 2°C и ниже. В 6-ом оценочном докладе МГЭИК [3] эксперты полностью подтвердили гипотезу о влиянии антропогенной деятельности человека на климат, а также наблюдаемые и прогнозируемые широкомасштабные изменения. Исследователи фиксируют беспрецедентный уровень климатических изменений за всю историю наблюдений, который за последнее десятилетие подтверждается тем, что в период 2011-2020 гг. глобальная температура поверхности Земли примерно на 1,1°C выше доиндустриальных уровней.

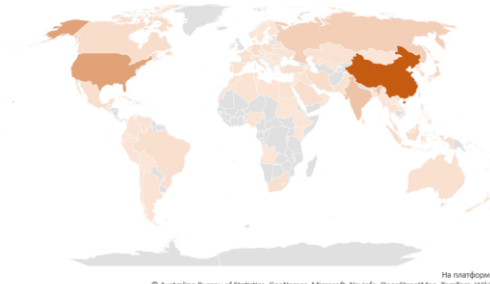


Рис. 1. Выбросы парниковых газов различными странами, Мт CO<sub>2</sub>-экв./год [1]

Стоит отметить, что ранее в предыдущих докладах группа экспертов МГЭИК опиралась на различные сценарии выбросов/сокращения парниковых газов (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5) [4], и на их основе давали научно-обоснованные оценки о предполагаемых климатических изменениях на ближайшую и/или средне-, долгосрочную перспективу. В последнем докладе [3] реализован принципиально другой подход и формат представления результатов исследований. На глобальном и континентальном уровне обозначены климатические риски экстремальных погодных явлений и последствия их реализации на основе СМIP6 по отношению к базовому периоду 1995-2014 при глобальном потеплении на 1,5°C и 3°C. В качестве примера на рис. 2 приведено распределение с тепловой картой для одного из наиболее значимых и опасных метеоявлений, как экстремальная жара, которое демонстрирует степень прироста количества дней с температурами выше 35°C для двух сценариев повышения температуры.

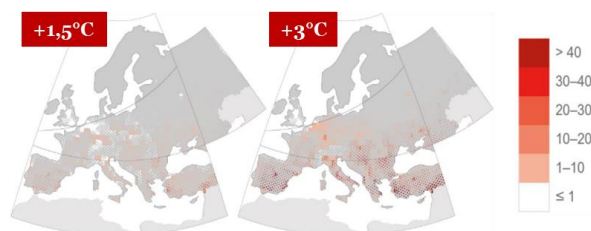


Рис. 2. Изменения количество дней с температурами выше 35°C при глобальном потеплении на 1,5 °C и 3°C на основе СМIP6 по отношению к базовому периоду 1995-2014 [3]

В России вопросами оценки изменения климата и их последствиями занимается научно-координационный комитет Росгидромета и подведомственные ему ГГО им. А.И. Воейкова и Институт глобального климата и экологии. Второй оценочный доклад по изменениям климата [5], подготовленный данными учреждениями в 2014 году, реализован на тех же принципах, что и 5-й доклад МГЭИК [4], но применительно к территории нашей страны с учетом региональной специфики. В качестве примера реализации данного отчета можно привести тематическую карту с отображением прироста абсолютной среднегодовой температуры на территории РФ в период 2011-2031 по модели RCP 4.5 на основе СМIP5.



Рис. 2. Прирост абсолютной среднегодовой температуры на территории РФ в период 2011-2031 по модели RCP 4.5 (по данным ГГО им. А.И. Воейкова) [5]

На основе полученных результатов и с учетом сведений об особенностях климата на территории РФ установлено, что скорость роста среднегодовой температуры в среднем по территории страны составила для периода 1976-2021 гг. 0,49°C за десятилетие, что более чем в 2,5 раза выше скорости роста глобальной средней температуры.

Соответственно, необходимо подчеркнуть, что при отсутствии принятых планов по митигации последствий климатических изменений, и в том числе, оперативных решений по стремительному сокращению выбросов парниковых газов к 2030 году, в ближайшей перспективе приведет к необратимым погодным катаклизмам и экономическому ущербу как на мировом, так и на национальном уровне, вне зависимости от значений прироста глобальной температуры и/или сопутствующих климатических изменений.

В России необходимость создания нормативно-правовой базы и внедрения технологических решений, направленных на снижение углеродного следа основных отраслей экономики, в том числе и энергетической отрасли, обозначена в Указе Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400<sup>1</sup>, в котором одним из стратегических приоритетов РФ названо развитие «зеленой» и низкоуглеродной экономики. Минимизация негативного влияния добычи, производства, транспортировки и потребления энергоресурсов на окружающую среду, климат и здоровье людей указана в качестве основного приоритета государственной энергетической политики и в Распоряжении Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р<sup>2</sup>.

Именно снижение выбросов парниковых газов стало основной целью новой стратегии социально-экономического развития Российской Федерации, утвержденной Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р<sup>3</sup>. Климатическое регулирование является одновременно стимулом для модер-

<sup>1</sup> Указ Президента РФ от 02.07.2021 г. № 400 «О стратегии национальной безопасности РФ»

<sup>2</sup> Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года»

<sup>3</sup> Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года»

низации основных отраслей промышленности и повышения их энергоэффективности, и инструментов для повышения конкурентоспособности российской продукции на мировом рынке. Однако, влечет за собой значительные финансовые риски.

Основными направлениями реализации стратегических целей, определенных российским законодательством, являются:

- 1) разработка и внедрение технологий с низким углеродным следом;
- 2) повышение энергоэффективности и ресурсосбережение;
- 3) увеличение поглощающей способности зеленых насаждений.

## 2. ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ К УЧЕТУ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ЛЕСНЫМ ФОНДОМ

По оценкам экспертов Всемирного банка [6] является одним из основных экологических доноров с точки зрения поглощения парниковых газов, так как на территории нашей страны находится около 20 % всех мировых лесных насаждений. Однако, точное определение потенциала снижения углеродного следа лесными массивами, затрудняется отсутствием методики проведения такой оценки, признанной на международном уровне, и сложностью получения корректных и полных исходных данных.



Рис. 4. Распределение стран с наибольшей площадью лесов, км² [6]

### 2.1. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК

Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК [7] и их дополнения [8] представляют собой методологию оценки национальных антропогенных выбросов и поглощений парниковых газов для таких секторов, как: энергетика, промышленность, землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства (ЗИЗЛХ) и отходы.

Сектор ЗИЗЛХ является единственным разделом Руководства [7, 8] в котором приведен систематизированный подход к оценке изменений запасов углерода не только с точки зрения выбросов, но и поглощений парниковых газов. Основным результатом рассматриваемого Руководства по данному сектору является раздел национального отчета об инвентаризации парниковых газов с указанием значений поглощения CO<sub>2</sub>-экв. Описание и анализ основных подходов (уровней) ведения кадастра



(инвентаризации) представлен в табл.1. Для уровня 1 характерно использование конверсионных коэффициентов, обозначенных в Руководстве МГЭИК по климатическим зонам. Уровень 2 реализует схожий подход Уровня 1, но применение расчет по уравнениям и моделям производится исключительно на основе конкретных национальных конверсионных коэффициентов. Уровень 3 основывается на применении современных методов, в том числе математического моделирования, подробных национальных данных, и является наиболее сложным подходом со множеством неопределенностей, однако и с наиболее точными результатами инвентаризации.

Таблица 1. Подходы к инвентаризации парниковых газов в секторе ЗИЗЛХ из Руководства МГЭИК [7, 8]

	Источники данных	Описание
Уровень 1 (Tier 1)	Сведения глобального охвата с низким пространственным разрешением	Использование уравнений и значений параметров по умолчанию. <i>Имеет ряд допущений по оценке запасов углерода для различных пулов (резервуаров)</i>
Уровень 2 (Tier 2)	Более детализированные сведения для конкретной страны или конкретного района, для наиболее важных категорий землепользования	Использование методологического подхода Уровня 1, но с учетом национальных конверсионных коэффициентов выбросов и изменений запасов
Уровень 3 (Tier 3)	Подробные национальные данные (временные ряды с высокой степенью пространственного разрешения / ГИС системы) с детализацией до масштабов региона	Использование современных методов моделирования с целью получения оценочных значений с высокой степенью достоверности. <i>Модели должны пройти экспертизу, проверку достоверности.</i>

Численные оценки выбросов и поглощения CO<sub>2</sub> для сектора ЗИЗЛХ, полученные по результатам анализа изменений запасов углерода по приведенным выше уровням, оцениваются для следующих категорий землепользования (в т.ч. включая переустроенные), представленных на рис.5.

В рамках каждой категории землепользования оценка изменения запаса углерода производится для следующих резервуаров (пулов) углерода в секторе ЗИЗЛХ согласно Руководству:

- Биомасса: наземная – представляющую, как древесную, так и травянистую живую растительность над поверхностью почвы, включая стволы, пни, ветви, кору, семена и листву и подземную, а также подземная – включающую живые корни.

- Мертвое органическое вещество: сухостойная и валежная древесина – неживую древесную биомассу, не содержащуюся в подстилке, как стоящую или лежащую на земле, так и находящуюся в почве, а также подстилку – неживую биомассу с размером, превышающим предельное значение для органического вещества почвы и менее минимального диаметра, выбранного для валежной древесины, лежащую в мертвом состоянии.
- Почва / органическое вещество почвы, включающее органический углерод в минеральных почвах до определенной глубины.



Рис. 5. Категории землепользования при учете баланса углерода по Руководству МГЭИК [7, 8]

Годовое изменение запаса углерода ΔC для каждой категории землепользования с учетом всех резервуаров в рамках уровня к инвентаризации осуществляется с помощью двух методов.

- 1) Метод поступлений-потерь биомассы

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$$

где ΔC<sub>G</sub> - годовые поступления углерода, т C/год; ΔC<sub>L</sub> - годовые потери углерода, т C/год.

- 2) Метод разности запасов

$$\Delta C = \frac{C_{t_2} - C_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

где C<sub>t<sub>2</sub></sub> - запас углерода в резервуаре в момент времени t<sub>2</sub>, т C/год; C<sub>t<sub>1</sub></sub> - запас углерода в резервуаре в момент времени t<sub>1</sub>, т C/год.

В общем случае метод разности запасов дает более достоверные оценки для относительно больших увеличений и уменьшений биомассы, или, когда составляются очень точные кадастры [9].

## 2.2. Отечественные методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов

В России национальные доклады о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом,



выпускаются ежегодно<sup>4</sup> Росгидрометом и Институтом глобального климата и экологии .

В соответствии со ст.12 и ст.110 Лесного кодекса РФ<sup>5</sup> освоению в целях обеспечения многоцелевого, рационального, непрерывного, неистощительного использования, а также развития лесного комплекса подлежат следующие леса:

- защитные – природные объекты, имеющие особо ценное значение (леса в ООПТ, водохранных зонах, ценных лесах, городских лесах и т. п.);
- эксплуатационные – леса для получения высококачественной древесины и других лесных ресурсов, продукции их переработки с обеспечением сохранения полезных функций лесов;
- резервные – леса, в которых в течение 20 лет не планируется осуществлять заготовку древесины, за исключением заготовки древесины гражданами для собственных нужд.

Распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 №20-р<sup>6</sup> утверждены методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, которые устанавливают порядок расчета объема поглощений парниковых газов для ряда земель, которые приведены на рис.6. Данные методические указания являются нормативным документом, который включил в свой состав математический аппарат методики Региональной оценки бюджета углерода лесов (РОБУЛ) [9], разработанной Институтом глобального климата и экологии, и верифицированной экспертами МГЭИК.

Источником исходных данных к количественному определению объема поглощения парниковых газов по МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9]) является государственный лесной реестр (ст. 91 ЛК РФ), содержащий следующую информацию:

- состав земель лесного фонда и иных категорий, на которых расположены леса;
- площади и запасы древесины с дифференциацией насаждений по преобладающим породам и группам возраста (молодняки, средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные).

<sup>4</sup> Распоряжение Правительства РФ от 01.03.2006 №278-р «О мерах по созданию российской системы оценки антропогенных выбросов в целях реализации Киотского протокола к Рамочной конвенции ООН об изменении климата (с изменениями и дополнениями)»

<sup>5</sup> Федеральный закон от 04.12.2006 №200-ФЗ «Лесной кодекс Российской Федерации»

<sup>6</sup> Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 №20-р «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов»



Рис. 6. Категории землепользования при учете баланса углерода по Методическим указаниям Минприроды России<sup>6</sup> / методике РОБУЛ [9]

По аналогии с Руководством МГЭИК [7, 8] в России в рамках области применения МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9]) рассчитывает баланс углерода для резервуаров (пулов), приведенных на рис.7.



Рис. 7. Основные пулы (резервуары) углерода по МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9])

Итоговым результатом объема поглощений парниковых газов (бюджета углерода) лесными землями, сельскохозяйственными угодьями, водно-болотными угодьями, землями населенных пунктов и пулов, представленных на рис.7, является суммирование бюджета углерода по группам возраста с получением общего значения по преобладающим породам с получением результирующего значения для территориального объекта.

### 3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ПО ОЦЕНКЕ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕСОВ

По результатам обзора методик оценки бюджета углерода землями лесного фонда определено, что официальные МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9]) не позволяют в полной мере рассчитать абсорбцию углерода. Это связано с тем, что используемый метод разности запасов не может быть использован для расчетов по обобщенным и устаревшим статистическим данным государственный лесной реестр, так как свойственная ошибка оценки запаса ( $\pm 10-15\%$ ) значительно превышает величину годичного прироста (1–2 %) [10]. В табл.2 приведен сравнительный анализ отечественных методик по оценке поглощающей способности лесов и их результатов, а именно МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9]) и методики ВНИИЛМ [11], которая реализует более детализированный расчет по среднегодовому приросту за-

паса углерода и без двойного учета эмиссий углерода в результате заготовки древесины и/или пожаров

Но, следует подчеркнуть, что после внесения изменений в МУ МПР<sup>6</sup> (РОБУЛ [9]) Распоряжением Минприроды России от 20.01.2021 №3-р7 оценка поглощения парниковых газов проводится для всех видов управляемых лесов, включая резервные леса (*до 2021 года данный тип лесов при инвентаризации не учитывался*), что в будущем должно повлиять на количественную оценку абсорбции CO<sub>2</sub>-экв. лесами по МУ МПР<sup>6</sup>.

Таблица 2. Анализ отечественных методик по оценке поглощающей способности лесов

	Методика МПР <sup>6</sup> / РОБУЛ [9]	Методика ВНИИЛМ [11]
Метод расчета	Метод поступлений-потерь	Метод разности запасов
Основные результаты	<ul style="list-style-type: none"> <li>запас С в надземной и подземной биомассе, сухойстойной и валежной древесине, подстилке и почве</li> <li>годовая абсорбция С</li> <li>потери С за год</li> <li>годовой бюджет углерода</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>запас С в живой биомассе, мертвой древесине, лесной подстилке и почве</li> <li>изменение запасов и потерь С за год</li> <li>региональная оценка баланса углерода</li> </ul>
Оценка абсорбции CO <sub>2</sub> -экв. лесами России	569 млн т CO <sub>2</sub> -экв. год <sup>-1</sup> (2020)	≈ 2300±300 млн т CO <sub>2</sub> -экв. год <sup>-1</sup> (2020)

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках сравнительного анализа подходов и методик по оценке бюджета углерода сформированы рекомендации, касающиеся расчета поглощающей способности лесов, необходимо:

1) Актуализировать результаты государственной инвентаризации лесов для получения исходных данных с высокой степенью пространственного разрешения для верификации результатов годового изменения запасов углерода для каждого пула в рамках категорий землепользования.

2) Гармонизировать российский методический подход к учету поглощающей способности в секторе землепользования и лесного хозяйства с методическими подходами, признаваемыми за рубежом, для обеспечения представительства России на международном рынке «зеленых» сертификатов.

3) Создать условия для сохранения лесных площадей и стимулирования проектов по лесовосстановлению и лесоразведению, направленных на повышение потенциала поглощения парниковых газов землями лесного хозяйства.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках стратегического проекта ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» Климатическая трансформация энергетической отрасли при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Climate Watch.** 2020. GHG Emissions. Washington, DC: World Resources Institute.
2. **Paris Agreement.** United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII-7-d.
3. **IPCC: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability.** Cambridge University Press.
4. **IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report.** IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
5. **Второй оценочный доклад Росгидромета** об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет, ФГБУ «ИГКЭ» [Электронный ресурс] URL: [http://downloads.igce.ru/publications/OD\\_2\\_2014/v2014/htm/1.htm](http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/1.htm).
6. **Forest area.** 2020. Washington, DC: World Resources Institute.
7. **IPCC, 2006.** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published: IGES, Japan.
8. **IPCC, 2019.** Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published: IPCC, Switzerland.
9. **РОБУЛ.** Методика региональной оценки бюджета углерода лесов. [Электронный ресурс] URL: <http://old.cepl.rssi.ru/carbondoc/region/region.doc>
10. **Филипчук А.Н.,** и др. Аналитический обзор методик учёта выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы // Лесохозяйственная информация, №3, 2016. С.36-85.
11. **Малышева Н. В.,** и др. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13.

<sup>7</sup> Распоряжение Минприроды России от 20.01.2021 №3-р «О внесении изменений в методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов, утв. распоряжением Минприроды России от 30.06.2017 №20-р»

*И.В. Королев<sup>1</sup>, Д.А. Бурдюков<sup>1</sup>, Е.Г. Антоненко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены вопросы устойчивого развития с учетом решения экологических проблем. Одной из важнейших проблем является изменение климата вследствие увеличения количества выбрасываемых парниковых газов (ПГ). Рост промышленных выбросов углеродов привел к ускорению изменения климата. Пути решения в настоящее время – декарбонизация экономик, то есть снижение выбросов ПГ. В качестве решения снижения выбросов ПГ ведущих стран – разработка планов достижения углеродной нейтральности к середине XXI века. Пути развития направлены на развитие альтернативной энергетики и разработку новых технологий декарбонизации. Рассмотрены требования к климатической политике, изложенные на различных международных конференциях, а также перспективы формирования законодательства в сфере реализации данных положений в России.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В основе термина «устойчивое развитие» лежит принцип улучшения качества жизни человека без разрушения природной среды. Важнейшее условие устойчивого развития – непрерывное возобновление природных ресурсов, однако в настоящее время современное потребление жизнеобеспечивающих ресурсов превышает допустимые пределы, что может привести к истощению ресурсов и глобальной экологической катастрофе. Необходимо переходить на принципиально новую систему природопользования, основанную на рациональном потреблении и воспроизводстве ресурсов, внедрять технологии получения энергии из нетрадиционных источников.

Развитие мировой экономики и достижение успехов в области здравоохранения, увеличения темпов роста продовольствия привело к увеличению разрыва между бедными и богатыми, увеличению площади непродуктивных земель, уничтожению кислотными осадками лесов, к общему потеплению климата, разрушению озонового слоя Земли. Во многих регионах изменение количества осадков и таяние льдов привело к изменению гидрологических систем и оказало воздействие на качество и количество водных ресурсов. При анализе этих проблем появилось понимание того, что нельзя отделять вопросы экономического развития от вопросов окружающей среды. Многие формы развития наносят ущерб именно тем природным ресурсам,

которые служат для них базой, а ухудшение состояния природной среды подрывает рост экономики. В качестве выхода из глобального социально-экологического кризиса Комиссия Брундтланд предлагает концепцию устойчивого развития [1].

Согласно докладу Комиссии Брундтланд «устойчивое развитие» (англ. sustainable development) это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности [1]. Устойчивое развитие это процесс экономических и социальных изменений, при котором эксплуатация природных ресурсов, внедрение инвестиций и научно-техническое развитие согласованы друг с другом и укрепляют нынешний и будущий потенциал для удовлетворения человеческих потребностей и устремлений. В широком смысле стратегия устойчивого развития направлена на достижение гармонии в отношениях между обществом и природой с учетом развития экономики.

### 2. УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

В основу устойчивого развития положены принципы учета трех основных аспектов – экономического, социального и экологического (рис. 1).

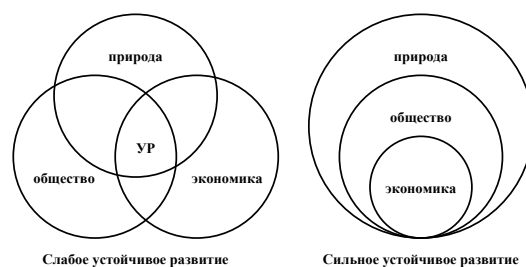


Рис.1 – Устойчивое развитие с учетом взаимосвязи природы, общества и экономики (Концепция ESG) [2].

Проблема сохранения окружающей среды стала одним из важных аспектов глобальной проблемы устойчивого развития. В 1992 г. на конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро участники из 179 приняли решение, что существующую глобальную проблему ни одна страна в одиночку решить не сможет. В итоге приняли концепцию устойчивого развития, которая предполагает достижение разумной сбалансирован-

ности социально-экономического развития человечества и сохранения окружающей среды [2].

Основы международной климатической политики заложены в Рамочной конвенции ООН об изменении климата (РКИК) 1992 г. Конечная цель этой политики состоит в том, чтобы добиться стабилизации концентраций парниковых газов в атмосфере на уровне, исключаящем опасное антропогенное воздействие на климатическую систему.

Указанные в РКИК требования были затем конкретизированы в Киотском протоколе, который был принят на 3-й Конференции сторон РКИК в г. Киото (Япония) в декабре 1997 г. и вступил в силу 16 февраля 2005 г.

Парижское соглашение, подготовленное взамен Киотского протокола в ходе Конференции по климату в Париже и принятое в декабре 2015 года устанавливает климатическую цель – удержать рост средней температуры в пределах заведомо ниже 2 °С, а по возможности не выше 1,5 °С, от доиндустриального уровня, и требует от всех участников как можно скорее остановить рост выбросов парниковых газов и приступить к их абсолютному сокращению в глобальном масштабе с тем, чтобы во второй половине XXI века достичь равновесия между антропогенными выбросами парниковых газов и их поглощением. Достижению этих целей должны служить перевод экономики на путь низкоуглеродного развития и переориентация финансовых потоков в пользу отраслей и технологий, отличающихся низким уровнем выбросов парниковых газов и/или способствующих их сокращению. Глобальное развитие должно быть не просто «зеленым», но и устойчивым во всей полноте этого понятия, то есть решающее значение имеет изменение характера использования природных ресурсов.

Парижское соглашение ставит задачу обеспечения роста экономики и одновременно сокращения выбросов максимально быстро до нулевого значения. Моделирование сценариев глубокой декарбонизации экономики ведущих стран, таких как DDPP, CD-LINKS, COMMIT, Всемирного банка, ОЭСР, Международного агентства возобновляемой энергетики (IRENA) показало, что выбросы можно сократить на 80–90 % к 2050 году во всех крупных экономиках мира. Затраты на реализацию данных проектов в среднем составят около 1 % ВВП в год при разумном планировании. Сравнение данных затрат с социально-экономическим ущербом при отсутствии климатических мер в размере 5–20 % мирового ВВП в год показывает необходимость принятия данных мер [3].

На состоявшемся в апреле 2021 года Саммите лидеров по вопросам климата были рассмотрены вопросы, направленные на преодоление негативных последствий глобального изменения климата. Прежде всего, это касается реализации Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Киотского протокола и Парижского соглашения [4].

На Конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP26), проходившей в ноябре 2021 в Глазго, был принят Климатический пакт Глазго (Glasgow Climate Pact). В документе сохранена цель удержать рост среднемировой температуры в пределах 1,5 градуса (на сегодня этот показатель составляет 1,1 градуса), но отмечается, что она будет достигнута «только при согласованных и немедленных глобальных усилиях».

В России, как и в других странах мира, идеи устойчивого развития получили распространение после Конференции в Рио-де-Жанейро. Первым государственным документом по устойчивому развитию, принятым в России, стал изданный в 1994 году указ президента «О государственной стратегии Российской Федерации по охране окружающей среды и обеспечению устойчивого развития».

В апреле 1996 года была утверждена Указом Президента Российской Федерации № 440 «Концепция перехода Российской Федерации к устойчивому развитию». В соответствии с этим указом и постановлением правительства РФ, была осуществлена подготовка проекта «Государственной стратегии устойчивого развития РФ».

В ноябре 2020 года президент РФ подписал указ «О сокращении выбросов парниковых газов»: к 2030 году их объем не должен превышать 70 % от уровня 1990 года. Документ предполагает стимулирование компаний к внедрению низкоуглеродных политик. Для компенсации выбросов, которых невозможно избежать, предусмотрено увеличение площади лесов и внедрение других климатических проектов.

Целью новой Стратегии развития до 2050 года согласно распоряжению Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р является достижение углеродной нейтральности при устойчивом росте экономики. Приоритетом Стратегии является выполнение задачи по сокращению в период по 2050 год накопленного объема чистой эмиссии парниковых газов до более низких значений по сравнению с показателями Европейского союза, что будет способствовать удержанию прироста глобальной средней температуры значительно ниже 2 °С сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий в целях ограничения роста температуры до 1,5 °С [5].

В стратегии заложены два сценария - инерционный и целевой (интенсивный). Различия сценариев развития заключаются в разных подходах по адаптации российской экономики к глобальному энергопереходу. Инерционный сценарий предусматривает реализацию уже принятых решений, а целевой предусматривает дополнительные меры по декарбонизации отраслей экономики и увеличению поглощающей способности управляемых экосистем [5].

### 3. ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

В настоящее время около 80% первичной энергии в мире происходит из ископаемого топлива, сжигание которого приводит к выбросу в атмосферу около 34 млрд. т диоксида углерода [6].

Согласно выводам Международной группы экспертов по климату (МГЭИК), рост промышленных выбросов углеродов привело к ускорению изменения климата. При моделировании изменения климата рассматриваются 4 репрезентативные траектории концентраций (RCP) – сценарии изменения концентрации ПГ. Они описывают различные варианты будущего климата, все из которых считаются возможными в зависимости от объема ПГ, выбрасываемых в ближайшие годы [7]. RCP - первоначально RCP2.6, RCP4.5, RCP6 и RCP8.5 согласуются с определенными социально-экономическими предположениями, но заменяются общими социально-экономическими путями, которые, как ожидается, обеспечат гибкие описания возможных вариантов будущего в рамках каждого RCP (рис. 2).

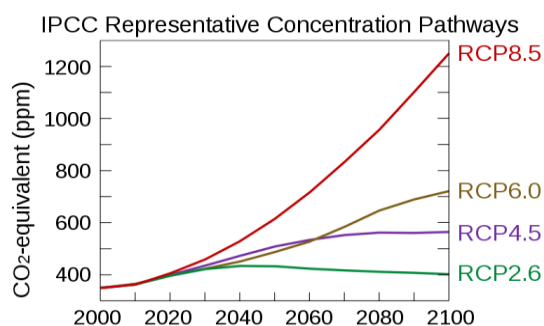


Рис. 2 – Репрезентативная траектория концентрации (RCP) по расчетам Международной группы экспертов по климату [7]

Глобальная приземная температура в конце XXI-го века, вероятно, превысит 1,5 °C по сравнению с периодом 1850-1900 гг. во всех сценариях RCP, кроме RCP2.6. Скорее всего оно превысит 2 °C в сценариях RCP6.0 и RCP8.5 и наиболее вероятно в RCP4.5 более 2 °C.

Актуальность декарбонизации энергетических систем возросла после вступления в силу Парижского соглашения по климату в 2016 г. Декарбонизация, то есть переход в глобальном масштабе к низкоуглеродному развитию, является ответом на глобальное изменение климата, вызванное антропогенными выбросами в атмосферу ПГ. Цель декарбонизации – сократить, и по возможности исключить эти выбросы, чтобы тем самым смягчить климатические изменения и минимизировать наносимый ими ущерб.

В энергетике декарбонизация проводится с целью замены систем, основанных на ископаемом топливе, электроэнергией, производимой с использованием низкоуглеродистых ресурсов, таких как возобновляемые источники энергии (ВИЭ), а также новых перспективных источников, таких как объекты новой ядерной техники (ОНЯТ) [8].

В настоящее время ВИЭ не дают необходимое количество энергии, поэтому идут поиски новых источников энергии. Ядерная энергетика, экономически эффективна, однако при этом производится большое количество радиоактивных отходов и существует риск техногенных аварий. Гораздо более безопасным с точки зрения воздействия на окружающую среду является использование энергии синтеза легких ядер - управляемый термоядерный синтез [8].

Нынешний уровень технологий не позволяет отказаться от использования традиционных энергоносителей: угля, нефти, природного газа. Однако повысить эффективность их использования с целью снижения выбросов возможно уже сейчас. Полная декарбонизация энергосистем является единственным решением для стабилизации климата.

Для декарбонизации необходимо выполнение трех этапов [6]:

- необходимо повысить энергоэффективность, снизить потребности в обогреве, охлаждении и энергоемкой вентиляции;
- производить электричество с помощью ВИЭ – ветра, солнца, гидроэнергии, геотермальной энергии и других энергоисточников, не основанных на углеродном топливе;
- переключиться с ископаемого топлива на электричество (или водород, произведенный с помощью «неуглеродной» электроэнергии) или на новейшие виды биотоплива.

Для удержания роста средней температуры в пределах 1,5 °C доля ВИЭ в выработке электроэнергии должна возрасти к концу 2050 г. до 70-85%, при этом доля природного газа должна снизиться до 8%, а доля угля уменьшится практически до 0%.

Пути развития экономик государств, осуществляющих наибольшие выбросы ПГ (рис. 3) направлены на развитие альтернативной энергетики и разработку новых технологий декарбонизации. К ВИЭ относятся энергия солнца, ветер, вода, а также биотопливо и коммунальные отходы. США к 2025 г. планируют сократить выбросы ПГ на 26-28% от уровня 2005 г.

Китай объявил о предстоящей декарбонизации экономики с целью ограничения выбросов к 2030 году и достижения углеродной нейтральности к 2060 году [10]. Ускорение решения данного вопроса связано с изменением климата – наводнения на реке Янцзы, усиление волн тепла, повышение уровня моря и крайне загрязненный воздух в крупных мегаполисах. Для перестройки энергетической системы Китая придется потратить большие средства - в настоящее время 85% энергетических источников страны составляет ископаемое топливо, и чтобы добиться углеродного нейтралитета, необходимо сократить этот показатель до 15%. Для этого нужны большие и срочные инвестиции в альтернативную энергетику и постепенный отказ от угольных электростанций.



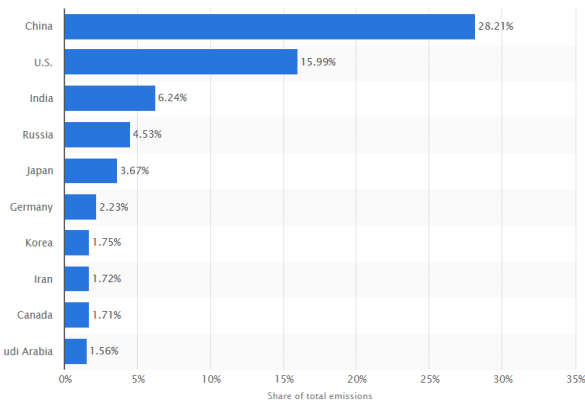


Рис. 3 – Крупнейшие производители выбросов CO<sub>2</sub> в мире в 2016 году [9].

В Китае развивается строительство заводов по производству энергии из отходов. За последние три года там запустили порядка 120 таких предприятий, а их общее количество уже превышает 350. В планах на ближайшую пятилетку – довести количество заводов до 500, тогда они смогут перерабатывать 60% коммунальных отходов, обеспечивая чистой энергией целые города.

В США конце января 2021 года президент подписал сразу три указа по экологии и климату. Внутри страны будет прекращена выдача лицензий на добычу нефти, природного газа и иного ископаемого топлива на федеральных землях. 2025 г. Планируется сократить выбросы ПГ на 26-28% от уровня 2005 г. [11].

План «Революция чистой энергетики», провозглашенный президентом США включает следующие цели [12]:

- достижение климатической нейтральности в США к 2050 году;
- переход на 100 % чистой энергии;
- содействие остальному миру в достижении целей Парижского соглашения и декарбонизации экономики.

В России очень хороший потенциал для развития ВИЭ, который позволит в будущем значительно снизить стоимость производства зеленой энергии. Необходимо заменить ископаемое топливо экологически чистым топливом. Правильный экологический курс в энергетике приводит к экономическим преимуществам. Ведь доступное энергоснабжение является основой экономического роста и процветания. По расчетам экспертов, наша страна может уже к 2030 году увеличить долю ВИЭ в общей энергетической структуре до 11,3% [10].

Минэкономразвития прогнозирует, что в ближайшие десятилетия Россия утратит свои преимущества по показателю углеродоемкости электроэнергетики, поскольку мировой энергобаланс смещается в сторону возобновляемых источников энергии. При этом потенциал для развития в России гидро- и прочей низкоуглеродной энергетики, как и

для повышения энергоэффективности экономики в целом, остается недоиспользованным (рис. 4) [12].

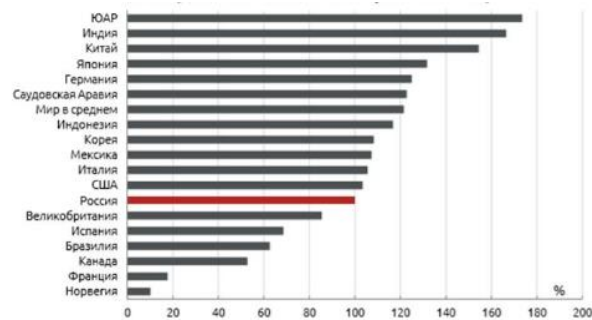


Рис. 4 – Уровень углеродоемкости единицы произведенной продукции в отдельных странах [13].

Одним из способов уменьшения количества двуокиси углерода, метана, закиси азота и др. – это создание карбоновых полигонов, где на карбоновых фермах будут выращиваться леса для поглощения парниковых газов [14]. Целью создания карбоновых полигонов является попытка разработать методику измерения потоков баланса основных парниковых газов, а именно того, как и где они выделяются и поглощаются.

Расчёт поглотительной способности лесов России для предоставления данных в ООН производится с помощью «Системы региональной оценки бюджета углерода лесов» (РОБУЛ), основанной на базе научных исследований 1960–1990-х гг [15]. По данным РОБУЛ, поглощающая способность российских лесов до 2030 года вырастет с 370 млн. т до 400–650 млн. т углерода в зависимости от динамики лесозаготовок. Альтернативная методика от Всероссийского НИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства (ВНИИЛМ) прогнозирует, что поглощение российскими лесами углерода в аналогичный период увеличится с 1,945 млрд. т до 2,4 млрд. т.

### 3. РАСЧЕТ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА

В Европе разработан план достижения нулевого выброса ПГ и нулевого суммарного загрязнения окружающей среды путём перехода от использования ископаемых к ВИЭ и сырья в странах-членах Европейского союза к 2050 году. Трансграничное углеродное регулирование (ТУР) – часть программы «Зеленый курс» по экологизации и декарбонизации экономики Евросоюза, представленной в декабре 2019 года. Регулирование предполагает введение пошлин на импортируемые в Европу товары, при производстве которых произошла значительная эмиссия углекислого газа и других соединений углерода. Углеродный след – это общий объем выбросов ПГ, вызванный человеком, событием, организацией, услугой, местом или продуктом, выраженный в эквиваленте диоксида углерода (CO<sub>2</sub>).

Углеродный след рассматривается в трёх различных категориях:



- прямые выбросы (непосредственные выбросы из собственных или контролируемых источников);
- косвенные выбросы (от производства продукта - электроэнергия, пар, отопление и др.);
- прочие выбросы (выбросы, которые происходят по ходу всего цикла жизни продукта, при его производстве и утилизации)

При расчете углеродного следа определяется модель обращения энергии и ресурсов на предприятии (энерго-ресурсный аудит), её влияние на окружающую среду, определяются мероприятия и решения уменьшения потребления этих ресурсов и снижение углеродного следа без значительного ущерба производству.

Для минимизации углеродного следа необходимо:

- оптимизировать потребление электроэнергии, повышать эффективность производства, покупать сырье с более низким углеродным следом;
- необходимо проводить компенсацию углеродного следа путём использования естественных природных факторов – высаживание деревьев для депонирования углерода;
- переходить на ВИЭ: устанавливать солнечные панели, ветряные электростанции, осваивать геотермальные источники, проводить рекуперацию тепла, использовать электрический транспорт.

В соответствии с № 296-ФЗ от 02.07.2021 «Об ограничении выбросов парниковых газов» крупнейшие эмитенты ПГ будут обязаны подавать обязательную углеродную отчетность. Прямые и косвенные выбросы, а также выбросы при использовании продукции в России оцениваются в 3,1 млрд. т CO<sub>2</sub>-эквивалента, из которых 54 % приходится на экспортируемую продукцию [16].

В настоящее время для учета выбросов ПГ используются следующие документы:

- Международный стандарт ISO 14064 корпоративной отчетности по выбросам парниковых газов;
- Протокол по выбросам ПГ World Resource Institute (WRI) и World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) – стандарт GHG;
- Спецификации PAS 2050 (BSI 2007) и PAS 2060 (BSI 2010) Британского института стандартов (BSI)

В ISO 14064-1 определены три метода количественного определения выбросов ПГ, которые могут использоваться организациями:

- расчеты;
- измерения;
- комбинации измерения и расчета.

Таким образом, для учета влияния деятельности человека и любого предприятия на окружающую среду и снижения содержания ПГ необходим расчет углеродного следа.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальное изменение климата уже не является только научной и экологической проблемой, а становится делом внутренней и внешней политики, бизнеса и различных корпораций. Парижское соглашение, заложило основы международного сотрудничества в борьбе с климатическими изменениями. Вместо квотирования выбросов для стран, новый подход предусматривает добровольный выбор целей по снижению эмиссии и увеличению поглощения ПГ для государств и отдельных городов.

Проблема сохранения окружающей среды – один из важных аспектов глобальной проблемы устойчивого развития. Для сохранения экосистемы планеты и решения вопроса глобального изменения климата ведущие мировые экономики должны способствовать декарбонизации с целью снижения выбросов ПГ и увеличения использования ВИЭ.

Для удержания роста средней температуры в пределах 1,5 °C доля ВИЭ в выработке электроэнергии должна возрасти к концу 2050 г. до 70-85%, доля природного газа должна снизиться до 8%, а доля угля – практически до 0%. Россия к 2030 году может увеличить долю ВИЭ в общей энергетической структуре до 11,3%.

Для декарбонизации энергетики необходимо выполнение следующих этапов:

- повышение энергоэффективности,
- производство электроэнергии с помощью ВИЭ, а также ОНЯТ, в частности управляемого термоядерного синтеза;
- переход с ископаемого топлива на электричество или на новейшие виды биотоплива.

В России ведется разработка современного законодательства, обеспечивающего контроль за эмиссией углерода и стимулирующего её сокращение. Один из проектов – создание карбоновых полигонов для уменьшения количества ПГ. Компенсация выбросов CO<sub>2</sub> возможна при устойчивом лесопользовании с учетом поглотительной способности лесов.

Для учета влияния деятельности человека на окружающую среду и снижения содержания ПГ необходим расчет углеродного следа, который учитывает все выбросы ПГ, произведённые прямо и косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом. Учёт углеродного следа необходимо рассматривать в трёх различных категориях:

- прямые выбросы;
- косвенные выбросы;
- прочие выбросы.

Для снижения углеродного следа необходимо разработать комплекс мер:

- оптимизировать потребление электроэнергии;
- необходимо проводить компенсацию углеродного следа;
- переходить на ВИЭ.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПГ — парниковые газы;  
ОНЯТ — объекты новой ядерной техники;  
ВИЭ – возобновляемые источники энергии;  
ТУР – трансграничное углеродное регулирование

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Всемирная** комиссия по окружающей среде и развитию: наше общее будущее. Википедия. (n.d.) Retrieved from <https://deru.other.wiki/wiki/Brundtland-Bericht>
2. **Климатически** нейтральное обращение с отходами в Российской Федерации. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2021) Retrieved from <https://www.giz.de/en/worldwide/372.html>
3. **Европейская** экономическая комиссия. Изменчивость и изменение климата: тенденции и прогнозы. 17 сессия. (24-25.04, 2019 г.4). Швейцария. Женева.
4. **Саммит** по вопросам климата. Пресс-служба Президента России. Retrieved from [kremlin.ru/d/65425](http://kremlin.ru/d/65425)
5. **Распоряжение** правительства РФ от 29 октября 2021 года N 3052-р «О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года»
6. **Джеффри Сакс**. Декарбонизация всей страны: смогут ли экономики G7 отказаться от нефти. РБК. Retrieved from <https://www.rbc.ru/opinions/economics/11/06/2015/557985dd9a79478be86ecb18>
7. **Representative** Concentration Pathway. Википедия. (n.d.) Retrieved from [https://wikichi.ru/wiki/Representative\\_Concentration\\_Pathway](https://wikichi.ru/wiki/Representative_Concentration_Pathway)
8. **Антоненко Е.Г.** Обеспечение безопасной эксплуатации объектов новой ядерной техники (ОНЯТ) // XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика. Материалы конференции. В 3-х томах. Казанский ГЭУ, Казань. 2022.
9. **Elizabeth Ward**. Global CO2 Emissions Held Steady in 2016. Green Risks. Retrieved from <https://greenrisks.blogspot.com/2017/10/global-co2-emissions-held-steady-in-2016.html>
10. **Подосенова О.** Миссия «Декарбонизация». ООО ЭПЦ «Беллона». Retrieved from <https://bellona.ru/2019/01/16/mission-possible>
11. **Юлкин М. А.** Глобальная декарбонизация и ее влияние на экономику России. Москва, Россия: АНО «Центр экологических инвестиций». 2018. 23 с.
12. **Сафонов Г. В.** Декарбонизация мировой экономики и Россия. Нефтегазовая вертикаль. 2020. С. 21-22, 66-70.
13. **Углеродный** след российской энергетики. Институт комплексных стратегических исследований (ИКСИ). Retrieved from <https://icss.ru/otrasli-ryinki/energeticheskij-sektor/uglerodnyy-sled-rossiyskoj-energetiki>
14. В семи регионах России появятся карбоновые полигоны. Известия. Retrieved from <https://iz.ru/1134398/2021-03-09/v-semi-regionakh-rossii-poiaviatsia-karbonovye-poligony/>
15. Научно-исследовательский центр проблем интеграции стран-участниц Евразийского экономического союза "Союзный нарратив 2050. Retrieved from <https://www.sonar2050.org>
16. **Евро ТУР: цена вопроса** // Vygon Consulting. 2021. [https://vygon.consulting/upload/iblock/f1e/fsslfi73x3khz0tcb6sxlq70go5nfim/vygon\\_consulting\\_energy\\_transition.pdf](https://vygon.consulting/upload/iblock/f1e/fsslfi73x3khz0tcb6sxlq70go5nfim/vygon_consulting_energy_transition.pdf)

**АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И УЧЕТА ПАРНИКОВЫХ  
ГАЗОВ****АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена сравнительному анализу методов расчета и учета парниковых газов. Произведен анализ нормативно-правовой базы в области регулирования выбросов парниковых газов. Приведены основные системы учета выбросов парниковых газов и выделены подходы к расчету парниковых газов – метод на основе массового баланса углерода и метод с использованием коэффициентов эмиссий, определены области охвата и области применения.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Возрастание концентрации парниковых газов в атмосфере приводит к усилению парникового эффекта, нарушению теплового баланса Земли – глобальному потеплению, данное явление вызвано антропогенным загрязнением биосферы, именно деятельность человека оказывает небывалое по масштабам и интенсивности воздействие на окружающую среду и глобальные системы жизнеобеспечения. Сжигание сырья: угля, нефти и природного газа для производства электроэнергии, и тепла составляет приблизительно 25 % мировых антропогенных выбросов парниковых газов. В специальном докладе, подготовленном МГЭИК (Межправительственная группы экспертов по изменению климата) приводятся данные о том, что деятельность человека является причиной глобального потепления примерно на 1,0 °C выше доиндустриальных уровней с вероятным диапазоном от 0,8 °C до 1,2 °C. Вероятно глобальное потепление достигнет 1,5 °C в период между 2030 и 2052 годами, если оно продолжит повышаться сегодняшними темпами (высокая степень достоверности) [1].

На территории Российской Федерации скорость потепления климата выше среднемировой, особенность географического положения является главной причиной этого явления, во всех физико-географических регионах и федеральных округах наблюдается рост среднегодовых температур, рекордный рост среднегодовой температуры зафиксирован на побережье Северного Ледовитого океана [2]. Изменение климата и экологическое регулирование стали ключевыми вопросами международной повестки. Глобальная декарбонизация является ответом на глобальное изменение климата, вызванное антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов.

Киотским протоколом ранее (истек срок действия в 2020 году) регулировались выбросы следующих парниковых газов: диоксид углерода (CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), закись азота (N<sub>2</sub>O), гидрофторуглероды (ГФУ), перфторуглероды (ПФУ), гекс-

афторид серы (SF<sub>6</sub>) [3]. Ричард Фостер Флинт в «История Земли» обозначил, что в настоящее время «парниковый эффект, в среднем до 78% обусловлен парами воды и только на 22% углекислым газом». Водяной пар считается газом с положительной обратной связью, чем больше в атмосфере других парниковых газов, тем больше процесс испарения и, соответственно, выше концентрация водяных паров. Антропогенная составляющая водяного пара недооценивается, так как МГЭИК считает, что водяной пар является основным парниковым газом, но при этом за потепление ответственности не несет, так как его концентрация в атмосфере не повышается в процессе наблюдающегося глобального потепления. Но важно отметить, что каждая тонна водяного пара, выброшенная из градирни в приземный слой атмосферы, эквивалентна по «парниковому эффекту» 360 кг углекислого газа [4]. Главным антропогенным парниковым газом является диоксид углерода, на его долю приходится 64 % глобального потепления [5].

Международная инициатива в борьбе с изменением климата отражается в принятии и разработке важных документов, таких как Парижское соглашение (ранее Киотский протокол) и Проект Механизма трансграничного углеродного регулирования (ТУР) Евросоюза, целью которого является предотвращение утечки углерода в ходе импорта продукции.

**2. НОРМОТИВНО-ПРАВОВАЯ БАЗА РФ И  
МЕЖДУНАРОДНЫЕ СИСТЕМЫ КОН-  
ТРОЛЯ ЭМИССИЙ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ**

Регулирование выбросов парниковых газов в России в настоящее время находится на этапе становления. Указ Президента РФ № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» можно считать точкой начала активных действий в учете и контроле выбросов парниковых газов [6]. Федеральный закон № 296 «Об ограничении выбросов парниковых газов» - основной документ, регулирующий выбросы [7], а Распоряжения Правительства РФ № 2979-р и 3052-р дополняют закон, в первом содержится перечень веществ, подлежащих государственному учету и их потенциалы глобального потепления [8], а во втором Стратегия социально-экономического развития РФ с низким уровнем углерода до 2050 года.

Сейчас существует множество стандартов и руководств по учету парниковых газов, Национальная организация поддержки проектов поглощения углерода выделяет следующие стандарты:

- Протокол по выбросам парниковых газов GHG Protocol.

- ГОСТ 56267 – 2014.

- Общедоступные спецификации PAS 2050 и PAS 2060 Британского института стандартов (BSI).

Протокол GHG это набор отраслевых руководств и инструментов для учета выбросов парниковых газов, широко используемый международный инструмент учета, который дает количественно оценить выбросы парниковых газов. Также Протокол вводит разделение выбросов на прямые и косвенные и классификацию по трем областям охвата (Score 1–3).

Score 1 (прямые выбросы) – это выбросы парниковых газов от источников, находящихся в собственности и (или) на которых осуществляется хозяйственная деятельность компании, подающей отчет.

Score 2 (косвенные «энергетические» выбросы) – это выбросы от производства энергии на сторонних энергоисточниках, приобретенной у поставщика таких услуг. Под Score 2 подразумевается энергия, закупленная, а не генерируемая на собственных мощностях.

Score 3 (косвенные выбросы) – это все остальные - другие выбросы парниковых газов, которые образуются, к примеру, при транспортировке сырья или складировании продукции в сторонних логистических центрах, выбросы парниковых газов от утилизации отходов продукции.

Совокупность всех выбросов парниковых газов (сумма Score 1, Score 2, Score 3), прямо и косвенно произведенных организацией, составляет ее (его) углеродный след [9].

Большое количество российских предприятий пытается подсчитать объемы выбросов парниковых газов по областям охвата, используя различные методики, в том числе Протокол GHG, однако, аналогичные подходы к расчету выбросов парниковых газов представлены в Приказе Министерства природных ресурсов и экологии России № 300, а также в ГОСТ 56267–2014. Российский стандарт полностью адаптирован к принципам, требованиям, рекомендациям по проведению количественной оценки, мониторинга и составлению документации в отношении проектов управления или сокращения выбросов парниковых газов, изложенных в Протоколе [9].

Спецификации PAS 2050 и PAS 2060 - инструменты правительства Англии для контроля выбросов парниковых газов. Британская организация по стандартизации (BSI British Standards - член ИСО от Великобритании) разработала общедоступные технические условия (PAS 2050) на метод измерения выбросов парниковых газов (GHG), связанных с производством и потреблением продукции и оказанием услуг. Британский институт стандартов объявил о разработке Стандарта углеродной нейтральности PAS 2060 в октябре 2009 года с целью повышения прозрачности заявлений о углеродной нейтральности путем предоставления от-

четности. Спецификации подразумевают проверку углеродного следа, которая состоит из проверки независимой третьей стороной того, что расчет, сделанный поставщиком, соответствует требованиям спецификации PAS 2050, т.е. спецификации не содержат методики расчета, а лишь требования к его проверке, расчет выполняется согласно методикам, представленным в Протоколом GHG [10].

В ходе сравнительного анализа установлено, что Протокол GHG – один из первых углеродных стандартов, руководства которого обновляются и совершенствуются каждый год, GHG протокол определяет, разъясняет и предоставляет варианты наилучших методов расчета парниковых газов, в то время как российский ГОСТ 56267 – 2014 (ISO 14064) устанавливает минимальные стандарты для соответствия этим методам, а PAS 2050 и PAS 2060 содержат требования к проверке отчетности на основе проведенных расчетов.

### 3. ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

В ИСО 14064-1 определены три метода количественного определения выбросов парниковых газов, которые могут использоваться организациями [11]:

- 1) расчеты;
- 2) измерения;
- 3) комбинации измерения и расчета.

Для расчетов выбросов парниковых газов (ПГ) отдельной категории организация должна реализовать следующие шаги:

- определить источники и поглотители ПГ для каждой категории;
- осуществить сбор необходимых данных для всех источников и поглотителей;
- умножить значения данных о деятельности на соответствующие коэффициенты выбросов или удаления для получения объемов выбросов или удаления ПГ.

Необходимость расчета выбросов парниковых газов регулируется документами: ISO 14067:2018 «Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification» (в России – ГОСТ Р 56267-2014/ISO/TR 14069:2013 «Газы парниковые. Определение количества выбросов парниковых газов в организациях и отчетность. Руководство по применению стандарта ИСО 14064-1»).

В зависимости от технологического процесса выделяют два основных подхода к расчету выбросов парниковых газов [4].

- Метод расчета на основе массового баланса углерода.

- Метод с использованием коэффициентов эмиссий, то есть коэффициентов выбросов.

В Приказе Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 300 обозначены категории источников выбросов парниковых газов, подлежащие обязательному учету: стационарное сжигание топлива, сжигание в факелах, fugitive выбросы

сы, нефтепереработка, производство кокса, производство цемента, производство извести, производство стекла, производства керамических изделий, производство аммиака, производство азотной кислоты, капролактама, глиоксаля и глиоксиловой кислоты, нефтехимическое производство, производство фторсодержащих соединений, черная металлургия, производство ферросплавов, производство первичного алюминия, прочие промышленные процессы, авиационный транспорт, железнодорожный транспорт [12].

Первый метод в основном применим при расчете выбросов при производстве извести, цемента, стекла, керамики и др., не используется при расчете выбросов от сжигания топлива. Выбросы CO<sub>2</sub> зависят от объема углеродсодержащих компонентов на входе и выходе из процессов. Расчет выбросов основывается на соблюдении баланса углерода на входе и на выходе. Необходимо знать какая реакция происходит при технологическом процессе, к примеру, при обжигании известняка карбонат кальция разлагается на оксид кальция и углекислый газ: CaCO<sub>3</sub>=CaO+CO<sub>2</sub>.

При расчёте выбросов CO<sub>2</sub>, необходимо использовать массу углерода на выходе и поправочный коэффициент, с их помощью осуществляется перевод молярной массы углерода в молярную массу углекислого газа. Значение молярной массы углекислого газа – 44 г/моль, а углерода – 12 г/моль, т.е., если имеются необходимые данные о массе углерода в тоннах на входе и на выходе из процесса, необходимо производить пересчет углерода в выбросы углекислого газа посредством перемножения полученной массы углерода на 44/12 (или на 3,664). Таким образом, тонны углерода переводятся в тонны углекислого газа за счет перемножения на данный коэффициент.

Второй метод необходимо использовать для определения выбросов от сжигаемого топлива, когда результат будет сильно зависеть от поправочных коэффициентов эмиссий – например, для стационарного сжигания топлива коэффициентами эмиссии являются коэффициент выбросов CO<sub>2</sub> от сжигания топлива и коэффициент окисления. Исходными данными для такой расчетной методики можно назвать расход сжигаемого топлива и вид деятельности организации. Величина А в формуле, представленной в Таблице 1, это данные о производстве продукции или потреблении ресурса, с которым связаны выбросы парниковых газов. Коэффициент эмиссии EF определяется в зависимости от содержания углерода в различных видах топлива, он отображает зависимость объема выбросов CO<sub>2</sub> от объема вырабатываемой энергии, единицей измерения коэффициента является тонна CO<sub>2</sub>/МДж. Значения коэффициентов находятся по справочным таблицам, для применения коэффициента EF необходимо определить энергетический эквивалент используемого топлива.

Основные формулы расчета, относящиеся к данным методам сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Методы расчета выбросов парниковых газов [13].

Название метода	Формула расчета
Метод расчета на основе массового баланса углерода	$E_{CO_2} = \frac{44}{12} \times (CA_{stock, st} + CA_{input} - CA_{stock, end} - C_{output})$ <p><math>E_{CO_2}</math> - выбросы CO<sub>2</sub> за период, т  <math>CA_{stock, st}</math> - запас углерода на начало периода, т  <math>CA_{input}</math> - количество углерода, поступившего на объект со стороны за отчетный период, т  <math>CA_{stock, end}</math> - запас углерода на конец периода, т  <math>C_{output}</math> - количество углерода, вывезенного за пределы объекта за отчетный период, т</p>
Метод с использованием коэффициентов эмиссий	$E = A \times EF$ <p><math>E</math> - выбросы ПГ за отчетный период  <math>A</math> - данные о производстве продукции или потреблении ресурса, с которым связаны выбросы ПГ (например, сожженное топливо), за отчетный период  <math>EF</math> - коэффициент эмиссии</p>

Второй метод чаще используется и встречается в документах - представлен в ГОСТ Р 56267-2014/ISO/TR 14069:2013, в GHG Протоколе и в Приказе Министерства природы и экологии РФ №300 от 30.06.2015 года: «Выбросы или удаления ПГ = (данные о деятельности) x (коэффициент выбросов или удаления)». На практике метод часто используется для расчета прямых выбросов парниковых газов от стационарного сжигания топлива.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема изменения климата привела международное сообщество к принятию важных документов в области сокращения эмиссий парниковых газов. Регулирование выбросов парниковых газов на территории РФ начало активно развиваться, уже разработана нормативно-правовая база в области снижения выбросов парниковых газов.

В ходе анализа основных систем учета выбросов парниковых газов было установлено, что международный Протокол по выбросам парниковых газов GHG Protocol является наиболее полным стандартом, который включает в себя руководства по подходу к расчету прямых и косвенных выбросов, подчеркивается важность косвенных выбросов Score 2 и Score 3 и их принципиальные отличия друг от друга, стандарт ISO 14064 не учитывает всех областей охвата и обобщает косвенные выбросы, не определяет областей охвата, общедо-

ступные спецификации PAS 2050 и PAS 2060 содержат требования к применению стандартов GHG Protocol и ISO 14064.

Определены подходы к расчету выбросов углеродного следа в зависимости от особенностей технологического процесса, в ходе которого образуются выбросы парниковых газов, к ним относятся: метод расчета на основе массового баланса углерода - когда речь идет о выбросах, получаемых в процессе производства продукции, а исходными данными для расчета служат данные о расходе сырья; метод расчета с использованием коэффициентов эмиссий – применяется, когда выбросы образуются непосредственно при сжигании топлива и исходными данными для расчета служит расход топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IPCC, 2000:** Land Use, Land–Use Change, and Forestry: A Special Report of the IPCC (МГЭИК, 2000 год: Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство. Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата) [Watson, R.T., I.R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D.J. Verardo, and D.J. Dokken (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 375 pp. IPCC, 2003: Definitions and Meth
2. Об утверждении стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утв. Распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р)
3. Конвенции и соглашения [Электронный ресурс]. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/kyoto.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/kyoto.shtml) дата обращения: 05.06.2022).
4. Водяной пар и «парниковый эффект» [Электронный ресурс]. URL: <https://regnum-ru.turbopages.org/regnum.ru/s/news/2086744.html> дата обращения: 05.06.2022).
5. **Бочкарев В.А., Бочкарева А.В.** Оценка выбросов парниковых газов предприятиями энергетики [Электронный ресурс]. URL: <otsenka-vybrosov-parnikovyh-gazov-predpriyatiyami-energetiki.pdf> (дата обращения: 6.06.2022).
6. О сокращении выбросов парниковых газов (Указ Президента РФ от 04.11.2020 № 666)
7. **Федеральный закон от 02.07.2021 № 296-ФЗ** «Об ограничении выбросов парниковых газов»
8. Об утверждении перечня парниковых газов, в отношении которых осуществляется государственный учет выбросов парниковых газов и ведение кадастра парниковых газов (утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 октября 2021 года №2979-р)
9. **М. С. Ермакова** Выбросы парниковых газов: раскладываем по полочкам [Электронный ресурс]. URL: <Ermakova.pdf> (дата обращения: 11.06.2022).
10. Проект BSI по оценке углеродного следа продукции [Электронный ресурс]. URL: <http://webportals.v.gost.ru/portal/DOR-www.nsf/all/A4731A9AE3E197FFC3257570002B3951OpenDocument?> (дата обращения: 09.06.2022).
11. **ГОСТ 56267 – 2014 (ISO 14064)** Газы парниковые. Определение количества выбросов парниковых газов в организациях и отчетность. Руководство по применению стандарта ИСО 14064-1.
12. **Приказ** Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 30 июня 2015 года № 300 «Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации».
13. Международные методики расчета выбросов парниковых газов [Электронный ресурс]. URL: <https://hpb-s.com/news/metodika-rascheta-vybrosov-pg-po-mezhdunarodnym-standartam/> (дата обращения: 16.06.2022).



**СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ****АННОТАЦИЯ**

Производство цемента является одним из углеродоемких секторов российской экономики, потребляя большое количество традиционного ископаемого топлива, карбонатного сырья и электроэнергии. В условиях стремительного роста цен на энергоресурсы, а также ужесточения климатической политики необходимо проводить масштабную модернизацию цементных заводов с целью повышения их энергоэффективности. В статье предложены методы сокращения углеродного следа и их технические решения при производстве цемента, а также приведена оценка эколого-экономической эффективности их применения на конкретном предприятии.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Загрязнение никогда не должно быть ценой процветания.

Эл Гор.

Углеродный след – это представление о выбросах всех парниковых газов, прямо или косвенно произведенных на предприятии. Основными газами являются углекислый газ, метан и соединения азота. На каждом этапе производства цемента, от добычи, до переработки отходов, в независимости от типа используемой энергии, присутствуют выбросы загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов.

Увеличение потребления цемента в России по итогам 2021 г. в сравнении с предыдущим годом составило 7,2 % или около 60,4 млн т. [1]. При этом рост наблюдался во всех федеральных округах. Во многом это связано с тем, что Минстрой планирует к 2030 году построить примерно миллиард квадратных метров жилья. Согласно проекту стратегии развития строительной отрасли и ЖКХ, который подготовило ведомство, через 9 лет обеспеченность жильем в России должна достигнуть 33,8 м<sup>2</sup> на человека против сегодняшних 26,9 м<sup>2</sup> в большинстве регионов. На 2022 г. относительно предыдущего Правительством РФ прогнозируется рост потребления цемента на 5 %.

В связи с ростом спроса на цемент целесообразно модернизировать современное цементное производство в России в целях повышения энергоэффективности и снижения углеродного следа цементной промышленности, что позволит поддержать конкурентоспособность компании в рамках “зеленого развития” [2].

**2. ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПГ****2.1. Нормативно-правовая база в области климатического регулирования**

Очевидно, что проблема загрязнения атмосферы не в полной мере зависит от показателей цементного производства, однако на эту отрасль приходится около 7 % выбросов ПГ. Правительством РФ во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 "О сокращении выбросов парниковых газов" была предложена стратегия об устойчивом развитии до 2050 года [3, 4]. Стратегия описывает тенденции климатического регулирования, пути снижения энергоемкости экономики страны, и, соответственно, общего выброса парниковых газов, несмотря на развитие и расширение промышленности регионов, опираясь на уровень доиндустриального периода.

Высокая концентрация ПГ в атмосфере приводит к парниковому эффекту и, как следствие, к глобальному изменению климата. По данным Росгидромета, скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры составляет +0,49°C за десятилетие, также с 2020 года наблюдаются пиковые аномальные превышения температуры [5]. Это способствует увеличению количества лесных пожаров, засух, возгораний на объектах захоронения отходов.

В конце прошлого года вступил в силу Федеральный закон от 2.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» для регулируемых организаций, обязующий их вести соответствующую отчетность по ПГ с 2023 г. (инвентаризацию), предоставляющий право организациям реализовывать климатические проекты с выпуском углеродных единиц (УЕ), а также формирующий терминологическую базу (климатический проект, УЕ, реестр УЕ, кадастр парниковых газов и проч.) для обращения УЕ.

**2.2. Подходы к снижению ПГ в цементной отрасли**

Выбросы загрязняющих веществ в любой отрасли промышленности, непосредственно зависят от технологического процесса, используемого на производстве. Решая вопрос о снижении углеродного следа, нужно рассматривать не только методы производства, способы улавливания выбросов и мероприятия по вовлечению отходов в качестве вторичных энергетических и сырьевых ресурсов, но и особенности оборудования.

Классифицируем цементное производство, чтобы определить наиболее уязвимые элементы технологического процесса. По способу производства выделяют 3 типа:

- производство мокрым методом;
- производство комбинируемым методом;
- производство сухим методом.

Способы производства отличаются элементами технологического процесса, тем не менее могут быть переведены с одного на другой при определенных доработках.

В настоящее время основным методом повышения эколого-экономической эффективности работы

предприятий цементной отрасли является переход от мокрого способа производства на сухой. По опубликованным данным ассоциации Союза производителей сухих строительных смесей известно, что на данный момент клинкер производится на 32 печах сухого, 82 мокрого и 3 комбинированного способа производства. Это означает, что около 70% предприятий работают на более ресурсозатратном методе [6]. Тренд перехода от мокрого к сухому методу производства изображен на рис. 1 [7].

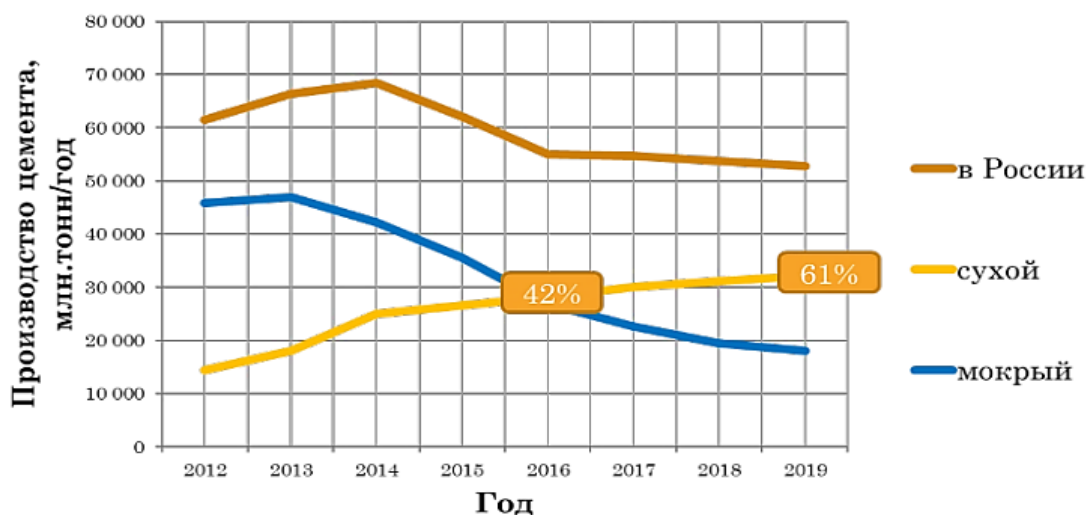


Рис. 1. Производство цемента в России с 2012 по 2019 года.

Производство цемента требует весьма значительных затрат электроэнергии и представляет собой множество стадий механической и высокотемпературной переработки сырья, которые сопровождаются выделением ПГ в атмосферу – в большей степени CO<sub>2</sub>. Выделяют два основных источника образования двуокси углерода: 1) при высокотемпературном разложении карбонатного сырья (кальцинации), которое происходит в процессе получения клинкера (примерно 55% всех выбросов ПГ); 2) при сушке природного сырья, а также в процессе сжигания топлива в цементной печи вместе с сырьевой смесью (примерно 40% всех выбросов ПГ).

В основе мокрого способа производства цемента - создания однородной густой массы измельченные горные породы с некоторым количеством воды – шлама, с последующем обжигом и помолом клинкера. В отличие от первого метода, сухой способ заключается в ином технологическом процессе: горные породы, дробятся в два этапа до состояния порошка и смешиваются с незначительным увлажнением в определённых соотношениях в мельнице перед финальным обжигом и измельчением.

Основными преимуществами сухого метода являются: снижение трудоемкости и затрат на подготовку клинкерной смеси; экономия топливных, сырьевых и водных ресурсов на 30 - 40 % за счет ликвидации мокрых процессов, как итог, снижение выбросов в атмосферу продуктов горения; повышение качества клинкера и цемента.

При применении мокрого способа производства портландцемента требуется в два раза больше топ-

лива, а тепло, образованное в результате его сжигания, расходуется не только на процесс образования клинкера, но и на испарение воды, а также выносится с отходящими газами в окружающую среду, образуя прямые тепловые потери.

Комбинированный способ производства цемента предусматривает сушку сырьевой смеси перед обжигом с применением обезвоживающих пресс-фильтров в целях экономии энергии.

С целью повышения экологичности и энергоэффективности предприятия по производству цемента сухим способом рассмотрим составляющие технологического процесса (рис. 2).

### 3. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

#### 3.1. Совершенствование элементов вращающейся печи

Основными выбросами в производстве цемента являются выбросы в атмосферный воздух из печной системы. При обжиге готовой смеси используются вращающиеся печи, 88 % которых в России работают на энергии сжигания природного газа. 50 % энергии приходится на химически преобразования внутри печи, и 40 % – продукты горения природного газа.

Сухой способ позволяет не только снизить объем образованных печных газов на 35-40 %, но и обеспечить возможность рекуперации тепла при помощи системы воздуховода (циклонного тепло-

обменника) для дальнейшего использования накопленного тепла для сушки сырья. При этом снижается энергоемкость при производстве клинкера.

Не менее важным преимуществом сухого способа является его совместимость с альтернативным сырьем и топливом. Для этого необходимо использовать многоканальные горелки с аксиальной и радиальной подачей газа для обеспечения завихрения потока.

Процесс обжига клинкера является высокотемпературным процессом, в результате которого образуются оксиды азота. Эти оксиды представляют собой одни из ключевых загрязняющих веществ, выбрасываемых в воздух цементными заводами. Они образуются в процессе обжига как в результате связывания азота топлива с кислородом в пламени, так и связыванием атмосферного азота и кислорода воздуха, подаваемого для горения. Они состоят из смеси NO (95%) и NO<sub>2</sub> (5%). Современные многоканальные горелки за счет создания развитой зоны рециркуляции внутри пламени обеспечивают снижение выделения оксидов азота NO<sub>x</sub>.

Схема обжиговой печи при сухом способе производства имеет выносной декарбонизатор. При такой схеме зона интенсивного теплообмена (до 60% тепла) выносится в суспензионный теплообменник, где происходит разложение карбонатного сырья. В декарбонизаторе теплообмен происходит гораздо быстрее, чем в барабане печи. Таким образом возможно уменьшить размера печи за счет уменьшения количества опор, а также заметно увеличить ее производительность (до 12 тыс. т клинкера в сутки).

Третичный воздухопровод в устройстве печи сухого способа выполняет роль рекуператора тепла, который отводит горячий воздух из головки печи в декарбонизатор, минуя обжиговую печь.

Изображенные на рис. 2 элементы обжиговой системы печи (барабанная печь с декарбонизатором, третичным воздухопроводом и многоканальными горелками) составляют самую эффективную с точки зрения снижения энергоемкости и выбросов CO<sub>2</sub> технологическую схему обжига цемента сухим способом.

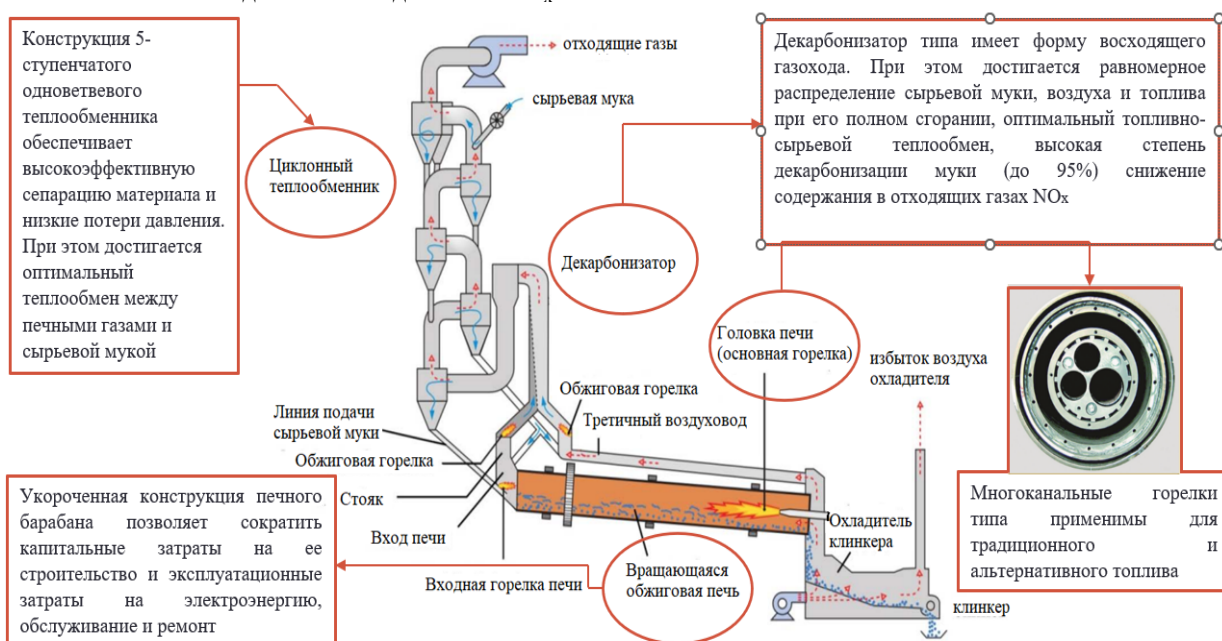


Рис. 2. Технологическая схема цементного производства, осуществляющее работу на основе сухого метода.

### 3.2. Оценка эффективности перевода цементного завода на сухой способ

Для оценки эффективности перехода цементного завода на сухой способ производства был проведен расчет эколого-экономических показателей для предприятия, расположенного в Московской области и имеющего следующие технологические характеристики: производство клинкера – 270272 т/год и, соответственно, 328000 т/год.

Оценка сокращения выбросов CO<sub>2</sub> при переводе цементного завода на сухой способ проводилась на основе методики МГЭИК только в пределах прямых (технологических) выбросов и связанных с потреблением электроэнергии (уровни 1 и 2), поскольку прочие косвенные выбросы достаточно сложно оценить, что связано с их незначительным количе-

ством и трудоемкостью отслеживания цепочек поставок готового продукта (цемента) поставщикам.

Для оценки выбросов существующей линии на основе Методики МГЭИК суммировали выбросы в результате обжига (декарбонизации), выбросы в результате обжига (декарбонизации), выбросы, связанные с наращиваемым производством цемента на других заводах за год (в единицах CO<sub>2</sub> – эквивалента).

Каждая составляющая рассчитывалась как произведение количества полученного клинкера, потребленного топлива или электричества на соответствующий коэффициент.

Коэффициент выбросов для наращиваемой мощности рассчитывался исходя из того, какие в относительной близости находятся существующие

или новые предприятия, являющиеся потенциальными наращиваемыми мощностями (предлагается рассматривать цементные заводы, находящиеся в зоне радиусом 1000 км от производственной площадки рассматриваемого цементного завода). Данное решение основано на предположении о том, что цемент, учитывая ощутимые затраты на его транспортировку, не перевозится на большие расстояния. Среднее расстояние доставки цемента в России составляет порядка 500 км. Следовательно, прирост мощности рассматриваемого цементного завода, переведенного на сухой способ, может быть полностью покрыт другими предприятиями, усредненный коэффициент выбросов которых также рассчитывался.

Выбросы CO<sub>2</sub> для технологической линии сухого способа производства в результате модернизации рассчитывался аналогичным образом.

Степень сокращения CO<sub>2</sub> в результате перехода производства на сухой способ определялась разностью между выбросами существующей и новой модернизированной линии и составила 15 %.

Модернизация завода позволит снизить удельные затраты на электроэнергию на 17 % и на топливо - на 44 %.

Нами был рассчитан предотвращенный экологический ущерб. В качестве удельного экологического ущерба было предложено использовать стоимость одной квоты на эмиссию одной тонны диоксида углерода на мировом рынке в рублях, поскольку стоимость квот тесно связана с климатической обстановкой на планете с учетом регулирования рыночными механизмами. По состоянию на 1 февраля 2022 г. общемировая цена одной квоты составила 2 доллара, что по усредненному курсу доллара к рублю в соответствии с прогнозами Минэкономразвития РФ составляет 153,4 рубля за 1 тонну CO<sub>2</sub>-экв.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Производство цемента оказывает сильное влияние на развитие экономического потенциала страны.

Существует глобальная тенденция, характеризующаяся переходом с мокрого способа производства на сухой, поскольку последний требует в два раза меньше топлива при обжиге клинкера в печи, а также обладает более высоким объемом получаемого клинкера на квадратный метр печного агрегата.

Несмотря на преимущества современного сухого способа производства цемента, в России по-прежнему высока доля производства по энергоемкому и высокзатратному мокрому способу (44,5% цемента в России было выпущено мокрым способом за 2020 год [6]).

Российская цементная промышленность требует серьезной технологической модернизации, направленной на повышение эффективности по выпуску готовой продукции и уменьшение себестоимости получаемого цемента в условиях сложившейся экономической обстановки.

Расчет проекта модернизации цементного завода показал соответствие критериям устойчивого (в том числе зеленого) роста. А именно: не превышение порогового значения углеродоемкости производства портландцементного клинкера 0,766 т CO<sub>2</sub>-экв./т клинкера и составляет 0,748 т CO<sub>2</sub>-экв./т клинкера; не превышение порогового значения углеродоемкости производства портландцемента 0,92 т CO<sub>2</sub>-экв./т цемента и составляет 0,618 т CO<sub>2</sub>-экв./т цемента.

Мероприятия по снижению углеродного следа цементной промышленности позволяют также повысить показатели энергоэффективности и ресурсосбережения производства.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЯ

ЖКХ – аббревиатура жилищного коммунального хозяйства;  
РФ – Российская Федерация;  
УЕ – углеродные единицы;  
МГЭИК – межправительственная группа экспертов по изменению климата;  
ПГ – парниковые газы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Итоги 2021 года.** Производство цемента в Российской Федерации. Beton.ru. Дата публикации: 23.02.2022. [Электронный ресурс] / URL: <https://beton.ru/news/detail.php?ID=445057> (дата обращения 12.06.2022).
2. **Постановление Правительства РФ** от 21 сентября 2021 года № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации».
3. **Распоряжение правительства** от 29 октября 2021 года № 3052-р «О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года».
4. **Указ Президента Российской Федерации** от 4 ноября 2020 г. № 666 "О сокращении выбросов парниковых газов".
5. **Росгидромет** опубликовал доклад об особенностях климата в России в 2021 году. Дата публикации: 24.03.2022. [Электронный ресурс] / URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/27472> (дата обращения 12.06.2022).
6. **Василик Г.Ю., Еремина Е.М.** Цементная промышленность России в 2020 году// Цемент и его применение. 2020, № 6.
7. **Силенок А.Р. Ветрова О.Б.** Современное состояние и текущие тенденции развития цементной промышленности России // Успехи в химии и химической технологии. Том XXXIV. 2020, №12.

*Е.Г. Гашио<sup>1</sup>, С.В. Гужов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ - ОСНОВА РЕГИОНАЛЬНЫХ/ГОРОДСКИХ ПЛАНОВ И ПРОГРАММ КЛИМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлены предпосылки и взаимосвязи развития крупных городов и негативных экологических явлений. Показан комплекс изменений в основных энергоёмких секторах экономики Российской Федерации. Приведены составляющие термина «климатическая адаптация» и показаны задачи комплексной климатической политики. Рассмотрены ключевые факторы изменений, определяющих климатическую адаптацию энергетического комплекса в современных условиях. Приведено сопоставление комплекса мер и приоритетов по разным этапам климатической политики Москвы. Предложены механизмы сопряжения энергосбережения и промышленного развития, принципы формирования гибридных энергетических систем и комплексов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Активное развитие городов и агломераций на планете зачастую приводит к негативным экологическим последствиям. Города хотя и защищают жителей от негативных климатических влияний, но при этом являются и источниками сопутствующих последствий урбанизации: чрезмерной концентрации строений, бесконтрольной автомобилизации, загрязнения атмосферы и водоемов и др. Исторически многие города создавались в первую очередь для защиты людей от внешних врагов или суровой природы. Поэтому российские города, расположенные в холодном климате, изначально более приспособлены к климатическим изменениям в силу наличия более мощных и разветвленных систем жизнеобеспечения [1].

В последнее время изменилась внешняя среды, климатические параметры, меняется структура нагрузки, внутренние условия взаимодействия между игроками. Потребители стали более требовательными к параметрам поставляемой энергии, изменились условия расчетов и взаимодействия. В условиях растущей сложности и лавинообразных перемен не может быть простых односложных решений – энергосистемам городов и регионов нужны новые оптимумы, новая идеология и новые решения.

Рассмотрим кратко ключевые аспекты изменений в основных энергоёмких секторах экономики РФ: ТЭК (электроэнергетике), промышленности, теплоснабжении и распределённой генерации.

### **2. КЛЮЧЕВЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЙ**

Главный факт - общий рост потребления ТЭР в РФ за истекшие 15 лет с 950 до 1340 млн. тунт. Удельный расход также вырос на 30% - с 6,5 до 8,5 тунт/чел.

Ключевые изменения в ТЭК - рост доли (ГЭС+АЭС) до 40% Снижение доли ТЭЦ, КИУМ, ресурса ТЭС. «Неуспех» модернизации ТЭС на условиях ДПМ (договоров о поставке мощности).

Промышленный комплекс – общий рост производства, снижение энергоёмкости всех отраслей промышленности (кроме нефте- и газодобычи). Продолжается использование ВЭР, рост глубины переработки сырья. Собственная генерация предприятий выросла до 7-8 ГВт.

При росте жилого и нежилого фонда в РФ за 15 лет на 1,25 млрд м<sup>2</sup> видим незначительное сокращение производства тепла в централизованных системах теплоснабжения на фоне роста потребления энергии населением на 44%.

Идет неконтролируемый рост АИТ в городах разного размера. Продолжается рост мощностей малой, распределённой энергетики (~15 ГВт), мощностей НВИЭ – до 1,3 ГВт, микрогенерации (до 0,45 ГВт).

Итак, помимо общего и удельного роста потребления энергии в РФ практически на 30%, мы видим взаимосвязанные изменения – снижение энергоёмкости и рост энергетической эффективности, рост мощностей распределённой генерации и автономных источников тепла.

Повышение энергетической и экологической эффективности промышленности и энергетического комплекса городов является важной предпосылкой климатической адаптации – как в части адаптации самой энергетики, так и в плане устойчивости ее функционирования при определенных климатических катаклизмах.

Что мы на сегодняшний день вкладываем в понятие «климатической адаптации»:

- повышение энергетической и экологической эффективности производства;
- повышение надежности и устойчивости функционирования энерготехнологических комплексов;
- рост адаптивности (снижение уязвимости) элементов и энергосистем в целом.

### **3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ**

## ЭФФЕКТИВНОСТИ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ МОСКВЫ

Москва – один из немногих городов (субъектов Федерации) достаточно успешно движется по пути роста энергетической и экологической эффективности в сопряжении с комплексом мер по климатической адаптации [2]. Город прошел значительный путь повышения энергетической и экологической эффективности энергетики, транспортного комплекса.

На первом этапе ставилась задача сокращения потерь энергоресурсов, повышения энергетической эффективности и адаптивности всей системы: энергоисточников, сетей транспорта тепловой и электрической энергии, потребителей разного типа и назначения. Несмотря на кризисные явления 2008-2009 годов, практически все мероприятия были реализованы в течение прошедшего десятилетия.

Факт снижения уязвимости инфраструктурных отраслей экономики города – не данность, а результат кропотливой работы специалистов, инженеров, городских структур по наведению порядка после экстремальных событий 2005, 2006, 2010 гг. За истекший период резко снизилась аварийность. На следующем этапе развития российская столица ставит комплекс взаимоувязанных задач комплексной климатической политики более высокого уровня.

В этой связи можно выделить три крупных этапа климатической политики Москвы.

### Первичный этап 2011 – 2019 гг.

Ключевая проблематика этапа: Дефицит электрических мощностей. Уязвимость к климатическим явлениям (ледяные дожди). Дефициты тепловых мощностей по некоторым районам города. Невозможность (затруднения) присоединения крупных потребителей. Высокая доля электроотопления объектов торговли и др. Значительный рост пиковой электрической мощности при низких температурах наружного воздуха.

Комплекс мероприятий: Установка ПГУ (~26% от суммарной мощности ТЭЦ), переключение тепловой нагрузки с незагруженных котельных на ТЭЦ, перекладки теплосетей, реконструкция тепловых пунктов, и центров питания, капитальные ремонты жилых (общественных) зданий, установка счетчиков, пропаганда энерго- и ресурсосбережения. Закрытие части ведомственных устаревших, домовых котельных. Частичный перевод ЛЭП на 20 Кв, переход ЛЭП на подземное исполнение.

Эффекты/затраты этапа: Снижение суммарного расхода топлива на 12% %, вредных выбросов на 26 %, парниковых газов на 16% %. За счет реализации самых крупных резервов энергосбережения оказалось возможным подключить ~75 млн. кв. м недвижимости без роста тепло- и топливотребления. Снижение ущербов от климатических изменений.

### Современный этап 2020 – 2025 гг.

Ключевая проблематика этапа: Рост экологического давления на природу Москвы. Значительная

доля офисных комплексов и бизнеса в потреблении электроэнергии и мощности. Планирование новых источников «от достигнутого», без учета новых технологий, энергосбережения и НДТ. Рост абсолютной влажности и переходов через 0°C. Сложности с подключением новых потребителей в Ти-НАО. Строительство незагруженных ТЭЦ и крупных котельных в новой Москве.

Комплекс мероприятий: Закрытие мелких ведомственных котельных с передачей нагрузкой на современные источники тепла, и запрет на строительство новых котельных. Поэтапный переход к сухим градирням на ТЭЦ, оптимизация собственных нужд источников. Установка конденсационных котлов на ТЭЦ и крупных котельных. Утилизация избытков тепла метрополитена. Реализация резервов «зеленого строительства» на объектах бизнеса и общественной застройки.

Эффекты/затраты этапа: Недопущение роста расхода топлива ТЭК при росте экономики и застройки. Сокращение теплового загрязнения города и эмиссии водяного пара. Снижение пиков электрической мощности при экстремально высоких/низких температурах наружного воздуха

### Этап 2025 – 2035 гг.

Ключевая проблематика этапа: Рост техногенного давления на природу Москвы. Ужесточение норм экологического регулирования и перехода на НДТ предприятий I и II категории. Климатические ограничения и внедрение «углеродного» регулирования.

Комплекс мероприятий: Использование вторичных энергоресурсов городских объектов для теплохладоснабжения. Развитие элементов и систем централизованного хладоснабжения крупных потребителей. Установка топливных элементов, систем связанного аккумулирования тепловой/ электрической мощности на ТЭЦ.

Эффекты/затраты этапа: Повышение энергоэкологической эффективности и степени климатической адаптации экономики г. Москвы. Снижение эмиссии парниковых газов на 25 %.

Как видно из представленной выше проблематики и соответствующих механизмов ее решения, невозможно сразу перескочить с нуля на второй или третий этап. Поэтапность, комплексность и последовательность являются ключевыми параметрами и предпосылками успешности работы в городах/регионах. Для крупных регионов, кроме того, необходимо учитывать солидные пространственные объемы сельхозугодий, лесопользования и др. При этом высокая энергоэкологическая («углеродная») эффективность энергокомплекса страны в целом является важной предпосылкой региональных планов и программ [3], но не отменяет комплекса мер для каждого региона/макрорегиона страны.

## 3. ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАНОВ И ПРОГРАММ АДАПТАЦИИ

Задачи климатической адаптации мегаполисов и регионов РФ можно представить более системно:



1. Анализ изменений в российской нормативно-правовой базе, регулирующей климатические изменения и оценка ее полноты и достаточности для осуществления климатической трансформации основных систем жизнеобеспечения городов/регионов.
2. Формирование предложений по совершенствованию системы природоохранных нормативно-правовых актов для преодоления барьеров для климатической трансформации.
3. Выявление ключевых проблем климатической адаптации мегаполисов и наиболее уязвимых систем жизнеобеспечения городов/регионов.
4. Обзор и анализ мирового опыта в области мероприятий по адаптации к климатическим изменениям.
5. Оценка эффективности комплекса мер по адаптации к климатическим изменениям основных систем жизнеобеспечения городов.
6. Анализ существующих прогнозных климатических моделей и разработка прогноза климатических изменений в городах до 2050 года.
7. Разработка и научное обоснование плана обеспечения климатической трансформации городов до 2030 года.

Уровень зрелости климатической и энергетической политики, степень развития и применения различных «продвинутых» механизмов устойчивого и сбалансированного энергетического развития определяется целым комплексом факторов [4].

Однако достигнутые результаты не являются окончательными. Обоснованные в статье резервы позволяют говорить о постановке последующих задач формирования региональных и городских планов и программ климатической адаптации, которые могут быть объединены в следующие этапы.

**1 этап:** Анализ нормативно-правовой базы в области снижения выбросов парниковых газов и регулирования климатических изменений, разработка предложений по её совершенствованию.

**2 этап:** Оценка рисков и ущербов от климатических изменений ключевым секторам экономики городов.

**3 этап:** Анализ мирового опыта в области адаптации к климатическим изменениям и оценка эффективности применяемого в настоящее время комплекса мер по адаптации к климатическим изменениям основных систем жизнеобеспечения городов.

**4 этап:** Разработка прогноза климатических изменений в городах до 2050 года.

**5 этап:** Разработка плана обеспечения климатической трансформации городов до 2030 года.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приоритеты климатической стратегии Москвы сформулированы как энергоресурсосбережение, развитие транспортной инфраструктуры, реновация жилого фонда, активная модернизация всех элементов «зеленого каркаса», становление и развитие новых отраслей адаптации. На следующем этапе необходима пространственная адаптация, выража-

ющаяся в управлении альbedo поверхности, развитии зеленой инфраструктуры, установке элементов новой урбанистики, сбалансированном освоении промышленных зон и реновации жилых массивов.

Сейчас опасность бесконтрольной урбанизации и интенсивной автомобилизации столицы существенно снижена, но остается задача сбалансированности темпов строительства недвижимости, инфраструктуры, биосферы в целом. Подобная сбалансированность техносферы и биосферы является как главным приоритетом климатической адаптации, так и новым ресурсом, и резервом качественного роста и рывка московского мегаполиса в экономике XXI века.

Для разных городов и регионов, прошедших разнородный и разноплановый путь по пути климатической трансформации необходимо выявление собственных приоритетов и на их основе движение по общему алгоритму взаимосвязанных действий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шерстюков Б.Г.** Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск.: Изд-во ВНИИГМИ-МЦД, 2008, 302 с.
2. **Гашо Е.Г.** Энергетическая и климатическая политика Москвы: поиск разумного симбиоза // Энергосбережение. 2018. №2. С.4-10.
3. **Белобородов С. С.** Снижение эмиссии CO<sub>2</sub>: развитие когенерации или строительство ВИЭ? // Энергосовет. 2018. №1(51). [Электрон. ресурс] [http://www.energosoвет.ru/bul\\_stat.php?idd=687](http://www.energosoвет.ru/bul_stat.php?idd=687) (дата обращения 26.06.2022).
4. **Алгоритм** формирования региональных программ энергосбережения. IFC. 2010 г. [Электрон. ресурс] <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/01445192-e741-4552-8083-c0096f337fbb/PublicationRussiaEnergySavingProgramDevelopment2010-RU.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jO07v5i>. (дата обращения 26.06.2022).

#### Список сокращений

**АИТ** – автономный источник тепла;  
**АЭС** – атомная электростанция;  
**НВИЭ** – нетрадиционные и возобновляемые энергосистемы;  
**ДПМ** – договоры поставки мощности;  
**КИУМ** – коэффициент использования установленной мощности;  
**ЛЭП** – линии электропередач;  
**НДТ** - наилучшие доступные технологии;  
**ПГУ** – парогазовые установки;  
**ТЭЦ** – теплоэлектроцентраль;  
**ТЭР** – топливно-энергетические ресурсы;  
**ТЭС** – тепловые электрические станции;

*Ю.А. Таран, В.М. Фуфаева, Н.Д. Разина*

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

## **ЭНЕРГО- И РЕСУРСΟΣБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

В работе описаны исследования по получению карбамида пролонгированного действия с оболочкой на основе серы на тарельчатом грануляторе. Оценено влияние различных параметров на достигаемый пролонгированный эффект: влияние температуры расплава покрытия и слоя гранул, влияние дисперсности состава и толщины покрытия. Достигаемый полученный пролонгированный эффект подтвержден с помощью определения скорости высвобождения удобрения при использовании рефрактометрического метода анализа и построения соответствующих кривых растворимости.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Интенсивный прирост населения планеты, а как следствие увеличение потребности в продуктах питания, требуют прогрессивного развития агрохимической отрасли промышленности в области производства удобрений для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и поддержания плодородия пахотных земель.

Карбамид – минеральное азотосодержащее (46,5% азота) удобрение – является одним из лучших для повышения урожайности и устойчивости к болезням растений. В промышленности его получают в виде гранул и прилл методами окатывания и приллирования соответственно.

Данный вид удобрения признан одним из самых эффективных в мире. Однако карбамид быстро растворяется в почве, не полностью усваивается культурами, вымывается и улетучивается, что ведет к большим потерям азота в окружающую среду и представляет собой серьезный источник загрязнения природы [1]. Помимо новых экологических норм для сохранения экосистемы нашей страны, вводят более жесткие меры со стороны стран-импортёров карбамида для поддержания экологии своих стран. В странах Европы обратили внимание, что около 20% выбросов аммиака на их территории в секторе сельского хозяйства высвобождается из минеральных удобрений. Поэтому карбамид, являясь основным товаром международного рынка минеральных удобрений, должен соответствовать нормам большинства импортеров и требуемому качеству для обеспечения конкурентоспособности.

Одним из путей решения данных проблем является создание удобрений пролонгированного действия, которые включают в себя ядро на основе карбамида и оболочку, которая плохо или совсем не растворяется в воде. Вода через образующиеся в

оболочке поры диффундирует внутрь капсулы, постепенно растворяет ядро, а образующий раствор карбамида выделяется в почву.

Производство удобрений пролонгированного действия является энерго- и ресурсосберегающей технологией. Их применение приводит к снижению затрат на хранение и транспортировку удобрений, так как для таких удобрений сокращаются нормы внесения в почву благодаря рациональному питанию растений, и как следствие, производственные мощности могут быть снижены. Это, в свою очередь, приводит к сокращению энерго-, ресурс- и трудозатрат на производство таких удобрений.

При использовании удобрений пролонгированного действия снижается ущерб, наносимый окружающей среде. Благодаря постепенному выделению азота в почву, он более полно потребляется сельскохозяйственными культурами, при этом сокращаются выбросы азота в почву и атмосферу, за счет чего уменьшаются риски возникновения экологических проблем, возникающих из-за избытка азота: заболачивания водоемов, эрозии почв, образования кислотных дождей и даже разрушения озонового слоя.

В данной работе нами был получен и исследован капсулированный карбамид с оболочкой на основе серы. Рассматриваемые в работе покрытия обеспечивают пролонгированный эффект и помогают предотвратить попадание в почву избыточно высоких доз удобрения и в результате избежать неблагоприятного воздействия на экосистему.

Чистая сера редко используется как индивидуальное удобрение, ввиду сложности внесения, несмотря на то, что она усваиваемая растениями и необходима для процессов жизнедеятельности растений. Использование ее в производстве комплексных удобрений вызывает большой интерес на практике. Возможность получения удобрений с оболочкой на основе серы уже была изучена авторами работ [2, 3].

Оболочка из чистой серы способна обеспечить достаточно длительный пролонгированный эффект удобрения. Стоимость серы достаточно низкая и карбамид с контролируемым высвобождением азота с экологической и экономической точки зрения может успешно заменить традиционные минеральные удобрения. При его внесении будет происходить постепенное выделение питательных элементов в почву, за счет чего они более рационально используются растениями, их потери сокращаются, а также не происходит загрязнения окружающей среды.

Очевидно, что цена на такие новые виды удобрений будет ощутимо выше, чем на традиционные, но данная технология окупаема за счет снижения норм внесения удобрения в следствии сокращения потерь питательных веществ (одно внесение вместо трех для традиционных удобрений). Такой комплексный подход к питанию растений делает карбамид выгодным и эффективным видом азотного удобрения в агрохимическом секторе, а производство капсулированных удобрений энерго- и ресурсосберегающей технологией.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения удобрения пролонгированного действия использовали карбамид марки Б гранулированный изготовителя ООО «ТПК «НОВ-АГРО» и серу молотую (СТО 46484954-0021-2011, производитель АО «База №1 Химреактивов»).

Для получения карбамида с оболочкой на основе серы использовали тарельчатый гранулятор. Физическая сущность процесса получения оболочек на гранулах заключается в распылении расплавов на основе серы на гранулы карбамида, перемещающиеся по поверхности вращающейся тарелки (диаметр 300 мм). Схема установки представлена на рис. 1. Стоит отметить, что в зависимости от вязкости оболочки варьируют угол наклона и частоту вращения тарелки. Расплав покрытия II подавался на форсунку 4, где поддерживалась постоянная температура (150°C). Покрытие наносилось на поверхность гранулированного карбамида I, вращающегося на тарелке 1, равномерным слоем за счет постоянного перемещения гранул по тарелке. Изменение угла наклона осуществлялось механизмом 3, а скорость вращения тарелки изменялась регулированием количества оборотов мотора 2. Расплав покрытия II подавался на форсунку 4, где поддерживалась постоянная температура (150°C). Покрытие наносилось на поверхность гранулированного карбамида I, вращающегося на тарелке 1, равномерным слоем за счет постоянного перемещения гранул по тарелке. Изменение угла наклона осуществлялось механизмом 3, а скорость вращения тарелки изменялась регулированием количества оборотов мотора 2. Параметры опытов следующие: угол наклона тарелки 30-40°, скорость вращения 30 об/мин. Дополнительно над тарелкой установлена тепловая пушка 8 для поддержания температуры слоя гранул на тарелке 50-60°C для более равномерного застывания покрытия.

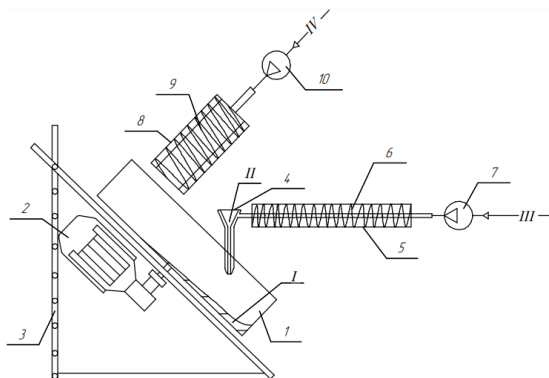


Рис. 1. Схема установки по получению капсулированных гранул карбамида пролонгированного действия: 1 – тарельчатый гранулятор; 2 – червячный мотор-редуктор; 3 – устройство регулировки угла наклона гранулятора; 4 – диспергирующее устройство; 5 – воздуховод с кожухом; 6, 9 – ТЭНы; 7, 10 – компрессор; 8 – тепловая пушка.

I – сырье, II – расплав покрытия, III, IV – воздух.

Для доказательства наличия пролонгированного действия у капсулированных гранул снимались кривые растворения. Методика проведения эксперимента описана в работах [4, 5]. Также для контроля качества покрытия гранул исследовалась структура их поверхности.

В рамках исследования динамики высвобождения питательных компонентов из капсулированной гранулы карбамида был проведен ряд опытов. Навеску гранул (5 г) помещали в колбу с дистиллированной водой (100 мл) и определяли показатель преломления раствора через заданные промежутки времени. В работе использовался рефрактометр ИРФ-454Б2М. Предварительно прибор проходит юстировку по дистиллированной воде при 20°C (показатель преломления 1,3330 чистой дистиллированной воды без следов карбамида).

Градуировочный график для определения массы растворившегося в дистиллированной воде карбамида представлен на рис. 2.

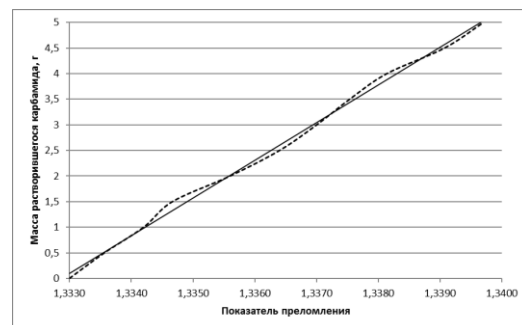


Рис. 2. Зависимость показателя преломления раствора от массы растворившегося карбамида при 20°C.

Из графика, полученного интерполяцией экспериментальных данных, очевидно, что показатель преломления имеет линейную зависимость от концентрации, что соответствует справочным данным.

Далее долю растворившегося карбамида определяли по формуле:

$$\text{Доля} = \frac{m_{p.k.}}{m_n - m_n \cdot x}$$

где  $m_{p.k.}$  – масса растворившегося карбамида,  $m_n$  – масса навески получившегося продукта,  $x$  – массовая доля покрытия.

Для оценки внешней структуры оболочки использовался микроскопический метод исследования на микроскопе МБС-9. Помимо увеличительной функции стандартных окуляров оборудования, за счет специального окуляра с сеткой и шкалой измерения, на нем проводилось измерение толщины получаемой оболочки гранул.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 3.1. Влияние температуры

Температура расплава 150-155°C определена как рекомендуемая в силу наличия минимума вязкости в данном диапазоне.

Исходя из кинетики кристаллизации серы на поверхности гранулы было опробовано ведение про-

цесса при резком и постепенном охлаждении, поэтому появился второй температурный параметр – температура слоя гранул на тарелке. В оболочке, образованной расплавом, температура которого при диспергировании составляла 150-155°C, с температурой на тарелке менее 45°C, возникала большая разность между температурой плава и слоя ( $\Delta t$ ). Поэтому при такой высокой движущей силе процесса происходила быстрая кристаллизация (высокая скорость зарождения кристаллов) и резкое изменение плотности в твёрдом состоянии, что приводило к усадке оболочки и образованию больших трещин. Также на рис. 4 видно, что образуется большое количество центров кристаллизации на поверхности, при этом их протяжённость размеры кристаллов не большие. Это связано с высокой скоростью зарождения кристаллов и с небольшой скоростью их роста. Такая структура приводит к физико-механической неустойчивости продукта, повышая пылимость и истираемость. Та же самая тенденция наблюдалась при нанесении покрытия на гранулы.



Рис. 4. Структура поверхности серы при большом значении  $\Delta t$ .

При менее резких перепадах температуры наблюдается обратная тенденция. Если провести достаточный нагрев слоя, то происходит медленное постепенное застывание серы, а такое ведение процесса позволяет получить сглаженную поверхность, имеющую меньшее количество и размер пор (рис. 5).



Рис. 5. Структура поверхности серы при меньшем значении  $\Delta t$ .

Более наглядно описывают влияние температуры кривые растворимости карбамида, капсулированного серой (рис. 6). Как видно из графиков зависимости доли растворившегося карбамида от времени чем меньше  $\Delta t$  тем больше время высвобождения из капсул и, следовательно, лучше достигаемый пролонгированный эффект.

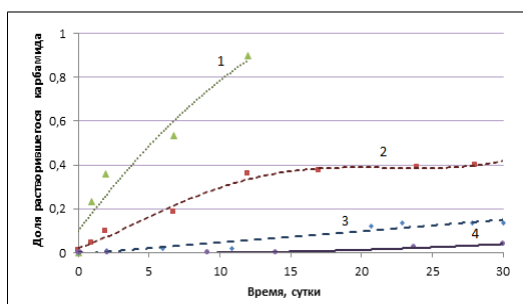


Рис. 6. Влияние температуры слоя гранул на тарелке на скорость их растворения ( $t_{\text{расплава}}=150^\circ\text{C}$ , 43% покрытия,  $d_{\text{гранул}}=4-5$  мм): 1 –  $t_{\text{слоя}}=20-25^\circ\text{C}$ , 2 –  $t_{\text{слоя}}=30-35^\circ\text{C}$ , 3 –  $t_{\text{слоя}}=45-50^\circ\text{C}$ , 4 –  $t_{\text{слоя}}=60-65^\circ\text{C}$ .

### 3.2. Влияние дисперсности карбамида

Толщина оболочки капсулированной гранулы зависит от массовой доли покрытия и удельной поверхности гранул, которая в свою очередь определяется диаметром гранул удо

рения. Чем больше диаметр гранул карбамида, используемого для капсулирования, тем толще образующееся покрытие, и, соответственно, более выражен пролонгированный эффект. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные, полученные при капсулировании карбамида разного гранулометрического состава. Кривые растворимости представлены на рис. 7. Как видно из зависимостей чем больше диаметр гранул, тем более длительный достигаемый пролонгированный эффект. Также стоит отметить, что чем более монодисперсный состав карбамида, тем лучше пролонгированный эффект.

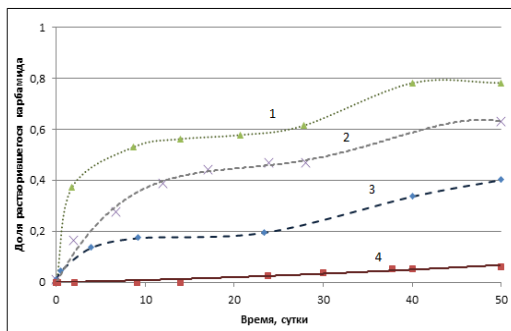


Рис. 7. Влияние диаметра гранул и однородности гранулометрического состава на растворимость ( $t_{\text{расплава}}=150^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{слоя}}=55-60^\circ\text{C}$ , 43% покрытия): 1 – полидисперсный состав  $d_{\text{гранул}}=2-5$  мм, 2 –  $d_{\text{гранул}}=2-3$  мм, 3 –  $d_{\text{гранул}}=3-4$  мм, 4 –  $d_{\text{гранул}}=4-5$  мм.

### 3.4. Влияние толщины покрытия

Очевидно, что увеличение толщины оболочки должно оказывать положительный эффект и увеличивать срок пролонгации. Серия опытов с постепенным увеличением расхода покрытия подтверждает это предположение. На рис. 8 представлены кривые растворимости капсулированного серой карбамида с вариацией доли покрытия.

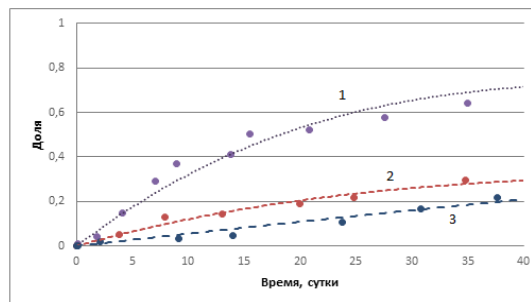


Рис. 8. Влияние толщины покрытия на растворимость гранул карбамида. ( $t_{\text{расплава}}=150^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{слоя}}=55-60^\circ\text{C}$ ,  $d_{\text{гранул}}=4-5$  мм): 1 – 40% покрытия, 2 – 45% покрытия, 3 – 50% покрытия.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описано влияние параметров капсулирования карбамида оболочками на основе серы.

При большей разницы температуры расплава покрытия и слоя гранул наблюдается образование мелкокристаллической структуры покрытия, что уменьшает пролонгированный эффект. Обратная тенденция наблюдается при проведении капсулирования с меньшей разницы температуры.

Применение более мелкодисперсной и крупной фракции исходного карбамида оказывает положительный эффект и увеличивает время высвобождения питательных элементов.

Повышение толщины покрытия увеличивает пролонгированный эффект, но зависимость срока высвобождения питательных элементов от толщины слоя покрытия не линейна.

Все вышесказанные выводы подтверждены опытами по растворению и представлены в виде кривых растворимости в данной статье.

Предложенная технология капсулирования азотосодержащего удобрения является энерго- и ресурсосберегающей, поскольку позволяет сократить энерго- и ресурсозатраты на производство, транспортировку и хранение таких удобрений за счет снижения норм их внесения в почву и уменьшения сопутствующих потерь. Рациональное потребление сельскохозяйственными культурами азота из удобрений пролонгированного действия снижает выбросы азота в почву и атмосферу, что сокращает отрицательное влияние избытка азота на окружающую среду и положительно скажется на экологической ситуации в стране в целом.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭН — трубчатый электронагреватель;  
 $d_{\text{гранул}}$  — диаметр гранул, мм;

$m_n$  — масса навески получившегося продукта;

$m_{\text{р.к.}}$  — масса растворившегося карбамида;

$t_{\text{расплава}}$  — температура расплава покрытия;

$t_{\text{слоя}}$  — температура слоя гранул;

$x$  — массовая доля покрытия;

$\Delta t$  — разность между температурой расплава покрытия и слоя гранул;

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ahmed M., Rauf M., Mukhtar Z., Saeed N.A.** Excessive use of nitrogenous fertilizers: an unawareness causing serious threats to environment and human health // *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. V. 24(35). P. 26983-26987.
2. **Ransom C.J., Jolley V.D., Blair T.A., Sutton L.E., Hopkins B.G.** Nitrogen release rates from slow- and controlled-release fertilizers influenced by placement and temperature // *PLOS ONE*. 2020. V. 15(6). P. e0234544.
3. **Ghafoor I., Habib-ur-Rahman M., Ali M., Afzal M., Ahmed W., Gaiser T., Ghaffar A.** Slow-release nitrogen fertilizers enhance growth, yield, NUE in wheat crop and reduce nitrogen losses under an arid environment // *Environmental science and pollution research*. 2021. V. 28 (32). P. 43528-43543.
4. **Фуфаева В.М., Разин С.А.** Методики определения скорости высвобождения питательных веществ из гранулы CRF-удобрения // *СНК-2021. Материалы LXXI открытой международной студенческой научной конференции Московского Политеха*. Москва, 2021. С. 561-565.
5. **Таран Ю.А., Фуфаева В.М., Разин С.А.** Повышение эффективности применения минеральных удобрений методом капсулирования с целью достижения пролонгированного действия // *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2021")*. Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума, посвященного 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Международного Косыгинского форума "Современные задачи инженерных наук". Москва, 2021. С. 300-302.







ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ  
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

---

**ТРУДЫ**  
*одинадцатой  
всероссийской  
конференции с  
международным  
участием*

Секция 9

*Актуальные философские вопросы  
снижения потребления ресурсов*

Л.Ю. Пионткевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Россия

## ЭТИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ (К ВОПРОСУ О МОРАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ)

### АННОТАЦИЯ

В статье предпринята попытка раскрыть содержание основных составляющих морального сознания, способствующих развитию экологического мышления вне власти антропоцентрического дискурса, циркулирующего в социальном пространстве. Продуктивность данного анализа позволит запустить индивидуальные этические программы, направленные как на экономию энергоресурсов, так и на сохранение и восстановление природных ресурсов в целом.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема экономии энергоресурсов на уровне обыденной жизни решается весьма тривиальным способом: меньше расходуете – меньше платите. С чисто экономическими причинами в конечном итоге связывается и необходимость экономного потребления энергоресурсов на предприятиях промышленности, в учреждениях, различного рода объединениях и структурах. Эффективное (нерасточительное) использование средств производства, и, в частности, энергии, непосредственно сказывается на их экономическом благополучии и процветании. Однако есть еще один очень важный мотив, вызывающий к экономии – это экологические последствия человеческой деятельности, точнее возможность ее катастрофических последствий. Ученые установили, что сложившееся за миллиарды лет подвижное равновесие в окружающей среде может необратимо нарушиться. И связано это с тем, что возникшее в эпоху промышленной революции машинное производство добавило к природным энергетическим факторам (солнечной радиации, гравитационным и тектоническим силам, биогенной и химической энергии) энергию мирового производства, мощности которого имеют тенденцию удваиваться через каждые 14-15 лет. Это воздействие настолько сильное, что природа не успевает восстанавливаться, и если не предпринять необходимые меры, и не снизить энергетическую нагрузку, то подвижное равновесие в окружающей среде, сложившееся за миллиарды лет ее саморазвития, необратимо нарушится.

Понимание пришло не сразу. Опасные тенденции демонстрировали свою разрушительную силу постепенно, и только во второй половине XX века человечество в полной мере осознало факт, повергший его в состояние шока – способность природы к

самовосстановлению уязвима, а ее ресурсы конечны.

Ответ на вопрос «что делать?» напрашивается сам собой. Необходимо свести к минимуму потребление ресурсов, это, во-первых, и во-вторых, обеспечить их наиболее эффективное использование. Эти задачи напрямую определяют цели мировой энергетики: она должна быть ориентирована на достижение максимальной энергоэффективности и всемирное энергосбережение.

Казалось бы, нет смысла оспаривать необходимость и значимость такого подхода к решению экологических проблем, однако, следует признать, что подобные меры недостаточны, пока неизменным остается сам человек, реализующий в своей деятельности деспотический антропоцентрический подход к природе (выстраивающий свои отношения с природой в рамках антропоцентрической парадигмы).

В данной статье предпринята попытка раскрыть содержание основных составляющих морального сознания, способствующих развитию экологического мышления вне власти антропоцентрического дискурса, циркулирующего в социальном пространстве.

Для этого необходимо решить следующие **задачи**: во-первых, пересмотреть соотношение структурных элементов сложившегося в рамках антропологической парадигмы типа рациональности; во-вторых, внести изменения в понимание ответственности как «ответственности-заботы» и «ответственности-вины», и рассмотреть два вида ее проявления в контексте решения проблемы экологической ответственности; в-третьих, рассмотреть различные модели моральных практик как воплощение этических программ экономии ресурсов, и энергоресурсов в частности.

### 2. РАЦИОНАЛЬНОСТЬ В КОНТЕКСТЕ АНТРОПОЦЕНТРИЗМА И ЭКОЦЕНТРИЗМА КАК ОСНОВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭТИКИ

Согласно антропоцентризму в его «сильной» версии (Апресян Р.Г.) человек является венцом творения и центром Вселенной [1]. Во многом благодаря философии Декарта в Европе утвердилось особое отношение к миру – классический тип рациональности, основными структурными компонента-

ми которого являются четко определенная цель и предоставляемые разумом, оптимальные средства ее достижения. Человеческий разум обрел статус универсального, поскольку им наделены все люди, «даже турки». В отличие от Божественного разума, несущего «свет веры», человеческий разум, за пределами истин Откровения, доступных лишь «свету веры», несет свет истины, и является абсолютным властелином в вверенном ему Создателем мире. Благодаря разуму человек безусловно подчиняет себе природу в целях достижения конкретной цели - земного блаженства.

Провозглашая себя «хозяин и господином природы» в рамках картезианского проекта, легшего в основу идеологии эпохи Просвещения и Французской революции, человек принимает на себя роль великого преобразователя мира, способного противостоять всем известным формам жизни. Справедливо признаваемая критиками ограниченность и пагубность позиции антропоцентризма для решения экологических проблем состоит в том, что здесь мера допустимого вмешательства в природу находится в полной зависимости от удовлетворения человеком своих собственных интересов, последствия же для самой природы как таковой во внимание не принимаются, а если и принимаются, то только в той мере, в какой они могут быть опасны для человеческой жизни.

В противоположность антропоцентризму, в XX веке появляются биоцентрические концепции экологической этики, отвергающие претензии человека на исключительность, развивающие идею самоценности природы вплоть до признания ее особых прав. В рамках биоцентризма развивается идея, согласно которой не только человек обладает статусом морального субъекта, а все живое имеет такие же равные права на существование, а также правами на выбор и определение естественного пути своего развития, как и человек. Более того, в радикальной версии биоцентризма – экоцентризме, признается, что и экосистемы, и неживые объекты - природные ландшафты, горы, реки, и вся биосфера в целом, любое живое нечеловеческое существо (червяк, например) или объект (цветок, дерево) обладают внутренней ценностью и полным моральным статусом.

Если два существа обладают равным моральным статусом, то это означает, что между ними нет онтологического различия, т.е. существование одного, не может быть принесено в жертву ради существования другого. В отношении живых существ, а в экоцентризме - и в отношении неживых, вступает в силу очень строгая моральная презумпция невмешательства в другое существо или предмет самыми различными способами – уничтожения объекта, экспериментов над ним, непосредственного причинения ему страданий, повреждений, которые лишили бы его возможности восстановления и т.п.

Нельзя не восхититься красотой мира, которую открывает нам экоцентризм, где каждая букашка и травинка, просторы и поляны расцветают в своей первозданности при условии невмешательства че-

ловека, выстраивающего отношения с природой на основе мирного сосуществования.

Тем не менее, справедливости ради следует заметить, что программа экоцентризма не может не вызвать состояние некоторого недоумения, в силу утопичности и нереалистичности основных ее положений. Как бы тяжело нам не давалось это признание, мы вынуждены его принять, утверждая, что невозможно помыслить ситуацию, когда ради спасения животного, жертвуют человеком. Это обстоятельство запускает движение по кругу и снова бросает нас в объятия антропоцентризма, теперь уже в его исключительно «слабой версии»: как живые существа мы не можем не использовать природу, но делать это необходимо осторожно и аккуратно, сохраняя био- и экосферы, не допуская их разрушения и гибели, компенсируя потери от вмешательства, концентрируя силы на восстановлении природных ареалов.

Драматизм современного положения человечества состоит в том, что перед лицом экологической катастрофы пришло осознание неадекватности, или недостаточности практических действий, предпринимаемых для ее предотвращения. Предвидя угрозу равновесию и планетарной системы, и квазиавтономной человеческой цивилизации, человек мечется между двумя этико-экологическими теориями – антропоцентризмом и экоцентризмом - и не находит выхода.

Однако восприятие ситуации как безысходной, на наш взгляд, обусловлено не столько самим положением дел, сколько господством устоявшегося дискурса, благодаря которому люди оказались в плену привычных представлений, заставляющих всех думать «как все». Этот укоренившийся в обществе порядок мышления принуждает воспринимать сложившуюся практику отношения к природе как вполне нормальную и приемлемую, ведь так трудно отказаться от поглощения элементарных понятий и выстраивания упрощенных взаимосвязей. Дискурс невозможно запретить, объявить необязательными, но есть шанс подорвать его гегемонию усилием собственной мысли. Тем не менее, развивая в себя навыки самостоятельного мышления, можно освободиться из-под власти устоявших мнений, суждений и стереотипов.

Оптимизм подобным устремлениям добавляют научные исследования биофизиков, в частности теория биотической регуляции окружающей среды (теория биоты), созданная российскими учеными под руководством профессора Горшкова В.Г. Разделяя, вместе со сторонниками традиционных взглядов на устойчивость биосферы, существование границ антропогенного вмешательства в природу, создатели теории биотической регуляции биосферы предупреждают, что для решения этой проблемы недостаточно снизить антропогенную нагрузку на природную среду, и заменить естественные экосистемы «агроценозами» и другими «культурными» экосистемами. Более того, использование подобных методов представляет главную экологическую угрозу, т.к. биота (естественная экосистема) выполняет

важнейшую функцию регуляции природной среды, и никакие усилия человека не смогут ее заменить. Уничтожение природных экологических систем разрушает естественный механизм поддержания устойчивости биосферы [2].

Это означает, что, несмотря на власть, которая невероятно возросла в масштабах земной окружающей среды, и что, казалось бы, уже вот-вот будет достигнуто состояние, когда все окажется возможным. Человек вынужден, он должен остановиться, склонившись в глубоком поклоне, перед природой, и, наконец, понять, что никакие технологии, помогающие рукотворному созданию лесов, полей и озер, не смогут управлять энергией, которая подвластна только биоте - природе, в ее первозданности и нетронутости. В противовес антропоцентрической парадигме должны сформироваться новые мировоззренческие установки, предполагающие особое бережное отношение к природе как предмету любви и заботы.

Речь идет о переструктурировании определяющего отношения человек-природа типа рациональности через рокировку таких его структурных компонентов как цель и средства. Необходимо отказаться от сведения природы к ее ресурсной и продуктивной функции, определив для нее место цели и строго очертить границы своего вмешательства, признав свою инструментальную роль (роль средства) и возложив на себя полную ответственность за достижение такого состояния. И это под силу только новому человеку, который должен быть лучше нынешнего.

### **3. «ОТВЕТСТВЕННОСТЬ-ЗАБОТА» И «ОТВЕТСТВЕННОСТЬ-ВИНА»**

Новое отношение к природе предполагает готовность человека отказаться от многих благ и потребностей, очертить границы своей экспансии, сохранив, пусть частично, природные ареалы в своей первозданности и нетронутости. Это серьезная жертва, и ее осознание вносит серьезные коррективы в интерпретацию концепта ответственности. Призывы к «ответственности каждого человека за судьбы цивилизации», поиску «новых духовных ориентиров», по справедливому замечанию современных исследователей, уже давно превратились в расхожие, ничего не значащие фразы, пустые и лишённые смысла. Тем не менее избитость фраз не говорит об исчерпанности стоящей за ними проблемы. Скорее наоборот, это свидетельствует о необходимости поиска новых инструментариев для решения реально существующих проблем. Доказательством чему служит широкое обсуждение в последние годы темы ответственности в философских кругах российской науки. (Особый интерес вызвала публикация «Пролегомены к моральной ответственности» Логинова Е.В., Гаврилова М.В., Мерцалова А.В., Юнусова А.Т., посвящённая анализу ответственности в аналитической философии [3]. и ее обсуждение ИФ РАН, состоявшееся в марте 2021 года) [4].

Впервые вопрос об ответственности как основе новой этики в условиях техногенной цивилизации поставил немецко-американский философ Ганс Йонас. В своей книге «Принцип ответственности. Опыт этики для технологической цивилизации», вышедшей в 1979 году и ставшей мировым бестселлером, философ говорит, что настали времена, когда мы, наконец, должны понять, что природа зависит от нас, и она должна стать предметом нашей заботы и ответственности. «Но для этого, - как пишут исследователи творчества Йонаса Бёлер Д. и Херрманн Б., - необходимо запустить процесс духовной трансформации, который затронул бы саму идею человека, и позволил ему выйти на новый уровень «моральной чувствительности» и обрести новую способность познания» [5].

Особого внимания, в целях нашего исследования, заслуживает это сочетание понятий «заботы» и «ответственности», так как в их единстве, которое может мыслиться только как диалектическое единство, снимается противостояние двух мировоззренческих установок антропоцентризма и эоцентризма. К такому выводу подталкивает различное смысловое наполнение этих терминов - «нести ответственность» и «быть ответственным».

Выстраивая философию ответственности, ряд философов (в частности Поль Рикер) обращают внимание на необходимость контекстуального употребления термина «ответственность» через связку с категорией «обязательства». «Быть ответственным» в моральном смысле может быть только тот, кто добровольно взял на себя определенные обязательства. Важно подчеркнуть, что эти обязательства не возникают на пустом месте, вне обладающих принуждающей силой обстоятельств, и носят как бы «компенсирующий» характер, поскольку субъект обязательства возвращает ресурсы (это могут быть блага как материальные, так и духовные), которые были предоставлены ему (осознанно или неосознанно) стороной, в отношении которой эти обязательства исполняются. Так существование любимого существа представляет такую ценность для любящих его, о которой сам объект любви может и не подозревать, и не знать о том, на какие подвиги и жертвы идут ради него любящие его.

В целях наглядной иллюстрации своих воззрений Йонас реконструирует архетип родительской заботы, который диктует алгоритм действий для любящих родителей: «взгляни, и ты знаешь!» [6]. «Взгляни, и ты знаешь», что делать и как помочь, потому что ты всегда на связи со своим ребенком, и, подарив ему этот мир, ты взял на себя, как родитель, обязательство поддерживать его и всегда приходить на помощь. В отношении природы работает та же схема: чтобы пользоваться его богатствами, необходимо взять на себя обязательства возвращать по принципу маятника, отдавать через заботу и любовь все, что даст этому миру возможность быть. Нужно только взглянуть любящим оком («ведь зорко одно лишь сердце» Сент-Экзюпери) и распространить чувство ответственности, реанимировав свою «моральную чувствительность», не только на

тех, кто рядом и дорог, но и на природу, и на всю планету в целом, отказавшись от утилитарного отношения к ней и воспринимая ее как абсолютную ценность.

Моральное обязательство, таким образом, носит ретроспективный характер: расплачиваться (принести душевную или материальную жертву) приходится за то, что уже существует как ценность. Однако ценность устанавливается субъективно, и величина ее прямо пропорциональна обязательствам, которые готов возложить на себя субъект ответственности («насилуно мил не будешь»). Нельзя человека заставить заботиться о том, кого не любишь. Эта формула может быть применима и к природе: не привили ребенку любви к природе, и вырос человек, не способный о ней заботиться. Нет любви – нет заботы. В философии Марселя Мосса эта ситуация описывается через категорию «дара»: «одаривая, отдают себя, а отдают себя потому, что именно себя вместе со своим имуществом «должны» другим» [8, с. 168].

Морально-ответственное отношение к природе может развиваться только в рамках экоцентрической парадигмы, когда боль, причиняемая миру, мучительно переживается человеком как своя собственная боль. И те экологические инициативы, которые затрагивают человеческое существование на уровне частной жизни, касаются непосредственного организационного быта, особенно ценны и важны, несмотря на их казалась бы минимальный вклад в решение глобальных экологических проблем. Серьезную поддержку, например, получает сегодня экологическая программа Zero waste «Ноль отходов», призывающая к экономии на всех уровнях бытовой жизни для того, чтобы свести к минимуму количество производимого людьми мусора. Для этого разрабатываются специальные правила поведения, устраиваются соревнования между участниками на предмет того, кто больше преуспел в этом стремлении. Участники программы призывают отказываться от предметов, в которых нет необходимости, объявляют бой потребителям, предлагая способы продления службы вещей и механизмов.

Здесь имеется в виду ответственность в первом рассмотренном нами смысле, как «ответственность-забота», именно она не может быть совмещена с виной. Это моральная ответственность.

Что же касается второго значения понятия «ответственность» – «нести ответственность за что-то», то здесь речь идет об ответственности как о расплате за последствия своих действий и поступков, при условии, что они нанесли чему-то, или кому-либо реальный ущерб – вред, порчу.

В полном согласии с Ханной Арендт, можно утверждать, что «вина, в отличие от ответственности, обособляет; она может быть только личной» [7, 205]. Если моральная ответственность раскрывается через категорию заботы, то определяющим основанием для второго вида ответственности становится категория вины. «Ответственность за что-то», ответственность как следствие вины – это правовая ответственность.

Ситуация правовой ответственности возникает тогда, когда лицо своими вольными или невольными действиями вторгается в жизненную сферу другого индивида и ограничивает его возможности по распоряжению принадлежащими ему социальными ценностями и ресурсами. Лицо, которому причинен ущерб, вправе требовать возмещения причиненных ему убытков, восстановления своих прав, или поправленного чувства достоинства.

Итак, виновная ответственность – это правовая ответственность, это расплата лица за вторжение в сферу прав и свобод другого, возмездие за попрание границ, обеспечивающих его существование. Процедура наступления правовой ответственности четко регламентирована законом, действующим правом, она носит обязательный характер и обеспечивается силой государственного принуждения.

Этот вид ответственности получает свое развитие на основе антропоцентрической парадигмы, в рамках которой человек является автором всех страшных событий, поставивших человечество на грань экологической катастрофы. Объектом виновного действия выступает при этом природа. И как виновник причиненного ущерба природе, человек расплачивается, и несёт полную ответственности за свои действия, т.е. сам совершает преступление и сам же выносит себе приговор.

Эта «ответственность-вина» искупается благодаря политическим мерам, предпринимаемым «сверху», когда наделенные властью государственные или межгосударственные органы и структуры предписывают подотчетным субъектам обязанность исполнять требования разрабатываемых ими экологических программ, содержащих набор необходимых действий и рекомендаций, направленные на урегулирование отношений человек-природа.

Яркой иллюстрацией подобных мер является, принятая более четверти века тому назад международным сообществом новая модель эволюции общечеловеческой цивилизации, получившая название концепции устойчивого развития (Concept of Sustainable Development). Это нормативная программа будущего развития человечества, призванная обеспечить баланс между социально-экономическим развитием и сохранением окружающей среды, способный обуздать риски будущего. Наиболее значимым среди последних документов, принятых в рамках концепции, является «Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.», утвержденная резолюцией ГА ООН в сентябре 2015 г.

Не оспаривая значимости предпринимаемых мер, следует заметить, что они пронизаны сугубо прагматическим отношением к природе и требуют для своей реализации чисто инструментальных и волевых усилий со стороны политических, экономических и научных кругов. Возможно поэтому, несмотря на предпринимаемые усилия, направленные на преодоление глобального кризиса, ситуация остается тревожной, и достигнутые успешные результаты оказываются несопоставимыми с масштабами деградации биосферы.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день мы вынуждены признать, что мы никогда не сможем отказаться от прогресса, несмотря на то, что во многом не оправдались возлагаемые на него надежды, не сможем избежать очеловечивания природы, наращивания технологических мощностей для обеспечения более комфортной жизни. Но формируя сегодня наше будущее, мы должны понимать, к какому состоянию природы и человека мы можем прийти, если не будем соотноситься с нравственными оценками состояния общества и мира. Чтобы можно было рассчитывать на лучшее будущее, нам нужен новый человек, который будет лучше нынешнего. Этот человек сможет совместить в себя «человека-виновного» и «человека-заботы», опираясь в своем отношении к миру на две парадигмы, определяющие основной вектор постижения им мира, в котором биота-жизнь является не просто самоорганизующейся системой, эпифеноменом, а причинно-активной системой, способной порождать смысл и определять причинную активность в масштабе планеты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Апресян Р.Г.** Морально-философский смысл дилеммы антропоцентризма и нонантропоцентризма // Этическая мысль. Вып. 10 / Под ред. А.А.Гусейнова. М.: ИФРАН, 2010. С. 5–19.
2. **Ефременко Д. В.** Антропоцентризм vs. биоцентризм в дискуссиях об устойчивом развитии и взаимодействии человека и биосферы // Антропо-техногенная деградация биосферы: предложения по её преодолению: Труды Российской междисциплинарной научно-практической конференции / ИНИОН РАН. Центр социал науч.-информ. исслед.; Отдел науч. сотрудничества и междунар. связей; Отв. ред. Д. В. Ефременко, В. И. Герасимов. — М., 2014. С. 6-18.
3. **Логинов Е.В., Гаврилов М.В., Мерцалов А.В., Юнусов А.Т.** Прологомены к моральной ответственности // Финиковый Компот. 2020. № 15. С. 3–100
4. **Апресян, Р. Г. Ю., Беседин, А. П., Васильев, В. В., Костинова, А. А., Кузнецов, А. В., Левин, С. М., Мишура, А. С., Платонов, Р. С., Прокофьев, А. В., & Разин, А. В.** (2021). Материалы обсуждения «Прологомены к моральной ответственности». Этическая мысль | Ethical Thought, 21(2), 35-47.  
<https://doi.org/10.21146/2074-4870-2021-21-2-35-47>
5. **Бёлер Д., Херрманн Б.** В опасной цивилизации – по-новому мыслить ответственность // Пугачева Н. П. Человек, жизнь и природа в философии Ганса Йонаса: монография. – Пенза: РИО ПГСХА, 2013. – С. 161–172.
6. **Йонас, Г.** (2004) Принцип ответственности. Опыт этики для технологической цивилизации / пер. с нем., предисл., прим. И. И. Маханькова. М.: Айрис-пресс. 480 с.
7. **Арендт, Х.** Ответственность и суждение [Текст] / пер. с англ. Д. Аросона, С. Бардиной, Р. Гуляева. М.: Изд. Института Гайдара, 2013. 352 с.
8. **Мосс М.** (1996) Общества. Обмен. Личность. - М., 416 с.



А.М. Кучинов<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия**БОЖЕСТВЕННАЯ ЭНЕРГИЯ В ПАТРИСТИКЕ ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ:  
ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АКТУАЛИЗАЦИИ В РОССИЙСКОЙ МЫСЛИ****АННОТАЦИЯ**

Актуализировано более широкое понимание энергии, чем используется в европейской культуре со времён развития естествознания нового времени, имеющее происхождение в античной мысли, энергия как «у того, что работает». На развитие естествознания повлияло более узкое понимание энергии – как некоей «мощи», «силы». Историко-философская проблема существования в истории российской мысли понятия энергии в широком смысле изучается через историю интерпретаций и актуализаций в отечественной истории учения о божественной энергии Григория Паламы. Показано неполное восприятие исихазма в российской культуре.

**1. ПОСТАНОВКА ВОПРОСА: ТЕРМИН  
«ЭНЕРГИЯ» В ИСТОРИИ МЫСЛИ**

Мало кто задумывается, что до установления термина «энергия» в естественнонаучном и инженерном дискурсах во время становления естествознания нового времени данное понятие использовалось в философии и богословии совсем в иных непривычных для нашего времени контекстах, имея более широкий смысл.

Категория «энергия» имеет греческое происхождение, где «*ἐνεργός*» означало «деятельность», «действие», «операция». Этимология греческого «*ἐνεργός*» – от «*ἐν*» – «у», «около» и «*εργός*» – «то, что работает». Однокоренное слово «*εργόν*» – «работа», «то, что делается», «дело», «действие». Греческий корень «*εργ*» происходит от праиндоевропейского корня «\**werg*», означающего «делать» (англ. «do»). [1] Таким образом, сама категория энергии и за ней стоящая когнитивная конструкция, ставшая основой для широкого применения понятия энергии в естественных науках и инженерном деле, имеет индоевропейскую – европейскую «природу», как и многие основополагающие категории философии и науки. Это автоматически открывает вопрос о вероятных различиях понимания «энергии» в европейских (имеются ввиду все с генетической связью от античной культуры – в т. ч. российскими, арабской, США и мн. др.) и неевропейских (появившихся независимо от античности – конфуцианская, буддийская, индуистская и т. п.) культурах. В рамках данной работы «неевропейская» онтология энергии не рассматривается. В философию, как считается, термин «энергия» пришёл через Аристотеля,

понимавшего её как «актуальность», «реальность», «существование», в отличие от «возможности» и «назначения» («*ἐντελέχεια*»). Это понимание «объединяет не только физическую энергию, но и энергию вообще (далее в данной работе данное аутентичное греческое «аристотелевское» понимание будем называть «энергия *sensu latu*» – А.К.), в том числе энергию сущности и энергию смыслов». [2] Из позднелатинского языка слово «*energia*» перешло ок. XVI в. во французский и ок. 1590 г. в английский, где понималось как «сила выражения», что не совпадало с пониманием энергии Аристотеля, значило некую «силу, вызывающую реалистические мыслительные образы», получается, энергия мыслилась как некая эстетическая категория. Это, более узкое понимание энергии, далее в данной работе называемое «энергия *sensu strictu*», и оказалось когнитивным ресурсом для того, чтобы понятие «энергия» закрепилось в естествознании. С 1660-х гг. термин в английском языке приобрёл оттенок смысла «сила» (англ. «power»), с 1807 г. используется в научном обороте. Дискурс энергии (в естественнонаучном смысле) актуализировался ещё раз в 1970 г., когда заговорили об «энергетическом кризисе». [1]

В словарях русского языка слово «энергия» впервые отмечается в 1806 г. сразу *sensu strictu*, в смысле некоей «силы», «мощи», «действия» [3], видимо, в связи с актуализацией в естественнонаучном дискурсе. Однако, историко-философской наукой не актуализирован в достаточной мере вопрос, действительно ли в истории российской мысли не было понятия энергии *sensu latu*. Свет на этот вопрос проливает знание о влиянии на русскую философию в средневековье византийских философских и богословских учений, в т. ч. исихазма Григория Паламы, писавшего о «божественной энергии».

Объект исследования – учения византийской и русской мысли, предмет – интерпретация и актуализация в российской мысли учения о божественной энергии Григория Паламы. Актуальность данной темы обосновывается тем, что когнитивный ресурс любого используемого в науке понятия (в т. ч. «энергия» в энергетике) имеет взаимосвязи с его этимологией и историей использования, от этого же зависят познавательные возможности и ограничения этого понятия.

## 2. УЧЕНИЕ ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ О БОЖЕСТВЕННОЙ ЭНЕРГИИ

### 2.1. Источники и историография

История изучения византийской философии и, в частности, исихазма, в России началась сравнительно поздно, более - с середины XIX в. Длительное время это изучение происходило только в рамках православной богословской науки, значительно позднее католических авторов. Большая часть российских исследователей после событий 1917 г. оказалась в эмиграции – В. Н. Лосский, Иоанн Мейендорф, Киприан Керн, Василий Кривошеин. В советское время проблематика изучалась преимущественно в рамках исторической и филологической византологии, прежде всего В. В. Бычковым и Г. М. Прохоровым. Но историко-философская наука только начинает осваивать средневековую Византию, в последние десятилетия проблематику изучают А. Г. Дунаев, С. С. Хоружий, И. И. Семаева, А. Н. Чернышева, О. Климков, С. Н. Скоков, В. В. Петрунин, Е. П. Наделяева, Л. В. Филиндаш и др. [4, там же – подробная библиография] акценты в исследованиях различаются в зависимости от основной специализации автора, будь то византология, богословие, история, история философии, эстетика, искусствоведение, филология и т. д.

Труды Григория Паламы, как и многих иных византийских авторов, притом, что изданы на языке оригинала не позже 1960-х гг., переводиться на русский язык в большинстве своём начали совсем недавно. Десять бесед Григория Паламы переведены в 1785 г., «Омилии» - в 1993 г., догматико-полемические труды – в 1995, 2006, 2007, 2013 гг. и лишь небольшой объём в 1955 г., нравственно-аскетические труды – в 1996, 2007 и 2010 гг. и только «Изъяснение десяти заповедей» – в 1860 г. [5, там – его труды и исследования о нём] Большинство изданий являются библиографическими редкостями в силу малотиражности.

Работ, в которых разрабатывалось бы понятие энергии в связи с Григорием Паламой на философско-категориальном уровне, обнаружено не было.

### 2.2. Историко-философский контекст Григория Паламы

Средневековая философия не ограничивается перечисленными в большинстве поверхностных учебников «двумя этапами» западноевропейской мысли – «католическими» патристикой и схоластикой. Эти два направления существовали в Западной Европе, но их не было, например, в истории арабской философии, в средневековье давшей человечеству куда больше подлинно философских, большей частью – светских, учений. Это были совсем иные направления и школы, решавшие более широкий круг задач, чем вопросы церковного и богословского характера в Западной Европе. В меньшей степени от средневековой западноевропейской отличается средневековая византийская и русская мысль, тоже изучавшая преимущественно окологрелигиозные вопросы, но в контексте восточно-христианской православ-

ной, а не католической церкви; здесь вместо патристики и схоластики были тоже иные направления с другим содержанием. В средние века философия в Западной Европе, арабском мире, Византии и Русских Землях взаимно влияли друг на друга независимо от конфессиональных границ. В частности, в Русских Землях обращались труды античных и средневековых западноевропейских и византийских авторов, исихазм имел переклички с арабоязычным суфизмом, влияние же арабской интеллектуальной истории на византийскую и средневековую русскую мысль, если оно имело место, подробно не изучалось, хотя не вызывают сомнений случаи влияния в средневековье арабской философии на западноевропейскую.

Патристика понимается чаще всего как направление в европейской мысли, развитие которого завершилось около VIII в., начавшись как общехристианская мысль, а позднее разделившееся на западно- и восточнохристианскую ветви. В общем виде под патристикой понимают хронологически широкий круг учений святых отцов. Одной из ветвей поздней восточнохристианской патристики оказывается исихазм, развивавшийся в Византии в XIV в., одним из основных его представителей считается Григорий Палама.

Византийская философия во многом решала вопросы христианской религии и развивалась поначалу как оппозиция светской и языческой философиям, сохраняя генетическую преемственность от античной философии преимущественно посредством интерпретации и приложения учений Аристотеля и неоплатоников. Учение об энергии в Византию пришло от Аристотеля.

Исихазм – неоднозначный термин в историко-философской науке, Иоанн Мейендорф давал ему четыре определения, эквивалентность которых между собой весьма спорна: «1) уединенное, отшельническое монашество (в отличие от общежительного), протекающее в безмолвии (молчаливости); 2) развившаяся на Синае и Афоне и достигшая расцвета в 14 в. особая школа и техника молитвы, часто именуемая „умным деланием“ (πραξις νοερά) [...]; 3) учение св. Григория Паламы (1296-1359), или паламизм, богословское выражение и обоснование исихазма (концепция нетварных Божественных энергий, действующих в мире и человеке); 4) явление в религиозной жизни России 14-16 вв., отразившееся в монашеской жизни и духовной культуре» [6]. Тем не менее, эти определения взаимосвязаны историко-хронологически: сначала возникла отшельническая монашеская практика («1»), в её развитие появилась школа и техника молитвы с «умным деланием» («2»). Григорий Палама создал на самом деле не только богословскую обосновывающую теорию отшельничества и молитв («3»), но и подкрепил её философским инструментарием – с одной стороны, с другой стороны - создал философское учение, способное существовать автономно от религиозных практик, своего рода религиозную философию. Если русская религиозная философия – плод русского православного мировоз-

зрения кон. XIX – нач. XX вв., так и исихазм в известной степени (но не только) – философское следствие православного мировоззрения в византийском историко-географическом контексте XIV в. Исихазм в России («4») – более неоднозначное и сложное понятие, описывающее, с нашей точки зрения, не вполне состоявшийся феномен.

Значение «3» иногда называют «философским» исихазмом, а значению «4» частично соответствует т. н. «политический исихазм» относительно русско-византийских связей XIV в. [4]. Поздние исихастские мыслители развивали социально-философскую составляющую данного направления, Г. М. Прохоров указывает на появление там идей, в чём-то сходных с «общественным договором» и «разделением труда». [7 с. 72-73]

### 2.3. Содержание учения Григория Паламы

С именем Григория Паламы связывают наиболее значимые этапы именно философского («3» значение) исихазма. Он является основным автором учения о божественной энергии и фаворском свете. Это учение формировалось в споре с католическим монахом Варлаамом Каламбрийским, в бытность Григория Паламы игуменом; позднее, после ряда споров, оно было признано квинтэссенцией православного вероучения.

Согласно Григорию Паламе, божественная энергия нетварного характера (включающая, среди прочего, фаворский свет) противопоставляется божественной сущности. Если божественная сущность – непознаваема и недоступна в эмпирическом восприятии, то божественная энергия познаваема и ощущаема, через неё человек познаёт Бога. Здесь стоит обратить внимание на взаимосвязь этой теоретической конструкции с этимологией греческого слова «*ενεργός*» (энергия) - от «*εν* *εργός*» - «у того, что работает». Божественная энергия, таким образом – это нечто вторичное («около», «у») от Бога, «того, Кто работает».

Бог непознаваем по сущности, доказать или опровергнуть его существование невозможно – это положение в средневековье достаточно прогрессивно, например, по сравнению с «пятью доказательствами» Фомы Аквинского. Григорий Палама глубже понимал ограниченность человеческого познания – это своего рода свидетельство большего критического мышления.

Дальнейшие положения философской концепции Григория Паламы отталкиваются от вопроса как человек познаёт Бога - через божественную энергию, через нетварный фаворский свет посредством молитвы и поста, а также «умного делания», интеллектуальных усилий: посредством изучения философии, наук, искусств, делания земных дел.

Связь Бога с людьми осуществляется посредством всеобщего миропорядка. Григорий Палама считал важным интеллектуальное познание для того, чтобы приблизиться к Богу [7 с. 52-23], только таинств для этого недостаточно [7 с.55].

Восприятием идей исихазма различаются между собой православие и католицизм: Бог и мир в като-

лицизме разделены, а в православии взаимопроникаются посредством божественной энергии. Бог одновременно имманентен (т. е., пребывает в мире, соответственно - чувственно познаваем, в части энергии) и трансцендентален (т. е. чувственно непознаваем, в части сущности) миру; познавая мир, человек познаёт Бога. [7 с. 60]

Исихазм сформировал новый идеал монашествующего – как философа-учёного, интересующегося книгами, и одновременно познающего мир практика, делающего дела. [7 с. 74] Соответственно, в этом направлении изменяются нравственные образцы поведения не только для монашествующих, но и для всех людей. Противопоставляют «чувственный» и «мыслительный» рай: второй, это более, идея исихазма. Человек приходит к наслаждению не путём удовлетворения чувств, а путём мысли о мире, которая приводит его к Богу.

Что касается «сбережения» или «экономии» божественной энергии, то прямо об этом Григорий Палама не пишет, однако красной нитью через его труды проходит идея о «субъективности» её восприятия и зависимости возможности её ощутить от усилия человека. Косвенно это может указывать на то, что на метафизическом уровне идеи «ограниченности», «принадлежности» энергии были связаны со «сложностью» и «субъективностью» её восприятия конкретным субъектом.

Таким образом, исихазм Григория Паламы и других авторов, начавшись как преимущественно богословское учение, продолжился формированием достаточно своеобразных для своего времени религиозно-онтологической, антропологической, социально-философской, этической и эстетической доктрин. Понятие «энергия» в этом учении было ещё вне дискурса европейского естествознания нового времени, оно скорее являлось религиозно-онтологическо-антропологическим. В истории средневековой западноевропейской мысли подобных пониманий энергии не обнаруживается. Такая трактовка энергии вмещается в рамки понимания энергии *sensu latu* по Аристотелю.

## 3. ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АКТУАЛИЗАЦИИ ИСИХАЗМА ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ В РОССИЙСКОЙ МЫСЛИ

### 3.1. Исихазм в Русских Землях

Влияние византийской философии на русскую философию изучено не только относительно исихазма, оно было достаточно интенсивным в течение всей средневековой отечественной истории. Однако, как будет показано ниже, влияние конкретно исихастского направления на историю русской философии оказалось неполным, фрагментарным и ограниченным, да и не вполне философским.

Первыми проводниками исихазма в Русские земли справедливо считают назначенных из Константинополя митрополитов Киприана и Фотия. Ни один из них не писал собственно философские произведения, они более известны разного рода письмами, в которых поднимаются богословские, властные и

церковные вопросы, но по ним реконструируются детали истории философской мысли в части влияния исихазма на российское интеллектуальное прошлое. У Фотия произведений с очевидным для нас влиянием исихазма нет – при нём это было, вероятно, некое ограниченно распространённое учение среди монашествующих, без широкого влияния на мировоззренческую и общественную составляющую русской социальности. Большее влияние исихазма на русско-византийские связи отмечено в эпоху Киприана [7, 8]. Киприан Киевский в своём «Житии митрополита Петра» в образе своего предшественника митрополита Петра показал идеал совершенного человека в исихастском мировоззрении, как человека-интеллектуала, не ограниченного церковной жизнью, но и делавшего земные дела, что и сделало его святым.

На мировоззренческом уровне влияние исихазма изучено на монашествующих, применявших это знание в организации жизни в своих монастырях: это Сергей Радонежский, Афанасий Высоцкий, Кирилл Белозёрский, Максим Грек, Нил Сорский и др.; а также на иконописцев, в творчестве которых наблюдается порождённая исихастским мировоззрением символика (в основном – связано с фаворским светом) – это, главным образом, Андрей Рублёв и Феофан Грек.

Однако, это влияние выглядит неполным, поскольку не успело распространиться за пределы церковной (даже более узко – монастырской) жизни. Исихазм нашёл в Русских Землях приложения в монашеской жизни и символике иконописи, но не получил теоретического развития и соответственно – приложений в иных сферах. Могли реализовываться некие идеалы совершенного монашествующего, но из них не сформировалось общего идеала совершенного человека. Идеал познания и творения земных дел мало где закрепился, помимо «Жития митрополита Петра» Киприана киевского. Таким образом, подлинно философская (включая какое-либо рассуждение об энергии) составляющая исихазма в российской культуре не закрепилась и, как будет показано дальше, была предана забвению в специфических исторических обстоятельствах.

### 3.2. Спор нестяжателей и иосифлян

Спор иосифлян и нестяжателей не ограничивается некоей дискуссией о церковном землевладении, как это трактовалось советской историографией, – мировоззренческий контекст данного интеллектуального конфликта гораздо шире. Хотя нестяжатели и иосифляне были согласны в том, что основной миссией церкви должно быть спасение людей в религиозном эсхатологическом смысле, невозможность компромисса стала следствием разного понимания того, какими средствами его можно достичь.

Нестяжатели и исихасты – суть почти одни и те же люди. Их позиции в споре имели некую, если не философскую, то хотя бы мировоззренческо-теоретическую базу, опирающуюся на исихазм. Если Бог непознаваем по сущности, то это мировоззрение не будет предусматривать намерения «заставить»

его познать, создавать доказательства его существования по типу аргументов Фомы Аквинского в «Сумме теологии». Если Бог познаваем по энергии, которая «субъективно» воспринимается в зависимости от намерения субъекта, то нестяжатели не будут проводить какие-либо манипуляции с тем, чтобы «обманывать» людей или понуждать их, дабы заставить верить в правоту религии и церкви. Возникает вопрос как тогда привести людей к Богу – посредством своего примера не только в религиозной жизни, но и в части интеллектуальных усилий, «умного делания», и земных дел. Это – не единственный пример того, что «тёмными веками» средневековье оказывается далеко не во всех сюжетах. Здесь очевидными ценностями просматриваются знание и свобода – без них не получается религиозной веры, нестяжатели никогда не позволят превратить религию в манипуляцию, как часто она воспринимается в сегодняшней России. Если бы история пошла по замыслу исихастов, в Русских Землях значительно раньше появились бы университеты, свободный рынок, частная собственность и другие атрибуты, складывавшиеся в отечественной истории за пределами средневековья. Вот почему земля и богатство – не самое главное, что было нужно церкви с точки зрения нестяжателей.

Совсем иная ситуация у иосифлян, аргументация которых была гораздо менее теоретически фундаментальна. Философия – это абстракция, а у Иосифа Волоцкого её ещё меньше, чем у русских исихастов. Если у них не было учения о божественной сущности и божественной энергии, то вопросы настолько абстрактного характера невозможно даже поставить, не то, что решить. Если иосифляне сами не предпринимают усилий к созданию абстрактного учения в обоснование своей правоты, то они не могут быть примером интеллектуальных усилий для других. Для того, чтобы привести людей к Богу, иосифляне готовы использовать любые средства вплоть до манипуляций, принудительных мероприятий, казней и т. п. Поэтому ценностей знания и свободы, доступных для всех людей, а не только для носителей церковной власти, у иосифлян нет. Власть для такой церкви становится самоценностью – вот почему земля и богатство были столь необходимы церкви с точки зрения иосифлян. Данное мировоззрение далее развивалось в специфические дискурсы не только внутри церкви, а также среди властных деятелей, тем самым трагично изменяя ход российской истории, став мировоззренческим основанием для идей вроде т. н. «крепостного права» и в принципе невысокой ценности знания и свободы в русской культуре.

### 3.3. Исихазм и Григорий Палама в России после забвения

Если известно, чем закончился спор иосифлян и нестяжателей, то ответ на вопрос о дальнейшей судьбе исихазма в русской культуре такой же – спор проиграл и исихазм, сохраняясь в виде латентных презумпций в символике на иконах и в устройстве монашеской жизни. Во второй сфере приложения

подлинно исихастские, интеллектуальные акценты приходили в забвение еще быстрее. Исихазм русская культура начинала открывать для себя заново: можно обратить внимание на хронологию изучения, издания русскоязычных переводов Григория Паламы и других исихастов [4; 5; 6] и способность людей разных эпох находить приложения его учению и включать его в историко-философский дискурс. Налицо в чём-то абсурдная ситуация: Россию называют «православной цивилизацией», но при этом знание средневековой западноевропейской философии, почти никак не влиявшей на отечественную историю, актуализировано на грани гиперболизации, а специалистов и знания византийской мысли и её влияния на русскую средневековую мысль, очевидно, недостаточно.

Продолжая начатое автором данного исследования десятилетие назад сопротивление т. н. «цивилизационному подходу» в его вульгарных вариантах, когда мир мыслится совокупностью неких дискретных единиц (типа т. н. «цивилизаций», «культурно-исторических типов» и т. п.), искусственно сгруппированных на основании этничности или религиозной принадлежности; стоит сказать, что само по себе православие (и не только: например, ислам тоже) различно в странах, где большинство населения называют себя православными. Можно полагать, хотя вопрос нуждается в изучении, что именно невосприятие идей исихазма на мировоззренческом уровне отличает российскую культуру от иных славянско-православных культур типа болгарской, северо-македонской, сербской. В них заметно подтвержденное практикой влияние исихазма на философско-мировоззренческом уровне. Например, если в русском православии влияние исихазма на иконопись ограничено символикой, преимущественно связанной с фаворским светом, то у сербских и болгарских авторов влияние исихазма на иконопись состоит в том, что на иконах изображается не сущность, а божественная энергия, которую каждый видит по-своему, что на порядок сложнее в абстрактно-философском смысле. И не только в иконописи дело: должны существовать и другие причинно-следственные связи, которые предстоит изучить.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергия как «у того, что работает», «деятельность», «действие», «операция» (*sensu latu*) и «мощь», «сила» (*sensu strictu*) - не совсем одно и то же, соответственно первое – как некий «процесс», «результат» («процессо-результат»), вторичный по отношению к некоему субъекту; второе – как некий «ресурс», «потенциал», воспринимаемый в некоторых контекстах субъектом сам по себе. Естествознание пользуется энергией в трактовке *sensu strictu* –

ограничивает ли это естественные науки или нет? Если ограничивает – то как и почему, как можно преодолеть ограничения и стоит ли для этого возвращаться к трактовке энергии *sensu latu*? Такие вопросы не исключены когда-нибудь в будущем на повестке дня философии естествознания.

В XX-XXI вв. в зарубежном европейском и российском дискурсе очевиден возврат понимания энергии *sensu latu*, но часто - не в науке, философии и богословии; а в основном, в качестве метафоры (когда говорят об «энергии картины», «энергии воображения», «эстетической энергии», «энергии человека», «энергии духа», «жизненной энергии», «энергии смыслов» и т. п.) или в паранаучных и эзотерических дискурсах (в контексте т. н. «биоэнерготерапии» и т. п.).

«Сужение» в европейских языках в XVI-XVII вв. понимания энергии вряд ли означало полный отказ от понимания энергии *sensu latu*, просто сменились акценты. Таким образом, в ныне господствующем в мировом естествознании понимании энергии *sensu strictu* остаются оттенки смысла энергии *sensu latu*, который в это понятие вкладывали Аристотель и Григорий Палама. Естествознание не «выбросило» эти когнитивные структуры, а лишь сменило акценты. Поскольку развитие философии и науки представляет собой чаще отказ от одних теорий в пользу других, а иногда - возврат к прежде «забытым» теориям; не исключено, что в будущем понимание энергии *sensu latu* может оказать влияние и на научное и, в частности, естественнонаучное мировоззрение.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

*sensu latu* — лат. «в широком смысле»;  
*sensu strictu* — лат. «в узком смысле».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Online etymology dictionary [Web site] – URL: <http://www.etymonline.com>
2. Жульков М.В. Феномен энергии в истории человеческой мысли // Философская мысль. 2016. № 6. С. 1-18. DOI: 10.7256/2409-8728.2016.6.18923 – URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=18923](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=18923)
3. Этимологический словарь современного русского языка: в 2-х тт. / Сост. А.К. Шапошников. М.: Флинта, Наука, 2010.
4. Дунаев А.Г. Исихазм / Православная энциклопедия. – URL: <https://www.pravenc.ru/text/674926.html>
5. Святитель Григорий Палама / Азбука.ру. – URL: <https://azbyka.ru/otechnik/GrigoriyPalama/>
6. Хоружий С.С. Исихазм / Новая философская энциклопедия. – URL: <http://philosophy.niv.ru/doc/encyclopedia/new-philosophical/articles/658/isihazm.htm>
7. Прохоров Г.М. Русь и Византия в эпоху Куликовской битвы. Статьи. 2-е изд, испр. и доп. СПб.: Алетея, 2000. 287 с.
8. Прохоров Г.М. Русь и Византия в эпоху Куликовской битвы. Повесть о Митяе. 2-е изд, испр. и доп. СПб.: Алетея, 2000. 479 с.

*Ю.В. Соколова<sup>1</sup>*<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Россия

## ТОТАЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ КАК СОВРЕМЕННЫЙ СОЦИАЛЬНЫЙ ФЕНОМЕН

### АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема потребления в современном обществе. Автором предпринята попытка взглянуть на общемировой тренд экологизации производства и жизни общества в целом через призму понятия «симулякр» в трактовке, предложенной Жаном Бодрийяром. Данный подход позволяет объяснить возможность существования образа «зеленого» экологичного мира в общественном сознании и негативные следствия этого образа.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема потребления ресурсов является сегодня одной из наиболее актуальных, она обсуждается и на высоком международном политическом уровне, и является важным аспектом в политике каждой страны мира, этот вопрос всегда присутствует в повестке международных экономических форумов, конференций и симпозиумов, по данной проблеме регулярно проводятся научные конференции, в том числе и рассматривающие технические аспекты ресурсного обеспечения и потребления, эти вопросы выносятся на общественное обсуждение и вызывают живой отклик у широких масс населения. Проблема ресурсного обеспечения и потребления в государстве – это важнейший вопрос, непосредственно влияющий на особенности жизни граждан и положения страны. Суверенитет, экономика, способность к развитию и процветанию общества и производства находятся в прямой зависимости от наличия определенных ресурсов и выработанных механизмов их использования и сохранения.

Вопрос потребления ресурсов имеет огромное количество сторон, ряд из которых можно рассматривать как природно-данные (например, климат, географическое местоположение, рельеф местности, наличие природных ископаемых и др.), другие же, – как исторически-, геополитически- и социально-обусловленные. Спектр последних крайне широк, он включает множество аспектов: от экономических, политических, историко-культурных до этических, социальных и психологических. Данная статья посвящена философскому анализу потребления как современного социального феномена, то есть направлена на выявление и осмысление сложившихся в обществе форм потребления как на уровне отдельного человека, так и на уровне общества в целом.

### 2. ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ КАК ОБЩЕМИРОВОЙ ТРЕНД

Общество потребления возникает как одна из стадий в развитии индустриального общества в 60 – 70-х годах XX века в США, а затем распространяется на другие страны. Рост благосостояния населения

в послевоенные годы (начиная с 50-х годов XX века), возникновение крупных монополий, изменения в производственной сфере и на рынках сбыта кардинально меняют структуру потребления материальных благ, что приводит к изменению мировоззрения человека, особенно его ценностных ориентиров, и отношения к труду и потреблению. Возникает феномен общества потребления, который получает осмысление в работах социологов, философов, культурологов, экономистов и политологов практически сразу после своего возникновения.

Одним из основополагающих трудов, посвященных обществу потребления и человеку-потребителю, стала книга французского философа, культуролога и социолога Жана Бодрийяра «Общество потребления», вышедшая еще в 1970 году и изданная на русском языке в переводе Е.А. Самаркиной лишь в 2006 г. [1]. Идеи, изложенные Ж. Бодрийяром, приобретают новые грани смысла в современных условиях – спустя 50 лет после выхода книги. «Мнимое изобилие», «общество самообмана», «фантастическая очевидность потребления» – все эти определения Ж. Бодрийяра, помещенные в мир гаджетов, глобальной сети, маркетплейсов, виртуальных кошельков и социальных сетей, становятся еще более явными. Об актуальности этой книги свидетельствует постоянное обращение к работе Ж. Бодрийяра множества современных российских и зарубежных исследователей [2-6].

Стремительное развитие производства и сферы услуг, возникновение так называемого информационного общества и социотехнической среды сопровождалось непрерывным ростом потребления ресурсов, в том числе и энергетических. Развитие стран стали оценивать по объемам потребляемой энергии. Появились расчеты по такому параметру, как энергоёмкость экономики, который показывает отношение энергопотребления в той или иной стране к ее ВВП.

Быстрый рост энергопотребления повлек за собой не только экономические расчеты и прогнозы относительно производств и рынков, но и анализ вопросов энергобезопасности. Одновременно с этим начался научный поиск возможных путей снижения потребления энергии и других ресурсов и исследования рычагов влияния на потребление через правовое регулирование. Возникновение глобальных угроз прежде всего экологического характера привело к появлению различных природоохранных инициатив, исходящих не только от международных правительственных и парламентских объединений, руководства стран и корпораций, но и со стороны общества. Постепенно сформировались ориентиры на так называемую «экологизацию» технологий и потребления.



### 3. СИМУЛЯКР ЭКОЛОГИЧНОСТИ МИРА НА ФОНЕ НЕУКЛОННОГО РОСТА ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ

Сегодня однозначно провозглашается общемировая направленность на разумное потребление, осознанный отказ от излишеств, на улучшение экологической ситуации, на бережное отношение к природе и ресурсам. Поставлен ряд конкретных задач, которые призваны помочь продвинуться в этом отношении: снижение выбросов и уменьшение углеродного следа, уменьшение доли пластика в упаковке, отказ от ламп накаливания, раздельный сбор мусора, использование экологически чистых материалов, увеличение доли возобновляемых источников энергии и т.д. ESG-протокол как особый способ управления бизнесом призван вовлечь компании в процесс достижения этих целей. ESG критерии задают не только экологические стандарты, но и способствуют социальной осознанности бизнеса и направлены на стимулирование создания системы прозрачного рационального управления.

На разных уровнях (от общемирового до локального) создаются программы развития и поддержки подобных инициатив, системы регулирования, контроля, штрафов и санкций за нарушение принятых договоренностей. Отчетность компаний и государственных органов, всемирных организаций демонстрирует общественности положительную динамику в развитии экологичности. Тем не менее, потребление энергии и ресурсов неуклонно растет, экономики стран строят прогнозы с учетом ежегодного увеличения потребления природных ресурсов, энергии, товаров и услуг. Каждый из нас как рядовой потребитель тоже легко может проследить рост индивидуального энергопотребления и потребления вообще. В чем причина такого противоречия?

Объяснить сложившееся положение и увидеть его разрушительные следствия позволяет философская интерпретация сложившейся ситуации. Данное противоречие может быть рассмотрено как проявление современной социальной тенденции к демонстрации образа, за которым ничего не стоит. Использование понятия «симулякр» в отношении общемирового тренда экологизации производства и мира в целом (включая и социальные процессы) дает возможность отчетливо увидеть неподлинность образа «зеленого» мира, его псевдовещественность в социокультурном пространстве. Понятие «симулякр», восходящее еще к философии Платона, было введено в активное современное научное употребление французскими структуралистами XX века (Жорж Батай, Жиль Делез, Жан Бодрийяр). Именно Ж. Бодрийяр применил термин «симулякр» для описания феноменов в социокультурном пространстве, такая трактовка позволяет использовать данное понятие для рассмотрения образа «экологичного мира» на фоне реального роста потребления ресурсов и усугубления экологической ситуации в мире.

Создание образа, его демонстрация, псевдовещественность, «тотальная симуляция» (по Ж. Бодрийяру) – характерные черты современности. Это проявляется не только на уровне отдельных людей или социальных групп, но и на уровне организаций (их отчетности, демонстрации показателей, конкур-

сов на исполнение заказов и другое) и мирового сообщества в целом. В этом случае создание некоего образа и его демонстрация вполне удовлетворяют и его создателей, и тех, кому образ демонстрируется.

Образ экологичного мира, осознанного потребления, снижения выбросов и декларация подобных намерений положительно воспринимается всеми людьми, участие в этих инициативах созвучно существующей системе ценностей; демонстрация отчетности, показывающей положительную динамику в заявленном направлении, воодушевляет. Возникает вопрос, каким образом удастся показать «экологичность» отдельных проектов на фоне ухудшения общемировых значений. Рассмотрение нескольких конкретных примеров помогает увидеть общий методологический подход. Так, например, программа по замене дизельных и бензиновых автомобилей транспортом с электродвигателями делает акцент на сравнении показателей по выхлопу, что безусловно показывает преимущество электродвигателя. При этом за пределами сравниваемых параметров остаются мощность двигателя, количество электроэнергии и экологические последствия ее выработки для зарядки батареи электромобиля, особенности эксплуатации в условиях низких и высоких температур, экологические параметры производства электродвигателей и батарей, утилизация выработавших ресурс элементов и многое другое. Кампания по замене одноразового пластика бумажными изделиями тоже замалчивает особенности производства бумаги, состав препятствующего промоканию покрытия «бумажной» одноразовой посуды, сроки и особенности ее разложения и переработки. В вопросе атомной энергетики сложным аспектом остается проблема утилизации отработанного топлива атомных станций. У солнечной энергетики есть своя «несолнечная сторона», к существованию которой стараются не привлекать особого внимания [6]. В каждом из этих примеров выбор критериев отчетности или критериев сравнения играет ключевое значение. Рассмотрение всего жизненного цикла изделия или процесса могло бы дать возможность увидеть полную картину потребления ресурсов на всех этапах, включая последний – утилизацию или переработку. Выполнение сравнения с неполными исходными данными, например, когда оценке подвергается лишь часть параметров или рассматривается одна из стадий жизненного цикла изделия, не позволяет достоверно утверждать, что весь процесс приведет к снижению энергозатрат, снижению использования того или иного ресурса, улучшения экологической обстановки в мире.

Методологически появление такого образа экологичного мира понятно: оно основано на манипуляции данными и умении представить сравнение по специфически выбранным критериям, но возникает вопрос, каким образом это стало возможно мировоззренчески? Почему человек довольствуется демонстрацией положительной динамики в вопросах сохранения природы, на основании чего доверяет представленному образу? Ответ кроется в особенностях современного потребительского сознания: в отношении к вещи и к потреблению вообще, которое приобретает тотальный характер. Потребление в последние десятилетия утрачивает свою функцию

удовлетворения естественных потребностей, а все больше становится образом и знаком. И в вещи не сущность и ее непосредственная функция имеют значение сегодня, а ее знаковость и образ, которым она может наделять своего владельца.

Реклама демонстрирует нам образы счастливой семьи, активной молодости, благополучной старости, здоровья, красоты, достатка, удовольствия, изобилия, «зеленого» экологичного мира. Потребитель приобретает не товар, а желаемый образ себя. Так, горнолыжная куртка – это не функциональная вещь для спуска с горы на лыжах, защищающая от ветра и влаги, препятствующая попаданию снега на тело, это -образ здорового, спортивного, активного человека, проводящего много времени на свежем воздухе, смелого и решительного. Это не вещь, это -образ: возможно, показатель желанного социального статуса, идея самого себя (своего близкого, ребенка и др.), фактически, воплощённая мечта и, что очень важно, эмоции, которая она вызывает.

Но мечта не реализуется, человек чувствует поддельность этого образа (он не катится с горы, он идёт за пищей), в его жизни ничего не поменялось. И это осознание фальши уносит тот мимолётный восторг и упоение, сопровождающие момент приобретения вещи. И неудовлетворенность толкает потребителя к следующему образу-вещи, становясь через это тотальным. Потребление утрачивает рациональность и становится (в терминологии Ж. Бодрийяра) «цепной психологической реакцией», беличьим колесом, ловушкой, где каждая следующая вещь сулит освобождение, но все дальше заманивает в лабиринт образов и знаков. Стремление зарабатывать больше, чтобы больше тратить, говорит о возникновении зависимости не от вещей, а от процесса потребления, который все больше превращается в фетиш. Ловушка потребления становится современной Пещерой Платона [7], из которой очень трудно выбраться.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экологичный мир, забота об окружающей среде, разумное и осознанное потребление, сбалансированная жизнь в гармонии с природой, общество, в котором царит умеренность и равновесие, гуманизм не только по отношению к человеку, но и ко всему живому, планете, вселенной – это очень привлекательный образ не только для каждого отдельного человека, но для социума в целом. Мы с готовностью «потребляем» предложенный симулякр «здорового мира» и испытываем удовлетворение от приобщения к образу.

Вопрос, всегда ли подобные идеи являются маркетинговым ходом и имеют экономическую подоплеку, лежит за пределами данного исследования. Выявление симулякра экологичного мира позволяет сделать вывод о том, что образ «зеленого» осознанного человечества, как положительный образ из всемирной мечты закрывает от нас подлинную реальность – мир, где не решена проблема утилизации отработанного сырья атомных станций и элементов питания солнечных батарей, где выбросы и углеродный след растут, где перенос вредных производств из одних районов в другие не только усложняет логистические цепочки, но и увеличивает вы-

бросы и энергопотребление, связанные с транспортировкой, что ухудшает общемировую картину. При этом необходимо отметить, что энергоэффективность современных технических систем повышается, а энергопотребление растет непропорционально росту населения планеты.

Основная проблема существования этого симулякра экологичности состоит в том, что пока есть доверие этому образу, пока он заслоняет от нас действительность, мы не осознаем, что проблема существует. А если нет проблемы, то и нет целенаправленного поиска решений. Поиск возможен только при объективной оценке общемирового состояния экологии, основанной на достоверных исходных данных.

Таким образом, философский анализ потребления как современного социального феномена позволяет выявить и осмыслить сложившуюся в обществе тенденцию тотального потребления. Потребление как современный социальный феномен можно трактовать как процесс непрерывного овладения материальными и нематериальными объектами, как накопление, не приносящее длительного чувства удовлетворения, некая погоня за мечтой, которая оборачивается горьким разочарованием от фальши и несоответствия образа и неприглядной действительности. Нежелание отказаться от излишеств, растущее потребление зачастую ненужных вещей, услуг, информации аналогично нарушению пищевого поведения, крайне распространенного сегодня, когда процесс питания обусловлен не чувством голода, а попыткой заглушить неудовлетворенность и беспокойство. Выход из этого тотального потребления возможен через осознание настоящих потребностей общества, через разоблачение псевдосоответственности и неподлинности симулякра «зеленого» мира.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. Его мифы и структуры /Бодрийяр Жан; перевод с французского, послесловие, примечания Е. А. Самарской. – М.: Республика: Культурная революция, 2006. 269 с.
2. **Бегалиева К.К., Ашилова М.С.** Влияние общества потребления на систему образования. Вестник Новосибирского гос-го педагогического ун-та. 2018. Том 8, №2/
3. **Напсо М.Д.** Образование как потребительская услуга. Современное Образование. 2019.№1(19). С. 81-88.
4. **Панкратова А.В.** Трансформации восприятия и формирования цветовой среды: от эйдоса к симулякру // Культура и искусство. – 2019. – № 8. – С. 20 - 29. DOI: 10.7256/2454-0625.2019.8.30549 URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=30549](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=30549) (Дата обращения: 10.06.2022)/
5. **Angelova – Igova B.** oCnsumerist Society from Frankfurt School to Jean Baudrillard. The Problem of Culture. Lambert Academic Publishing, 2012. - 216 p.
6. **Лысова А.С.** Солнечная энергия прошлого, настоящего, будущего // Современный мир. Стратегии развития, технологии и образы будущего. Материалы Международной научно-практической конференции. М.: Изд-во ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ", 2020. С.85-95.
7. **Платон.** Государство. Книга седьмая (в переводе А. Н. Егунова) // Собрание сочинений в 4 т. Т. 3. — М.: Мысль, 1994. — С. 295—296.

*Л.К. Рашитова<sup>1</sup>, С.Н. Курилов<sup>1</sup>.*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **КУЛЬТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БАШКИРСКИХ ШИХАНОВ)**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье дана краткая характеристика природного комплекса Башкирских шиханов Тратау, Юрактау и Куштау, которые представляют огромное природное наследие не только российского, но и мирового уровня. Отмечена их уникальность в историческом и культурном отношении. Кроме того, в статье приведено обсуждение конфликта между природоохранными интересами и содовым производством в Республике Башкортостан, который явился наглядным примером борьбы местного населения за ресурсосбережение своего региона. Авторами подчеркивается важность формирования четкой позиции в отношении сохранения культурно-исторических памятников и сбережения ресурсов для будущих поколений.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Богатейший природный комплекс Республики Башкортостан богат и разнообразен, он определен расположением на стыке Европы и Азии, лесной и степной зон. Климат республики умеренный и континентальный, во многом зависящий от Уральских гор, которые являются преградой на пути влажных воздушных масс Атлантики. Совокупность всех этих факторов определяют уникальность природы Башкортостана.

В республике добывается множество полезных ископаемых. Это нефть, природный газ, медь, золото, железная руда, известняк и другие виды минерального сырья. Бедой современного общества является легкомысленное отношение к этому богатству республики. Так, в августе 2020 года были приложены огромные усилия общественности для сохранения шиханов от разработок крупнейшего производителя пищевой соды в России АО «Башкирской содовой компании» (далее - БСК). БСК занимает около 85% рынка пищевой, каустической и кальцинированной соды в России.

### **2. КУЛЬТУРНО-ИСТОРИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ШИХАНОВ**

Шиханы – это горы-одиночки, протянувшиеся вдоль реки Белой в Стерлитамакском и Ишимбайском районах Башкирии. Основа шиханов – толща известняка. По данным геологов, образование шиханов началось около 300 млн лет назад и происходило на протяжении 40-50 млн лет, когда на территории современного Башкортостана было море. Образовывались они в результате деятельности боль-

шой группы организмов, которые извлекали из морской воды кальций, накапливали в себе и тем самым создавали известняк [5, с.27]. Аналогов такого явления в мире нет.

Особый интерес представляет богатая флора и растительность шиханов. Список флоры Тратау на сегодня включает около 400 видов высших сосудистых растений, относящихся к 60 родам, что составляет около 23% общего числа видов флоры Республики Башкортостан. Список флоры Юрактау включает около 370 видов, относящихся к 58 родам, что составляет около 22% общего числа видов флоры. Учитывая то, что на столь небольшой площади каждой горы встречается почти четверть флоры Башкирии, ее следует признать чрезвычайно богатой и уникальной. Большая часть растений, расположенных на горах занесена в красную книгу [1, с. 40].

Помимо высокой природоохранной ценности, все шиханы имеют важнейшее культурно-историческое значение. Они хранят тайны древней истории становления Башкирии и являются символом идентичности башкирского этноса.

Шиханы пользуются популярностью у кинематографистов в качестве природы для съёмки исторических фильмов. Шахтау, в частности, был запечатлён в культовом фильме «Салават Юлаев». Фильм начинается с кадров, разворачивающих захватывающую дух панораму широкой долины Белой реки-Агидели с величественным шиханом Шахтау. Место это было выбрано не случайно, очень тщательно и продуманно, поскольку именно оно является квинтэссенцией, логосом Башкирии.

Исторические документы говорят о почитаемости этих гор всеми народами, которые когда-либо проживали в данном регионе. Для башкир, проживающих в близлежащих селах эти горы священны. Например, еще в XVIII в. академик Иван Лепехин засвидетельствовал, что местные жители поднимались на Тратау только в исключительных случаях, предварительно выполнив определенные обеты; уносить что-либо с горы, ломать на ней что-либо считалось преступлением [4, с. 60].

Первые строки главного произведения эпоса башкирского народа «Урал Батыр» описывают сердце Башкирии, где зародился башкирский этнос – Стерлитамакские шиханы. На шихане Шахтау

(ныне уничтоженном), по мнению учёных, был обретён уникальный артефакт – Щит Тамерлана (Щит Силы). Именно здесь, примерно 600 лет назад, начала формироваться башкирская полития, прообраз государственности современного Башкортостана.

По свидетельствам археологов, на шиханах и прилегающих территориях обнаружено множество исторических находок и древних артефактов (каменные орудия, оружие, остатки крепостных валов и пр.). Также на Тратау существует несколько захоронений мусульманских святых, которые являются местом поклонения верующих. По всей видимости, гора Тратау была местом, где проходил ритуал провозглашения башкирских ханов.

Шиханы имеют колоссальное рекреационное значение. Эти горы и озера являются излюбленным местом отдыха населения из промышленных городов Стерлитамака, Салавата, Ишимбая, а также близлежащих сел.

Таким образом, Тратау занимал значимое место в религиозной, культурной, политической и исторической традиции башкир. Но в XX веке ореол её «святости» был утрачен. По многим причинам, Башкирия всегда считалась территорией трудной для управления, народ её отличался независимостью и свободолобием. Поэтому «смотрящим» на башкирских стройках раннего периода был назначен НКВД, который возглавлял нарком Н.И. Ежов. Идея сноса шиханов изначально крайне негативно была воспринята коренным населением. По свидетельствам очевидцев, старики ложились на гору Шахтау в местах, где закладывали взрывчатку, и их взорвали, вместе с горой. Для усиления контроля над местами разработки, у подножия трёх ближних шиханов, были построены концлагеря: женский лагерь у Тора (Тура) Тау, детский лагерь у Куштау (Долгой горы), мужской – у Шахтау (позже он использовался как лагерь для военнопленных). Мрачные бетонные развалины женского лагеря у Тора (Тура) Тау неплохо сохранились и по сей день. В сталинскую эпоху у подножия Тратау находилась одна из зон ГУЛАГа. Но позже, в конце XX века образ Тратау как исторической и культурной святыни был восстановлен. На сегодняшний день данный шихан входит в шорт-лист «Семи чудес России».

### **3. ПРОМЫШЛЕННАЯ РАЗРАБОТКА ШИХАНОВ**

Большие запасы известняка на стерлитамакских шиханах были обнаружены еще в 30-х годах прошлого столетия, это и инициировало строительство содового комбината. Свою работу он начал 1941 г. после эвакуации оборудования с содовых заводов Украины на базе месторождения на Шахтау. Идея разработки первого, самого большого шихана – Шахтау – появилась именно тогда, на основании рекомендаций московских геологов. Мнение местных жителей никого не интересовало. Крайняя необходимость диктовала чрезвычайные меры.

Единственным критерием принятия решений были сроки пуска строящихся объектов, в том числе содового завода в Стерлитамаке, при минимальных затратах. Так старый Стерлитамак, цветущий в прошлом, зажиточный торговый город, центр мощного сельскохозяйственного района, по сути степной курорт, был положен в качестве фундамента огромного комплекса химической промышленности.

Химическое производство вполне могло быть размещено в поселке Красноусольский, как это первоначально планировалось (этот факт ныне замалчивается), в этом случае содовое производство было бы обеспечено запасами сырья на сотни лет вперед и не конфликтовало бы с местным населением. Удешевление строительства и снижение себестоимости продукции для московских планировщиков было главным аргументом. Стерлитамак был обречён принять Большую Химию, как свою судьбу, а над достоинством всего человечества, Стерлитамакскими шиханами, нависла угроза полного уничтожения.

Прошли года, Стерлитамак вырос в крупный промышленный центр с реальными перспективами на будущее и тяжелейшими экологическими проблемами. В 1994 г. комбинат был акционирован под названием ОАО «Сода», в настоящее время входит в состав ОАО «Башкирская содовая компания». БСК создана в 2013 году на базе ОАО «Сода», 61,65% в которой принадлежали Башкирии. Также республика владела 34,79% ОАО «Каустик». В результате объединения компаний региональные власти получили 38% в БСК, а контроль перешел кипрской Modisanna Limited и ОАО «Башкирская химия» Дмитрия Пяткина и Сергея Черникова (62% акций). Таким образом, сверхприбыли от производства соды и прочих продуктов текли не в бюджет России и Башкортостана, а в карманы иностранных инвесторов.

Уже тогда было понятно, что перед предприятиями стоит вопрос обеспечения сырьем, поскольку запасы Шахтау были практически исчерпаны. За годы эксплуатации шихан Шахтау был полностью срыт, сейчас на его месте глубокий карьер, который приближается к уровню грунтовых вод.

Власти предлагали расположенные в Башкирии отложения известняка возле Стерлитамака, в Баймакском, Абзелиловском, Учалинском районах. Не раз предлагали и Гумеровское месторождение, расположенное в 35 км от Стерлитамака. В 2015 году занимавший тогда пост главы республики Рустэм Хамитов поручил провести там доразведку, по итогам которой компания «Ишимбайский известняк» сделала вывод, что «качество известняка подходит для производства соды». Таким образом, казалось бы, сырьевой вопрос для комбината был решен. Но экспертиза самой БСК показала другое. В компании уверяли, что технологическим условиям соответствуют только 7% запасов, а ресурсов в целом существенно меньше, чем утверждали чиновники, – 0,8 млн вместо 180 млн тонн.

Изучались также Альмухаметовское, Юлдашевское, Пугачевское, Каранское и Ташлинское месторождения. Но и на них подходящего во всех отношениях сырья не нашлось, хотя ряд экспертов считали, что разработка Каранского могла быть рентабельной при условии стабильного спроса и снижения издержек БСК. Кроме того, компания в тестовом режиме закупила 3 тыс. тонн известняка с принадлежащего УГМК Худолазского месторождения в 500 км от завода. Но по итогам эксперимента в БСК заявили, что многочисленные примеси забивали печи.

Одновременно не прекращались попытки со стороны производителей инициации снятия статусов особо охраняемых природных территорий с шиханов Тратау и Юрактау (по современному законодательству шиханы нельзя разрабатывать и даже проводить на них геологоразведку до тех пор, пока не будет снят статус памятника природы). Связано это было с нежеланием БСК упускать экономическую выгоду и привлекать дополнительные средства, в том числе для налаживания транспортного сообщения в дальние месторождения.

В августе 2018 года БСК заявила о том, что сырья на разрабатываемом месторождении Шахтау хватит только до 2022 года, после чего компания может закрыться. В качестве возможного места для создания нового производства в БСК предложили шихан Тратау. В Минпромторге эту идею поддержали, несмотря на то что гора является природным памятником и находится под охраной. Заместитель министра промышленности Виктор Евтухов заявил, что региональным властям необходимо снять охранный статус с Тратау, а предложенное в качестве альтернативы Гумеровское месторождение, по его словам, не подходит БСК из-за удаленности и качества сырья. Однако власти Башкирии отказались лишать Тратау статуса памятника природы и договорились с БСК, что компания займется добычей на другом шихане – Куштау.

#### **4. ПРОТИВОСТОЯНИЕ ВОКРУГ ШИХАНА КУШТАУ**

В конце 2018 года врио Главы Республики Башкортостан Радий Хабиров заявил, что разработка месторождений известняка на Куштау может стать компромиссным вариантом для решения сырьевой проблемы БСК. Он предложил отдать содовой компании единственный незащищенный природоохранным законодательством шихан Куштау, расположенный рядом с производством. Раньше БСК отказывалась от него, ссылаясь на большое количество примесей в сырье по итогам проведенного в 2006-2008 годах бурения, но в итоге согласилась, и в августе 2019 года подразделение БСК АО «Сырьевая компания» получило лицензию на разведку и добычу на шихане до 2039 года. Интересы БСК были представлены в лице чиновников Альберта Харисова, московского бизнесмена Дмитрия Пяткина, Александра Фраймана, Сергея Чирикова, Виктора Иламова. В июне 2020 года «Сырьевая компания»,

дочерняя компания БСК, заключила договор аренды лесного участка на горе Куштау для геологоразведочных работ с Министерством лесного хозяйства Башкирии.

Однако планы промышленной разработки Куштау вызвали протесты местных жителей, опасавшихся ухудшения экологической ситуации, и активистов, считающих шиханы, в том числе и Куштау, одним из символов Башкортостана. Надо отметить, что уничтожение любого из уцелевших шиханов резко обострило бы общую ситуацию в регионе, поскольку состояние с окружающей средой в Стерлитамаке и долине реки Белой тяжёлая. Более того, при существующих объемах производства соды, каждого из трёх сохранившихся шиханов все равно хватило бы только на пару десятков лет. Данное противостояние явилось беспрецедентным внутривнутриполитическим конфликтом в Башкирии из-за действия официальных властей, отдающих местные предприятия и землю, не заинтересованным в развитии региона. Действительно, мировое производство соды – более 42 млн тонн. У всех других предприятий нет шиханов. Как же они работают? Заявление, что содовый завод может работать исключительно на известняках из шиханов выглядело как лукавство.

В результате глава Башкортостана был вынужден дать обещание не разрабатывать Куштау, пока не будет найден компромисс. Действительно, сокращать объемы производства соды из-за нехватки сырья – тоже был не вариант, так как от продукции БСК зависят производства стекла, металлов и строительная отрасль по всей России. Также нельзя не учитывать тот факт, что БСК – это градообразующее предприятие, на котором трудятся более 10 тысячи граждан, которых руководство грозило уволить при сокращении сырья.

Когда ситуация получила широкий общественный резонанс, в конфликт вмешался президент Российской Федерации Владимир Путин поручил Генпрокуратуре разобраться с законностью сделки по снижению доли государства в БСК. «У государства было 62 %, а внезапно стало 38 %. И как результат – приоритеты работы компании резко изменились. Прошу также прокуратуру провести проверку законности сделки, в результате которой был утрачен контроль за этими активами со стороны государства», - сказал президент [2].

4 декабря 2020 года Арбитражный суд Башкортостана полностью удовлетворил иск генпрокуратуры Российской Федерации об изъятии акций БСК в пользу федерального агентства по управлению государственным имуществом (Росимущество). Таким образом БСК была национализирована и Башкирия получила в управление половину данного промышленного предприятия. Часть акций перешла в собственность республики, часть в доверительное управление [3].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время содовое производство БСК имеет использует прежнюю сырьевую базу. Предприятие углубило горизонт выемки известняка из подводной части шихана Шахтау с 15 до 18 метров. Это позволило обеспечить производственные мощности компании сырьем до 2027 года включительно и сохранить шихан Куштау, которого по мнению ученых хватило бы на такой же срок.

Процедура национализации БСК принесла ощутимые результаты, так выручка предприятия в 2021 году составила 58,9 млрд рублей, что на 22% выше показателей 2020 года; скорректированная EBITDA выросла до 21,1 млрд рублей (+15%). На фоне «встряски» от национализации, состоявшейся в прошедшем году, глобальных экономических проблем от пандемии компания расширяет и модернизирует производство, запускает новые международные проекты и остается одним из гарантов социальной стабильности в Башкирии.

Следует отметить, что противостояния экологов и промышленных конгломератов ранее проходили и в других регионах России. К примеру, в Воронежской области в 2012–2013 гг. местные жители успешно противодействовали работам на никелевых месторождениях Уральской горно-металлургической компании. А в 2006 г. в спор «Транснефти» с экологами пришлось вмешаться президенту Владимиру Путину, который поручил компании сдвинуть маршрут нефтепровода Восточ-

ная Сибирь – Тихий океан на 40 км севернее Байкала.

В заключении хотелось бы подчеркнуть, что в результате жесткого противостояния за сохранение важнейших ресурсов и достоинства регионов принимаются решения, при которых учитываются мнения всех участников, и в первую очередь, жителей. А ведь здоровье населения и сами люди – главный ресурс любого государства!

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мартыненко В.Б.**, Мулдашев А.А. Стерлитамакские шиханы – уникальное мировое наследие // Вестник Академии наук РБ. 2014, том 19, №2. С. 40-47.
2. **Путин** заявил о «выкачивании денег» из БСК на фоне протестов в Башкирии. URL: <https://www.rbc.ru/business/26/08/2020/5f466d529a794772c33f99f3?ysclid=I3y9fhxya7> (дата обращения: 02.06.2022).
3. **Путин** поручил передать половину национализированной БСК властям Башкирии. URL: <https://www.rbc.ru/society/31/03/2021/606486d79a794715f258bdac?ysclid=I3y97m6u12> (дата обращения: 02.06.2022).
4. **Сидоров В.В.** Исследователи края башкирского. Век XVIII. Уфа: Китап, 1997. 272 с.
5. **Чувашов Б.И.**, Пруст Ж.-Н., Буассо Т., Веннан Э., Черных В.В. К истории формирования Стерлитамакских шиханов (Раннепермские рифовые массивы Южного Предуралья) // Ежегодник 1995. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 1996. С. 25-34.



**ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ИЗУЧАЕМ ЭКОЛОГИЮ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ» КАК СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МИРОВОЗЗРЕНИЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА****АННОТАЦИЯ**

В данной статье рассматривается вопрос применения учебно-методического комплекса «Изучаем экологию на английском языке» как средства формирования экологического мировоззрения на ступени высшего образования. В статье показана важность определения реального уровня экологической грамотности студентов. Автором был проведен педагогический эксперимент для проверки эффективности использования авторского учебно-методического комплекса «Изучаем экологию на английском языке» средствами иностранного языка, и завершил исследование устный опрос студентов на предмет выявления готовности получать экологические знания на иностранном языке, тем самым расширив уже имеющееся экологическое мировоззрение.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В связи с глобальным экологическим кризисом, одним из признаков которого является отсутствие/нехватка экологического воспитания и образования, незнание законов природы, нарушение экологического законодательства, актуальным вопросом остается необходимость формирования новой мировоззренческой парадигмы, в которой будут преобладать экологические ценности; отношения, позволяющие сохранить устойчивость природной системы. Без учета экологических связей и отношений невозможно рассматривать жизнь современного социума, что заставляет пересмотреть прежние мировоззренческие представления о взаимодействии общества и природы и переосмыслить роль и место человека, общества, социальной системы в природе, в пространстве и во времени.

Изменение мировоззренческой парадигмы возможно с помощью общественных механизмов. Самым эффективным механизмом может и должна выступать система образования, которая располагает содержательными, методологическими и дидактическими инструментами и условиями для формирования у молодого поколения нового – экологического мировоззрения и преодоления глобальных экологических проблем.

Государство нацелено на повышение экологической грамотности обучающихся в рамках экологического образования, что отражено в ряде документов, а именно, в Федеральном законе "Об образовании в Российской Федерации" от 29.12.2012 N 273-ФЗ; Экологической доктрине РФ, одобренной распоряжением Правительства РФ от 31 августа 2002 г. № 1225-р; Указе Президента Российской Федерации от 31.12.2015 г. N 683 «О Стратегии

национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года»; Федеральном законе "О безопасности" от 28.12.2010 N 390-ФЗ; "Основах государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года" (утв. Президентом РФ 30.04.2012), Федеральном законе от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

Согласно историческим данным, система взглядов менялась по мере развития человечества и отражала мировоззрение передовой части человечества. Видеть и понять целостную картину мира, отражающую научно доказанные связи между объектами, явлениями окружающего мира, и закономерности, объясняющие динамику и статику естественных природных и социальных процессов помогает мировоззрение. Так, появление науки «экологии», послужило развитием нового экологического мировоззрения, а осознание экологических проблем служит укреплению данного мировоззрения.

Вопросам экологического мировоззрения как системе взглядов на окружающий мир посвящено большое количество публикаций, которые направлены на овладение экологическими знаниями, необходимыми для формирования экологического мировоззрения граждан, во всех учебных заведениях, независимо от профиля и направления обучения. Экологическое образование и воспитание направлены на расширение экологического мировоззрения.

Целью проведенного исследования стало формирование экологического мировоззрения студентов технического вуза средствами учебно-методического комплекса «Изучаем экологию на английском языке». Полученные данные можно использовать для дальнейшего расширения экологического мировоззрения в процессе преподавания различных дисциплин, в том числе иностранного языка.

Задачи данного исследования:

- рассмотреть понятия «экологическое мировоззрение»;
- проанализировать отношение студентов 1 курса технического вуза к экологическому образованию средствами иностранного языка;
- определить уровень фоновых экологических знаний учащихся как основу экологической грамотности при помощи иностранного языка;
- выявить готовность студентов получать экологические знания на иностранном языке в процессе обучения в техническом вузе;

- апробировать авторский учебно-методический комплекс «Изучаем экологию на английском языке» как средство формирования экологического мировоззрения средствами иностранного языка.

## 2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На страницах научной литературы понятие «мировоззрение» появилось в начале 18 века в аспекте философского учения.

На основании имеющихся трактовок «мировоззрение» можно представить, как систему определенных взглядов, позиций на окружающий мир. На становление мировоззрения (системы взглядов, оценок и образного представления о мире) оказывают знания, морально-этические ценности, убеждения, жизненная позиция, имеющийся опыт, научная и практическая деятельность человека, т. е. мировоззрение формируется через познание, наблюдение, практическую деятельность человека.

Очевидно, что огромную роль в формировании мировоззрения личности, в том числе экологического мировоззрения играет образование.

Среди работ отечественных педагогов в области экологического образования следует отметить труды В.С. Кучменко [1], С.В. Левиной [2], О.А. Лукашевич [3], А.А. Вербицкого [4], А.Н. Захлебного [5], А.Ф. Борискина [6], Л.В. Панфиловой [7], И.Д. Зверева [8], Н.Н. Моисеева [9, 10], И.М. Садикова [11], И.Т. Суравегиной [12], Е.А. Когай [13], Э.А. Турдикулова [14], Л.С. Колдомасовой [15], Е.Б. Плохотнюк [16], О.А. Чаловой [17] и др.

При анализе научной литературы, посвященной экологическому образованию, встречаются разнообразные мнения относительно экологического мировоззрения, которое рассматривается как:

- экологическое сознание (С. М. Вишняковой [18], О. П. Негроровым [19], В. И. Медведевым [20], А. Н. Новгородцевой [21] и др.);

- экологическое мышление (Л.М. Даутмерзаевой [22], В.Н. Васильевой [23], В. Ж. Метелевым [24] и др.);

- компонент экологической культуры (Н. Ф. Реймерсом [25], С. Н. Глазачевым [26-28], В. Н. Паньковой [29], Н. М. Мамедовым [30-32] и др.) и др.

Так, И. Д. Зверев интерпретирует «экологическое мировоззрение» как знания, касающиеся основных закономерностей и взаимосвязей в природе и обществе, эмоционально-чувственные переживания, эмоционально-ценностное и деятельностно-практическое отношение к природе, обществу, к действительности. Оно формируется в интеграции трех направлений: экологического сознания, нравственно-эстетического и деятельностно-практического отношения [8]. Следовательно, «экологическое мировоззрение» – это экологическая образованность, сознательное отношение к природе и практическое участие в улучшении природопользования.

Ряд ученых Г. А. Абрахматова [33], П. В. Полещук [34], Л. Р. Азизова [35], А. Л. Жохова [36], Э. И. Монозона [37] и др. считают высшее образова-

ние основной ступенью для формирования экологического мировоззрения. Мировоззренческая образовательная ситуация находится в активном поиске путей выхода из экологического кризиса. В рамках новой экологической мировоззренческой парадигмы образованию необходимо формировать экологические компетенции студентов-инженеров, владение которыми приведет к становлению экологически образованной личности, которая будет бережно и ответственно относиться к природе на протяжении всей своей жизни и профессиональной деятельности.

## 3. МЕТОДОЛОГИЯ

В 2020/21 учебном году на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) было проведено исследование, в котором приняли участие студенты 1 курса очной формы обучения Института №12 «Аэрокосмические наукоемкие технологии и производства» в количестве 143 человек. Студентам было предложено пройти опрос с целью определения отношения студентов к экологическому образованию средствами иностранного языка в рамках преподавания дисциплины «Иностранный язык» на кафедре И-14 «Иностранный язык для технологических специальностей», далее учащимся 1 курса (контрольной и экспериментальной группам) было предложено ответить на вопросы теста на русском языке, посвященного 5 основным экологическим проблемам, который помог определить уровень фоновых (базовых) экологических знаний. В первом семестре 2020/21 учебного года студенты экспериментальной группы в количестве 80 человек занимались по авторскому учебно-методическому комплексу (УМК) «Изучаем экологию на английском языке», разработанному О.А. Лукашевич, и параллельно по учебнику «Английский язык для инженеров» (автор Т.Ю. Полякова), а контрольная группа (63 человека) занималась только по учебнику предложенному Министерством образования и науки для технических вузов «Английский язык для инженеров» (автор Т.Ю. Полякова). В авторский УМК входит учебное пособие «Изучаем экологию на английском языке» [38], экологический англо-русский словарь-минимум [39], учебная программа интегрированного курса «Экология-английский язык» [40] под ред. профессора Л.И. Корниловой, курс рассчитан на студентов 1-4 курсов технических вузов в объеме 50 часов аудиторной и внеаудиторной работ. По завершению 1 семестра, студенты экспериментальной и контрольной групп написали тест на английском языке (20 вопросов, направленных на решение основных экологических проблем), показывающий уровень экологических знаний и умений на иностранном языке, затем обучаемые высказались о готовности получать экологические знания средствами иностранного языка.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные устного опроса продемонстрировали отношение студентов к экологическому образованию средствами иностранного языка, а именно, 30% учащихся хотят получать знания на иностранном языке в области экологии, 38% респондентов не проявили интереса получать экологические знания в рамках дисциплины «Иностранный язык» и 32% студентов сомневаются, что не смогут изучать «Экологию» на иностранном языке из-за плохого владения иностранным языком (см. рис.1).



Рис. 1. Отношение студентов 1 курса технического вуза к экологическому образованию в рамках дисциплины «Иностранный язык»

После опроса студенты написали тест на русском языке, состоящий из 20 вопросов по 5 основным экологическим проблемам, данные опроса представлены в таблице 1. Анализ данных свидетельствует о том, что учащиеся контрольной и экспериментальной групп владеют знаниями, полученными до вуза в одинаковом объеме.

Таблица 1. Уровни сформированности фоновых экологических знаний и умений у студентов 1 курса

№	Основные экологические проблемы	Низкий уровень (%)		Средний уровень (%)		Высокий уровень (%)	
		КГ	ЭГ	КГ	ЭГ	КГ	ЭГ
1	Проблемы загрязнения воздушного пространства	20	21	65	67	15	12
2	Проблемы загрязнения почвы	42	40	38	44	20	16
3	Проблемы загрязнения среды обитания	10	12	56	50	34	38
4	Проблемы загрязнения воды	38	34	39	37	23	29
5	Проблемы уничтожения растительного и животного мира	40	35	48	46	12	19

В соответствии с проблемой формирования экологического мировоззрения у студентов техниче-

ского вуза средствами учебно-методического комплекса «Изучаем экологию на английском языке» был проведен педагогический эксперимент. За основу проведения эксперимента был взят принцип единственного различия, которое заключалось в том, что в экспериментальной группе наряду с учебником «Английский язык для инженеров» для технических вузов (автор Т.Ю. Полякова) использовался разработанный авторский УМК «Изучаем экологию на английском языке» под ред. профессора Л.И. Корниловой. Эксперимент проходил 1 семестр, затем учащиеся ответили на 20 вопросов на английском языке, направленных на решение основных экологических проблем, показывающих уровень сформированности экологических знаний и умений на иностранном языке (см. табл. 2).

В ходе педагогического эксперимента были получены следующие результаты:

- студенты экспериментальной группы продемонстрировали более высокий уровень сформированности экологической компетенции по сравнению со студентами контрольной группы;

- у студентов, обучающихся с использованием авторского УМК, объем используемых языковых, речевых и грамматических средств намного шире благодаря коммуникативной направленности заданий.

Таблица 2. Результаты комплексной оценки уровня сформированности экологических знаний и умений у студентов 1 курса технического вуза

№	Основные экологические проблемы	Низкий уровень (%)		Средний уровень (%)		Высокий уровень (%)	
		КГ	ЭГ	КГ	ЭГ	КГ	ЭГ
1	Проблемы загрязнения воздушного пространства	22	8	64	68	14	24
2	Проблемы загрязнения почвы	40	18	36	56	24	26
3	Проблемы загрязнения среды обитания	14	14	54	58	32	28
4	Проблемы загрязнения воды	36	16	37	48	27	36
5	Проблемы уничтожения растительного и животного мира	36	12	46	60	18	28

Устный опрос позволил определить высокий уровень готовности (78%) студентов получать и расширять экологические знания на иностранном языке в процессе обучения в вузе, несмотря на проблемы связанные с уровнем владения иностранным языком (см. рис.2). Исследование также заставило обратить внимание студентов на важность и значимость экологического образования для будущих

инженеров. Большинство опрошенных считают, что экологическая грамотность имеет большое значение для будущей профессиональной деятельности.

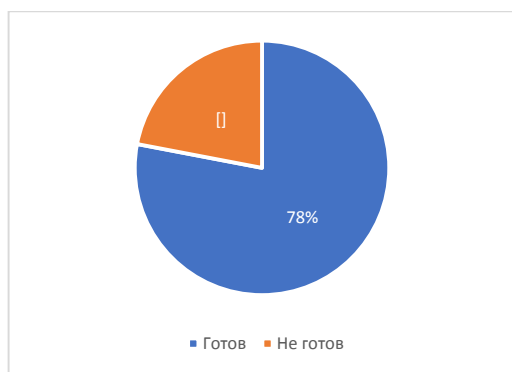


Рис. 2. Показания готовности студентов 1 курса технического вуза получать экологические знания на иностранном языке

## 5. ОБСУЖДЕНИЯ

В отечественной системе образования традиционно ряд естественнонаучных дисциплин (физика, биология, химия, география) и дисциплины гуманитарного цикла (философия, литература, иностранный язык) рассматриваются в качестве мировоззренческих, которые призваны формировать мировоззрение, в том числе и экологическое.

Проведенный эксперимент позволяет сделать вывод о том, что студенты заинтересованы в расширении экологических знаний и увеличении экологической грамотности.

Вступая во взрослую жизнь, человек уже владеет набором знаний и учений, в различных областях жизнедеятельности, у которого сформировалось мировоззрение, важно чтобы он имел правильные ориентиры в социальной жизни, профессиональной деятельности и мог строить свою систему отношений с другими людьми, обществом, социальной системой и природой. Поэтому, в процессе обучения у учащихся должна быть сформирована система представлений, отражающая систему отношений в обществе с различными элементами окружающей среды и научные представления об устройстве мира, которые составляют основу картины мироздания, позволяющей ориентироваться в природоохранной деятельности.

Комплексная оценка уровней сформированности экологической грамотности, знаний и умений студентов 1 курса технического вуза позволяет подтвердить довольно высокую продуктивность разработанного УМК, а также сформировать уровень экологической грамотности в экспериментальной группе значительно выше, чем в контрольной группе, которая будет способствовать формированию экологического мировоззрения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема подготовки экологически грамотных выпускников вуза актуальна как никогда. Современному обществу крайне необходимы специалисты, владеющие одним из важных компонентов

профессиональной подготовки, а именно, владеющие практически экологическими знаниями, которые позволят использовать их в профессиональной деятельности, а также для дальнейшего самообразования.

Авторский интегрированный УМК «Изучаем экологию на английском языке» помогает расширить представления об окружающем мире, почувствовать его красоту и неповторимость, понять необходимость беречь существующее великопие и восстановить утраченное. Учащиеся Московского авиационного института (национально исследовательского университета) изучают иностранный язык в течении 6 семестров и у них есть возможность расширить свои знания и умения, в том числе экологические, средствами иностранного языка, а авторский УМК будет выступать как одно из средств воспитания экологического мировоззрения

В программу, представленного УМК, предлагается также включить:

- изучение экологических проблем мира, страны, города, используя различные источники информации;
- организацию коллективной работы и индивидуальной исследовательской деятельности;
- проведение тематических выставок рисунков, фотографий для творческой реализации полученных знаний;
- оформление результаты проделанной работы на информационном экологическом стенде;
- проведение экскурсионных туров в воспитании экологического мировоззрения.

Успешность применения авторского интегрированного УМК в качестве средства формирования экологического мировоззрения учащихся очевидна у студентов формируется правильный экологический взгляд на любые события, происходящие в мире, возникает мотивация к здоровому образу жизни и экологизации профессиональной деятельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кучменко В. С.** Экологическое образование. Перспективы развития // Биология в школе. №5. 1993. С. 27-29.
2. **Левина С.В.** Экологическая тропа как эффективный педагогический фактор формирования экологического мышления студентов в условиях урбанизации: Дис. ... канд. пед. наук: 13.00.01: Самара, 2002. 204 с.
3. **Лукашевич О. А.** Теория и практика экологической подготовки курсантов военного вуза в иноязычном образовательном процессе: диссертация ... кандидата педагогических наук: 13.00.08 / Лукашевич Ольга Александровна; [Место защиты: Сам. гос. пед. ун-т]. Самара, 2008. 188 с.
4. **Вербицкий А. А.** Активное обучение в высшей школе: контекстный подход: метод. пособие / А. А. Вербицкий. М.: Высшая школа, 1991. 207 с.
5. **Захлебный А.Н., Дзятковская Е.Н.** Развитие общего экологического образования в России на современном этапе // Россия в окружающем мире – 2008. Устойчивое развитие: экология, политика, экономика: Аналитический ежегодник / Отв. ред. Н.Н. Марфенин; под общей редакцией Н.Н. Марфенина, С.А. Степанова. М.: Изд-во МНЭПУ, 2008. С.144-170.

6. **Борискин А.Ф.** Проектирование содержания и реализация методического обеспечения экологического образования школьников в естествознании: Дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02: Екатеринбург, 2002. 174 с.
7. **Панфилова Л.В.** Формирование экологической компетентности в процессе профессиональной подготовки учителя химии: Дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.08: Тольятти, 2002. 481 с.
8. **Зверев И. Д.** Экологическое образование и воспитание: узловые вопросы. Экологическое образование: концепции и технологии / И. Д. Зверев // Сборник научных трудов. Волгоград, 1996. С. 78.
9. **Моисеев Н. Н.** Экологическое мировоззрение / Н. Н. Моисеев // Философия экологического образования / под ред. И. К. Лисеева. М.: Прогресс традиция, 2001. С. 21-30.
10. **Моисеев Н. Н.** Экология и образование / Н. Н. Моисеев. М.: «ЮНИСАМ», 1996. 190с.
11. **Садиков И.М.** Развитие экологического образования учащейся молодежи Татарстана во второй половине XX века / Автореф. дисс. ... канд. пед. наук. 13.00.01: Казань. 2006. с. 25.
12. **Суравегина И. Т.** Экологии – учить! // Экология и жизнь. №1 (36). 2004. С. 32-33.
13. **Когай Е. А.** Экологическая парадигма культуры и образования / Е. А. Когай // Социально-гуманитарные знания. 2002. № 4. С. 18-119.
14. **Турдикулов Э.А.** Экологическое образование учащихся в процессе изучения предметов естественнонаучного цикла: (Физ. аспекты экологии) / Турдикулов Э. А. - Ташкент: Укитувчи, 1982. 103 с.
15. **Колдомасова Л.С.** Формирование экологической образованности студентов в процессе профессиональной подготовки: диссертация ... кандидата педагогических наук: 13.00.08. Магнитогорск, 2005. 165 с.
16. **Плохотнюк Е.Б.** Развитие экологической ответственности у студентов высших учебных заведений: диссертация ... кандидата педагогических наук: 13.00.08. Екатеринбург, 2002. 184 с.
17. **Чалова О. А.** Формирование системы фоновых экологических знаний у будущих специалистов авиационного профиля в иноязычном образовательном процессе / О. А. Чалова // Казанская наука. 2017. № 5. С. 189–192.
18. **Вишнякова С. М.** Экология и охрана окружающей среды: Толковый терминологический словарь / С. М. Вишнякова [и др.]. М.: Изд. дом «Всемирный следопыт», 1998. 480 с.
19. **Негробов О. П.** Словарь эколога / О. П. Негробов, В. Д. Логвиновский, Ю. В. Яковлев. 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: Издательский полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. 631 с.
20. **Медведев В. И.** Экологическое сознание: учебное пособие / В. И. Медведев, А. А. Алдашева. Изд. второе, доп. М.: Логос, 2001. 384 с.
21. **Новгородцева А. Н.** Социальная экология: учеб.-метод. пособие / А. Н. Новгородцева; науч. ред. Г. Б. Кораблева; М-во образования и науки Рос. Федерации; Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 76 с.
22. **Даутмерзаева Л.М.** Формирование экологического мышления в процессе изучения естественнонаучных дисциплин в средней общеобразовательной школе: Дис. ... канд. пед. наук: 13.00.01: Саратов, 2003. 153 с.
23. **Васильева В.Н.** Формирование экологического мышления в процессе образования/ Инновации и образование. Сборник материалов конференции. Серия Symposium, выпуск 29. СПб.: Санкт-Петербургское философское общество, 2003. С.273-287.
24. **Метелев В. Ж.** Формирование экологического стиля мышления будущего учителя начальной школы: Дис. ... канд. пед. наук: 13.00.01: Новокузнецк, 1999. 207 с.
25. **Реймерс Н. Ф.** Начало экологических знаний / Н. Ф. Реймерс. М.: МНЭПУ, 1993. 243 с.
26. **Глазачев С. Н.** Теоретические основы формирования экологической культуры учителя: диссертация ... доктора педагогических наук в форме науч. докл.: 13.00.08. Москва, 1998. 68 с.
27. **Глазачев С. Н.** Экологическая культура: сущность, содержание, технологии формирования / С. Н. Глазачев, С. С. Кашлев // Народная асвета. 2005. № 2. С. 33-37.
28. **Глазачев С. Н.** Экологическая культура и образование: опыт России и Беларуси / Международ. акад. наук (Рос. секция) [и др.]; Пед.: С.Н. Глазачев и др. М.: ТЭКО Центр, 2000. 614 с
29. **Панькова В. Н.** Экология и природопользование: Словарь-справочник / В. Н. Панькова. Новосибирск: «Сибирское соглашение», 2000. 212 с.
30. **Мамедов Н. М.** Основания экологического образования / Н. М. Мамедов; под ред. И. К. Лисеева. М.: Прогресс традиция, 2001. С. 72-89.
31. **Мамедов Н. М.** Экологическое образование: социокультурный контекст // Вестник КРАУНЦ. Гуманитарные науки. 2012. №2 (20). <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskoe-obrazovanie-sotsiokulturnyy-kontekst> (дата обращения: 05.06.2022).
32. **Мамедов Н. М.** Экологическое образование как условие устойчивого развития / Н. М. Мамедов, С. Н. Глазачев // Экологическое образование: концепции и технологии: сборник научных трудов. Волгоград, 1996. С. 16-26.
33. **Абрахматова Г. А.** Мировоззренческие парадигмы образования (социально-философский анализ: автореферат ... канд. филос. наук: 09.00.01: Алматы, 2010. 131 с.
34. **Полещук П. В.** Методика развития экологического мировоззрения у школьников: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.02: Омск, 2004. 215 с.
35. **Азизова, Л. Р.** Педагогические условия формирования экологического мировоззрения студентов технических вузов: дис. ... канд пед. наук: 13.00.08: Махачкала, 2013. 158 с.
36. **Жохов А. Л.** Как помочь формированию мировоззрения школьников. Книга для учителя и не только для него / А. Л. Жохов. Самара: Изд-во Самарский ГПУ, 1995. 228с.
37. **Моносзон Э. И.** Становление и развитие советской педагогики, 1917-1987: книга для учителя / Э. И. Моносзон. Москва: Просвещение, 1987. 220 с.
38. **Лукашевич О. А.** Изучаем экологию на английском языке: Учебное пособие// Под ред. профессора Л.И. Корниловой. Тольятти: ТВТИ, 2007. 96 с.
39. **Лукашевич О. А.** Экологический англо-русский словарь-минимум// Под ред. профессора Л.И. Корниловой. Тольятти: ТВТИ, 2007. 72 с.
40. **Лукашевич О. А.** Учебная программа интегрированного курса «Экология-английский язык» в военном вузе// Под ред. профессора Л.И. Корниловой. Тольятти: ТВТИ, 2007. 6 с.

А.Ю. Шелковников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия

## ФИЛОСОФСКИЙ АСКЕТИЗМ И СОВРЕМЕННАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА

### АННОТАЦИЯ

В докладе рассматривается аскетизм как одна из тенденций философского отношения к жизни. Идея нравственного совершенствования, сопряженная с воздержанием от материальных благ, так или иначе присуща философскому образу жизни. Путь знания сам по себе аскетичен, так как предполагает посвящение времени интеллектуальным занятиям, что ограничивает чувственные наслаждения. Таким образом, человек, посвящая свою жизнь изучению философии или научным исследованиям, ставит себя в позицию минимального потребителя, максимально бережно относящегося к естественным ресурсам. Сообщество интеллектуалов представляет собой социальную альтернативу потребительским ценностям.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Историческому пути философии всегда сопутствовал аскетизм. Аскетизм следует понимать как добровольное самоограничение во имя блага, а также как усилия на пути добродетели. Мы в основном связываем аскетизм с религиозным служением. Однако христиане заимствовали слово «аскеза» (греческое по происхождению) у стоиков. В стоицизме под аскезой понималась система духовных упражнений, ведущих к невозмутимому состоянию духа [1]. Для достижения такого состояния философ ограничивал себя в потреблении материальных благ, отказывался от многих жизненных удовольствий. В общем виде аскезу в данном контексте надо понимать как работу над собой. До стоиков аскетами называли атлетов, занимавшихся физическими упражнениями. Еще ранее аскетика понималась как обработка и украшение тканей. Мы видим, что семантика «аскетического» связывается с мастерством, упражнениями, совершенствованием. Но именно стоики придали «аскетизму» смысл духовного совершенствования. А в христианстве «аскеза» обрела непосредственно религиозно-этический смысл как отказ от жизненных благ во имя Божие, а также как духовные усилия, подвижничество на пути к спасению.

Несмотря на то, что термин предложили стоики, философы задолго до этого вели аскетический образ жизни, хотя проявлялось это по-разному. Яркий пример аскетизма представляет собой пифагорейская школа. Множество ограничений, налагаемых

на пифагорейцев, свидетельствует об аскетическом опыте: вегетарианство, ненасилие, обет неразглашения учения и др. Многие античные философы отрекались от своего социального положения. Сам феномен философской школы предполагает определенный изоляционизм, создание некоего «внутреннего круга», в котором действуют определенные правила, вступая в который, человек отказывается от многих тенденций «большого социума», привычек, стереотипов, удовольствий, целей и пр. черт обыденности. Образ жизни Сократа был довольно аскетичным. Идеями аскетизма пронизаны диалоги Платона. Основные школы эллинистического периода воплощают различные виды аскетизма. О стоиках мы уже говорили. Эпикурейцы, киники и скептики предлагали свои модели ограничения обыденного опыта. В этом смысле наиболее интересны эпикурейцы, так как они обычно ассоциируются с гедонизмом, тенденцией, противоположной аскетизму. Но последователи Эпикура, как известно, довольно жестко ограничивали себя от чрезмерного потребления материальных благ, чтобы избежать страданий. Во всех философских школах добровольное самоограничение ведет (или должно вести) к спокойствию духа, состоянию сознания, которое является целью для философа, и полагается как более совершенное состояние психики по отношению к общераспространенному. Т. е. аскетическая практика ведет к освобождению от страданий, присущих обыденной жизни, благодаря достижению более высокого состояния сознания, характеризуемого как *апатия*, *атараксия*, ведущего к *автаркии* (независимости, самостоятельности). Такое состояние ума можно понимать как бесстрашие. Отсюда идут широко распространенные представления о «невозмутимом философе», «философском отношении к жизни» [2].

### 2. АСКЕТИЗМ В ИНДИЙСКОЙ ФИЛОСОФИИ

Индийская философия аскетична по существу. Все индийские философы являлись подвижниками, аскетами. Две вневедические системы философии древней Индии – буддизм и джайнизм – явились результатом аскезы своих основателей, Будды и Махавиры. Индуистская философия связана с обосновани-



ем ритуально-аскетических практик ведической культуры. Аскетическая философия индуизма наиболее явно представлена в «Бхагавад-гите», философском тексте «Махабхараты», великой эпической поэмы древней Индии. В восемнадцатой главе «Гиты», которая называется «Совершенство отречения», раскрывается сущность аскетического опыта. «Отказ от деятельности ради удовлетворения материальных желаний великие мудрецы называют отречением от мира [санньясой]. А отказ от плодов всякой деятельности они именуют отрешенностью [тьягой]. Одни мудрецы говорят, что нужно отказаться от любой кармической деятельности как от порочной, а другие утверждают, что человек никогда не должен отказываться от жертвоприношений, благотворительности и аскезы. О лучший из рода Бхараты, теперь выслушай Мое мнение о том, что такое отрешенность. О тигр среди людей, в писаниях говорится о трех видах отрешенности. От жертвоприношений, благотворительности и аскезы нельзя отказываться, ибо они очищают даже великие души. Все это нужно делать без привязанности и без ожидания плодов, просто из чувства долга, о сын Притхи. Таково Мое окончательное суждение» (Бхагавад-гита, глава 18, тексты 2 – 6) [3].

Итак, жизнь в отречении полагается добродетельной и богоугодной. При этом аскетический опыт описывается в различных терминах. Жизнь в отречении называется *санньясой*. Это – четвертая стадия жизни благородного человека в ведическом обществе. Отрешенность как качество аскета называется *тьягой*. Существует еще сходный термин, означающий непривязанность к материальным объектам, – *вайрагья*. Усилия же, предпринимаемые в отшельнической жизни, именуются «*тапас*». Отказ от кармической деятельности поощряется в любом случае. Кармической называют деятельность ради ее плодов, результата. Само слово *карма* означает «работа», или «деятельность». Вместе с тем называются три вида благородной, или добродетельной, деятельности: жертвоприношение, благотворительность и *тапас*. Это – деятельность, предписанная священными писаниями, ведами. Но и ее выполнять следует отрешенно, аскетично, не привязываясь к ней психологически, ценностно, действуя исключительно из чувства долга. Таким образом можно освободиться от закона *кармы*, причинно-следственной обусловленности, царящей в материальном мире. Такой идеал деятельности, свободной от привязанностей, является «общеиндийским»; он характерен и для неиндуистских религий, таких, как буддизм и джайнизм. Соответственно, вместе с буддизмом этот аскетический идеал вышел далеко за пределы Индии.

Особую роль аскетизм играет в такой философской и практической школе, как *йога*. Вообще, путь *йоги* представляет собой аскетическую практику в полной мере. Но в более специальном смысле *тапас* является одной из пяти составляющих второй ступени *йоги*, *ньямы*. На первой ступени йог отказывается от насилия (*ахимса*), лжи (*сатья*), присвоения чужого (*астея*), накопления (*анариграха*) и вожделения (*брахмачарья*). На второй ступени йог дает обеты

чистоты (*шауча*), довольствования минимальными материальными благами (*сантоша*), претерпевания физических трудностей, возникающих в жизни отшельника (*тапас*), изучения священных писаний (*свадхьяя*) и посвящения жизни служению Богу (*шивара пранидхана*). И только после этого йог приступает к практике физических упражнений [4].

В буддизме восьмеричный путь освобождения от страданий представляет собой тщательно разработанную аскетическую практику [5].

Каков общий смысл аскетической практики в индийской культуре? В ее основе лежит интуиция ограничения антропологического опыта как средства обретения свободы. Причем в первую очередь – свободы от собственных страстей. *Мокиша*, или *мукти*, центральное понятие индийской классической философии, подразумевает освобождение от *кармы*, *сансары* (перевоплощений), страданий материального бытия (*дуккха*), которое достигается благодаря отречению от эгоистического сознания (*аханкары*). Человек должен отказаться от служения себе и своему ближайшему окружению, посвятив жизнь служению высшему целому, понимаемому как *Ишвара*, *Брахман*, *Пуруша*, т. е. Абсолют, Бог.

Такое поведение аскета, помимо всего прочего, имело и экологические следствия. Человек, ведущий отреченный образ жизни (*санньяси*), строил свою жизнь вне насилия, гармонично вписываясь в природу, служил образцом для подражания. Сословие *кишатриев* (военных) в Индии вело довольно агрессивный образ жизни. Многочисленные кровопролитные сражения, охота, всевозможные состязания наполняли жизнь правящего класса. Сословие *брахманов* (жрецов) также не было чуждо насилия, так как организовывало многочисленные жертвоприношения животных. В целом институт жертвоприношений в Индии представлял собой довольно расточительные мероприятия. В этом смысле отшельники, почитаемые как святые, в значительной степени снижали потребность общества в светских ритуалах, способствуя экологическому равновесию. Авторитет *санньяси* был чрезвычайно велик, и даже могущественные цари боялись прогневить святого человека. Аскеты ориентировались на священные писания индуизма – веды, упанишады, пураны, итихасы, в которых проповедовался идеал смиренного, ненасильственного образа жизни. В самих основаниях индуистской культуры был прописан аскетический добродетельный идеал, который структурировал общество (*варнашрама-дхарму*) и обеспечивал гармоничное сосуществование с природой [6].

### 3. АСКЕТИЗМ В ЖИЗНИ СОВРЕМЕННОГО ЧЕЛОВЕКА

Современный аскетизм можно подразделить на религиозный и светский. Религиозный аскетизм более понятен. Каждая религия определенным образом ограничивает человеческий опыт в соответствии со своими мировоззренческими и этическими представлениями, а также предписывает некоторые

усилия на духовном пути. Светский аскетизм - явление менее изученное и осмысленное.

Аскетизм связан со здоровым образом жизни. Люди, стремящиеся вести здоровый образ жизни, придерживаются определенных правил и налагают на себя ограничения в питании, отказываются от вредных привычек, выполняют физические упражнения. Все это соответствует общей программе аскетизма. К тому же, люди, ведущие ЗОЖ, нередко обращаются к практике хатха-йоги, что непосредственно связывает их с индуистским религиозным аскетизмом. Отдельно следует упомянуть о вегетарианстве. Вегетарианская диета может быть связана с ЗОЖ, занятиями йогой, этическими воззрениями, религиозными убеждениями. В любом случае, вегетарианство является показательной разновидностью современного аскетизма.

Аскетизм может быть связан с выраженной тенденцией некоторых современных людей и сообществ к минимализму. Последний заключается в отказе от ненужных вещей, жилплощади, роскоши, достатка, комфорта, всякого рода избыточности. Эта социальная тенденция может быть охарактеризована как опрощение жизни, в духе Л. Н. Толстого. Подобный аскетизм связан с этическими и экологическими воззрениями.

Аскетизм может быть также связан с бедностью, социально-экономическим неблагополучием, подчеркнута экономным образом жизни.

В связи с аскетизмом следует упомянуть волонтерство и благотворительность. Многие современные люди, помогая другим людям, животным, существенно ограничивают себя в материальных благах.

В некоторых случаях аскетизм может быть вызван психопатологией. Например, бредовой больной может отказываться от употребления какой-либо пищи, ношения какой-либо одежды и т. п.

Аскетизм может быть вызван политическими причинами. Например, политические голодовки.

Отчасти аскетизм связан с этикетом. Стараясь вести себя прилично, вежливо, люди ограничивают себя в некоторых проявлениях, иногда жертвуют собственным комфортом. Уступая место ребенку или пожилому человеку, гражданин ведет себя вежливо и аскетично, жертвуя комфортным расположением своего тела.

Своеобразной разновидностью аскетизма является практика походной жизни. Речь может идти о туристических походах, научных экспедициях, альпинизме и т. п. Как правило, имеются в виду природные путешествия. Люди уходят на какое-то время от цивилизации, погружаются в естественный мир природы, обходятся без привычных благ и комфорта, встречаются с множеством трудностей, жертвуя определенными культурными ценностями, а иногда и собственной жизнью. В этом явлении чувствуется так называемый «зов предков», стремление «вернуться к истокам», уйти от условностей цивилизованной жизни, а также эстетическая позиция, которую обычно называют «походной романтикой».

Отдельно стоит упомянуть так называемые экологические поселения. Речь идет об общинах, которые порывают с цивилизацией, пытаются обустроить свою жизнь, руководствуясь идеалами естественности, натуральности, экологичности, простоты, первозданности. Подобные явления нередко связаны с религиозностью, сектантством, субкультурами, но могут основываться и на стремлении к здоровью, чистоте, самобытности и т. п.

Возможен и эстетический аскетизм. Ценители искусства, претендующие на обладание утонченного художественного вкуса, могут отречься и изолироваться от массовой культуры, обыденного сознания и опыта, в том числе и в бытовой сфере.

Аскетические практики могут быть связаны и с ролевыми играми. Например, толкинисты так или иначе абстрагируются от актуальной социальной реальности, погружаясь в мир фэнтези. И в своей обыденной жизни они могут игнорировать общепринятые социальные ценности и блага.

Различные субкультуры также проявляют себя аскетически. Хиппи отрекались от современной цивилизации и буржуазных ценностей во имя простой, естественной жизни, свободной любви, сообщества единомышленников, покидали свои дома, странствовали и образовывали свои коммуны. Мирозрение таких современных аскетов заставляет вспомнить о философии киников, Руссо и Л. Толстого, а также американских трансценденталистов. Показательно, что, когда Бхактиведанта Свами Прабхупада основал в США Международное общество сознания Кришны (1966 г.), первыми его учениками стали хиппи. Впоследствии некоторые из них стали *зуру* этого религиозного движения, дав обет отречения от мира, *санньясу*. В этом случае мы видим непосредственный переход от современного светского аскетизма к традиционному индуистскому аскетизму, укорененному в так называемом кастовом обществе [7].

Можно говорить и о своеобразном традиционалистском аскетизме. Речь идет о культурных установках некоторых людей, в том числе и крупных мыслителей, отрицающих современность, прогресс, и уповающих на исконные, традиционные формы культуры. Это явление напоминает светское старообрядчество. Некоторые философы, как зарубежные, так и отечественные, были убежденными традиционалистами. Эта тенденция существует и сегодня.

Аскетизм может быть присущ и обществу в целом. Например, советское общество ориентировалось на идеалы, которые в каком-то смысле являлись аскетическими. Несмотря на то, что классики марксизма критиковали религиозный аскетизм как мракобесие, коммунистическая идеология, отрицающая ценности буржуазной цивилизации, отвергла потребительское сознание, тем самым проповедуя строгую, самоотверженную жизнь, наполненную сознательным трудом во имя определенных исторических целей. В любом случае, самоотверженность, самоотдача, верность делу ценились как проявления социального и личного героизма. Вообще, интерес-

но было бы сопоставить такие тенденции и идеалы, как аскетизм и героизм. Ведь подвижничество (в религиозном контексте) и представляет собой аскетический героизм и соотносится со святостью.

Наверное, можно говорить и о других проявлениях светского аскетизма, характерных для современного образа жизни. Так что этот список, проект классификации, является открытым и дискуссионным.

#### 4. ФИЛОСОФСКАЯ РЕФЛЕКСИЯ АСКЕТИЗМА

Философское мышление предполагает абстрагирование от жизненного опыта. Будучи поглощенными опытом жизни, всецело отдаваясь жизненному потоку, мы не в состоянии мыслить философски. Абстрагирование необходимо для занятия внешней позиции, положения наблюдателя жизни. Только на таком уровне осуществляется теоретическое мышление. Таким образом, теоретизировать, значит аскетически преодолеть обыденный опыт. Для мышления необходимо уединение, отвлечение от дел, специальные алгоритмизованные усилия мысли. Все это можно назвать интеллектуальным аскетизмом.

Философия начинается с воздержания от мышления о конкретном. Мы постоянно думаем о конкретных вещах. Научиться воздерживаться от подобных размышлений – первоначальная задача философа. В конкретном мышлении активно задействовано воображение. Оно, безусловно, отвлекает от оперирования философскими понятиями. Мышление в философском акте должно быть сосредоточено на понятиях, скажем, бытия, знания, субъекта и т. п. Причем мы должны не просто использовать слова «бытие» или «субъект», но наше внимание в процессе мышления должно быть сосредоточено на этих смыслах. Психологически это совсем не просто и не само собой разумеется. Можно говорить о бытии, а думать в это время о чем-то постороннем. Таким образом, философская сосредоточенность является условием философского размышления. Для достижения такой сосредоточенности необходимо отвлечь внимание от несущественного, не имеющего отношения к предмету мысли. Для такого размышления необходим интеллектуальный опыт, школа мысли, длительная и постоянная практика обдумывания философских проблем. Началом такой практики, как правило, является внимательное чтение философских текстов. Вдумчивое чтение неминуемо приводит к самостоятельному размышлению.

Итак, философствование предполагает умственную аскезу. В индийской философии путь знания называется *джняна-йогой* и сопоставляется с *карма-йогой*, путем действия. *Джняна* предполагает отказ от деятельности, тогда как *карма-йога* основана на принципе бескорыстной деятельности. Оба пути представляют собой различные виды аскетизма.

Необходимо связать аскетизм, самоограничение, с самопознанием. Для начала познания себя следует ограничить свой жизненный опыт, поставить себя в определенные рамки. Так начинается самонаблюдение – первый этап самопознания. Не ограничивая себя, мы живем, наслаждаясь жизнью (гедонистическая установка), и, разумеется, страдаем. Добровольно ограничивая себя в жизненных благах, мы обращаем внимание на себя, отвлекаясь от внешнего мира. Мы уже не поглощены происходящим с нами в действительности, а наблюдаем за собственными реакциями на эту действительность. Мы формируем внутреннее противоречие в своем сознании, происходящее от того, что мы воздерживаемся от желаемого. Это неизбежно фиксирует внимание на структуре нашей деятельности, актуализируя самоизучение. Внимание действующего субъекта обращается на себя.

Завершая эти рассуждения, скажем, что аскетизм является началом самопознания. Что делает человек, собираясь заняться чем-то серьезным? Он откладывает все дела и сосредоточивается на главном. В этом и видится сущность аскетизма как условия всякой добросовестной деятельности.

#### 5. АСКЕТИЗМ И ЭКОЛОГИЯ

В науке аскетизм проявляет себя на методологическом уровне как отказ от вненаучной деятельности. Ученый должен воздерживаться от ненаучных способов познания. Экология как наука занимается изучением сложных взаимосвязей в биосфере [8]. Она имеет свои приложения и следствия. Важнейшим направлением прикладной экологии является природоохранная деятельность. Негативные антропогенные факторы воздействия на биосферу, природе, можно охарактеризовать по двум параметрам – загрязнение и истребление. Экологическая этика в первую очередь предписывает воздерживаться от неумеренного загрязнения и уничтожения природных ресурсов. Понятно, что полностью устранить эти вредоносные факторы не удастся, так как сам факт существования техногенной цивилизации, какой бы разумной, экономной и гуманной она ни была, все равно наносит непоправимый ущерб природе. Цивилизация существует за счет природы, искусственное – за счет естественного.

Тем не менее, в целях сохранения природы и жизни на Земле необходимо существенно ограничить неблагоприятное воздействие на биосферу и сократить потребление природных ресурсов. Экология требует от человека и человечества аскетического воздержания от потребительской и загрязняющей деятельности. Еще раз подчеркнем, что речь идет об умеренном ограничении антропогенной деятельности в биосфере, так как все научные предложения должны быть реалистичными. С точки зрения философии экологии следует говорить об осознании того положения, что потребительское сознание, длительное время культивировавшееся в человеческой культуре, обнаруживает свою несостоятельность и безответственность. Гигантские соци-

альные силы направлены на поддержание и стимулирование человеческих потребностей. Можно сказать, что в этом – нерв современной цивилизации. Между тем, стоит задуматься об альтернативе культуре потребительства. Такой альтернативой является умеренный социальный и витальный аскетизм человека и человеческого сообщества, принципиально ограничивающий свою деятельность в биосфере. Здесь очень важно изменение целеполагания. Потребление материальных благ вообще не должно являться целью человеческой деятельности. Оно может быть только средством для выживания и относительно благоустроенного образа жизни. Цель должна быть этической – достойное существование человека в мире, помощь природе и человечеству. Философское образование может играть важную роль в формировании мировоззрения современного человека, учитывая, что философия преподается во всех вузах (в России). При анализе природы ценностей в курсе «Философии» желательно обращать внимание на то, что потребность в культивировании материальных благ является одной из ведущих ценностей (а иногда и сверхценностей) в современном обществе. Это, в свою очередь, ведет к серьезным проблемам этического, экологического, антропологического характера. В любом случае, культ материальных ценностей, потребительское сознание, способствует усилению экологического общепланетарного кризиса, приближает жизнь к катастрофическому завершению. Необходимо говорить о другом идеале, другой жизненной установке. Его обязательно называть аскетизмом. Но сущность непотребительского идеала выражается в совершенствовании самой деятельности, независимо от ее результата, в стремлении к мастерству. Совершенно исполняемая деятельность может сама по себе приносить наслаждение. В истории философии есть множество достойных примеров из жизни философов, не стремящихся к стяжанию материальных благ, озабоченных альтруистическими помыслами, постоянно совершенствующих свою созерцатель-

ную, рассудочную и практическую деятельность. История жизни и учений философов – настоящий учебник нравственного, ментального и физического аскетизма. Достаточно просто сосредоточить внимание на смысле жизнеучения великого мыслителя – и в нашем сознании сформируется возможный образец достойного поведения. Экология философского мышления может иметь и биогеографические следствия. Гармонично и интенсивно мыслящий человек придет к осознанию тщетности стремления к возрастанию своих потребностей и удовлетворения их. Думается, что человек возможного будущего – это не сверхпотребитель, паразитирующий в жизненном пространстве нашей планеты, а разумный, умеренный аскет, ищущий гармоничного сосуществования в пределах своего распространения и реализующий его.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адо П.** Духовные упражнения и античная философия / Пер. с франц. при участии В. А. Воробьева. М.; СПб. Изд-во «Степной ветер»; ИД «Коло», 2005. 448 с.
2. **Античная философия:** Энциклопедический словарь. М.: Прогресс-традиция, 2008. 896 с.
3. **Бхактиведанта Свами Прабхупада А. Ч.** Бхагавад-гита как она есть / Пер. с англ. Изд. 4-е, испр. М.: The Bhaktivedanta Book Trust (Фонд «Бхактиведанта»), 2018. 976 с.
4. **Айенгар Б. К. С.** Йога-сутры Патанджали. Прояснение / Пер. с англ., 6-е изд. М.: Альпина нон-фикшн, 2016. 386 с.
5. **Радхакришнан С.** Индийская философия В 2 тт. М.: «Миф», 1993. 623 с., 731 с.
6. **Индийская философия:** Энциклопедия / Отв. ред. М. Т. Степанянц; Ин-т философии РАН. М.: Вост. лит.; Академический Проект; Гаудеамус, 2009. 950 с.
7. **Сатсварупа дас Госвами.** Прабхупада. Человек. Святой. Его жизнь. Его наследие. М.: Бхактиведанта Бук Траст, 1993. 507 с.
8. **Биологический энциклопедический словарь** / Гл. ред. М. С. Гиляров; Редкол.: А. А. Баев, Г. Г. Винберг, Г. А. Заварзин и др. М.: Сов. энциклопедия, 1986. – 831 с.

*В.В. Хоминская*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ОБЩЕСТВО ПОТРЕБЛЕНИЯ: ОПАСНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной статье рассматривается актуальный вопрос влияния общества потребления на процессы, происходящие в современном образовании. Акцентируется внимание на опасностях, которые несет понимание образования как потребительской услуги. Анализируются тенденции социокультурных трансформаций в обществе в целом и в системе образования, сопряжённые с феноменом потребительства. В статье подчёркивается необходимость определения новой образовательной стратегии образования как системообразующего фактора современного социокультурного развития страны.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Концепт «общество потребления» появился в XX веке в социологических, философских, психологических, экономических работах. Анализ его смыслового значения был связан с необходимостью дать характеристику общества, в котором потребление стало играть важную, если не определяющую роль.

Э. Фромм в статье «Человек одинок» (1966 г.) пишет, что мир всеобъемлющего потребления, который создал сам современный человек, стал причиной его «одиначества». В обществе, сосредоточенном на производстве, продаже и потреблении, человек ощущает себя «товаром, который надо по выгоднее продать на рынке». Потребление, превращённое в самоцель, становится причиной «отчуждённости» человека от своей сущности, от истинного, реального «я». Одну из особенностей жизни современного человека Э.Фромм видит в подавлении интереса к важнейшим сторонам человеческого существования [1].

Экзистенциальное противоречие «иметь или быть» существовало во все времена, вопрос в том, как осмысляются в обществе подлинные основы человеческого бытия.

Что касается общества потребления, то, как справедливо писал Ж.Бодрийяр, это не просто общество изобилия, это общество, в котором потребление сделалось главным содержанием общественной жизни [2].

### **2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО ОБЩЕСТВА**

Современную действительность характеризуют глубокие изменения во всех областях человеческой жизни - экономике, политике, культуре, связанные с процессом глобализации. Известно, что социокультурные трансформации в общественном сознании происходят в переломные исторические периоды. В России эти изменения произошли в условиях распада государства, смены общественного строя, передела собственности. Процесс глобализации пронизывает все уровни общественного сознания. Этот процесс отличается агрессивностью и представляет угрозу всему жизненному миру человечества. Об этом писали философы А.Зиновьев (он назвал глобализацию «западнёр»), А.Панарин, В.Миронов.

Осмысление явлений, связанных с утверждением общества потребления в России в условиях глобализации нашло своё отражение в публикациях отечественных исследователей. Рассматривая и анализируя различные аспекты современного общества, авторы выражают обеспокоенность по поводу негативных явлений, которые порождает общество потребления в формировании определённого образа жизни, в идеологии, культуре, в системе образования.

### **3. ОПАСНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ**

В условиях современных социокультурных трансформационных процессов образование оказывается в центре происходящих изменений.

Сегодня остро необходимо критическое осмысление современного состояния системы образования, которое в определённый момент превратилось в сферу услуг, формирующую «квалифицированного потребителя», что фактически стало угрозой для образования. В глобальном коммуникационном пространстве, где доминирует потребительская культура, наша система образования утратила свою самостоятельность, национальную специфику, превратилось в рыночную услугу.

В работах современных отечественных исследователей есть различные направления в анализе

этой чрезвычайно актуальной проблемы с точки зрения влияния общества потребления на систему образования: образование как предмет потребления, как потребительская услуга, как ценность в обществе потребления, проникновение потребительской культуры в сферу образования и др.

Сегодня же представляется вполне правомерной постановка вопроса более острая. Речь идёт об опасностях для современной системы образования.

Если следовать за Э.Фроммом, Ж.Бодрийяром и другими мыслителями, то общество потребления искажает суть человеческих отношений, вытесняет традиционные ценности, связанные с культурой, моралью [1, 2].

В нашей стране переход образования на рыночные отношения обусловил развитие образовательной системы в направлении решения прагматических, функциональных задач. В стремлении войти в мировое образовательное пространство долгие годы шло копирование западных моделей и стандартов. Но, как справедливо пишет В.В.Миронов, не всегда осознавался тот факт, «что процессы изменения должны учитывать не только общие тенденции развития, но и специфику собственной культуры» [3].

Реформа национальной системы образования, которая сегодня стоит на повестке дня, должна исходить из того, что сфера образования имеет системообразующий культурный характер и влияет на все стороны общественной жизни.

В концептуальном смысле образование – это деятельность, которая направлена на становление (формирование) личности в соответствии с заданными образами общества и государства, и включает в себя два взаимообуславливающих друг друга процесса: обучение и воспитание.

Эти основные смыслы зафиксированы в Федеральном законе «Об образовании», где образование характеризуется как:

- целенаправленный процесс воспитания и обучения, осуществляемый в интересах человека, семьи и государства,
- как совокупность приобретаемых знаний, умений и навыков, ценностных установок в целях интеллектуального, духовно-нравственного, творческого, профессионального развития человека.

Но в этом же законе зафиксирован термин «образовательная услуга». Неадекватность этого термина, более того, его опасность для сферы образования были предметом жарких дискуссий, но не сломили идеологов общества потребления. После долгих обсуждений сегодня уже на государственном уровне прозвучало, что образовательная услуга – это ошибочное понятие, которое будет исключено из закона об образовании. Новая реальность, в которой наша страна оказалась сегодня, заставила пересмотреть ценностные ориентиры в образовательной политике.

Но пока опасности остаются. Одна из них состоит в том, что наше образование вновь оказывается в условиях очередной модернизации, следовательно, в нестабильной ситуации. А «нестабильность все-

гда сопровождается сменой и деформацией системы ценностей» [3].

В условиях длительных реформ в отечественной системе образования произошли серьёзные процессы деформации. В научном, экспертном и педагогическом сообществе существует понимание и поиск путей к их преодолению. Об этом свидетельствуют широкие дискуссии, касающиеся преобразования отечественной системы образования по не оправдавшим себя западным моделям.

Сегодня очевидно, что речь должна идти о проблемах, которые угрожают сохранению уровня образования, высокого образовательного потенциала, который всегда был нашим национальным достоянием.

Одной из проблем является обесценивание самого понятия «образование», девальвация знания как такового. Общество потребления трансформировало характер взаимодействия между преподавателем и студентом, учителем и учеником. Очевидно снижение значимости и влияния учителя, преподавателя, которые выступают лишь как посредники в передаче знаний. Образование теперь не является чем-то уникальным, преподаватель – не единственный носитель знания, которое в информационном обществе стало доступным для всех. В результате введения ЕГЭ его долгосрочными последствиями может стать разрушение всей системы школьного образования, основанного на передаче знаний.

Наше общество долго находилось в условиях, когда ему навязывалась идея, что критерием воспитанности образованного человека является рынок. Поэтому главной целью образования стала подготовка специалиста, ориентированного на успешную адаптацию и интеграцию в мир рыночных отношений: образованность подменяется дипломированностью, профессионализм – умением устроиться и приспособиться. Сегодня молодежь ориентирована на получение аттестатов, дипломов, а не систематических знаний. В общественном сознании присутствует так называемая «имиджевая» роль образования. Принадлежность к особому «образовательному» миру со свойственными ему жизненными установками и предпочтениями, возможность приобретения высокой самооценки и повышения собственной оценки в глазах окружающих создают ощущения избранности и особости, которые являются частью современного имиджа молодого поколения [4].

Характерная для современного общества простота и доступность потребления создаёт и в образовательной сфере иллюзию доступности, лёгкости усвоения знаний. Образовательная деятельность вынуждена встраиваться в этот контекст. В этой связи перед педагогами ставятся задачи создавать (производить) новые образовательные программы, вузовские и школьные, курсы лекций, которые необходимо подстроить под запросы потребителей, то обновляя, то упрощая, то сокращая содержание. Но этот процесс бесконечен, современному потребителю нужны постоянно меняющиеся и недолговечные продукты. Система образования, состоящая



исключительно из функциональных знаний, не подкрепленная ни духовными ценностными ориентирами, ни фундаментальными научными познаниями, очень быстро устаревает, становится неактуальной, а потому оторванной от «реалий жизни». «Одноразовые», «недолговечные», механические знания составляют содержание системы образования общества потребления [5].

#### 4. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

В связи с этим остро стоит вопрос о таком приоритете российской системы образования как его опора на фундаментальную науку. Возвращение высшего образования к фундаментальности – важнейшая задача, которая должна стоять во главе новых реформ в образовательной сфере. Вместе с тем, образование должно удерживать баланс между фундаментальными знаниями и практичными нововведениями в сфере науки и технологий [6].

Подчеркивая, что образование является системообразующим фактором отечественной культуры, необходимо заново осмыслить его культурно-воспитательные функции. Та модель образования, которая сложилась за последние годы, менее всего была ориентирована на эту проблему, трактуя её как идеологическую. В результате появилась опасность подавления национальной культуры и национальных традиций, утраты духовных ценностей. Господство массовой культуры стало мощным фактором для формирования новых «псевдоценностей».

Стремительное развитие современных событий обуславливает необходимость рассматривать задачи

образования в условиях новой реальности. Недостаточно видеть реформу образования только в отказе от Болонской системы. Стоит острая задача определения новой стратегии отечественной системы образования, освобождения его от потребительской идеологии, смены парадигмы – каково общество, таково и образование. Определение путей и целей развития образования – это определение будущего социального развития страны в самом широком смысле. Поэтому очередная реформа образования должна быть теоретически осмыслена и широко обсуждена в научном и преподавательском сообществе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фромм Э.** Человек одинокий. Перевод с английского Р. Облонской. М: «Иностранная литература», 1966, №1. с.230-233.
2. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. Его мифы и структуры / Пер. с фр., послесл. и примеч. Е. А. Самарской. М.: Республика; Культурная революция, 2006. 269 с.
3. **Миронов В.В.** Размышления о реформе российского образования. М., 2014. С. 4 – 5.
4. **Напсо М.Д.** Образование как потребительская услуга // Современное образование. 2019. №1(19). С.81 - 88.
5. **Бегалиева К.К, Ашилова М.С.** Влияние общества потребления на систему образования // Вестник Новосибирского гос-го педагогического ун-та. 2018. Том 8, № 2.
6. **Ильин А. Н.** Квалифицированный потребитель – цель системы образования? // Философия и гуманитарные науки в информационном обществе. 2014. № 4. С. 49–57.

*О.Б. Власенко*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ

### АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрена проблема энергосбережения, которая является одной из главных в сфере охраны окружающей среды. Подчеркнута необходимость правового регулирования общественных отношений в области энергосбережения и экологии. Проанализированы правовые нормы, закрепляющие поведение субъектов гражданских правоотношений в сфере энергосбережения и охраны природы. Рассмотрена роль государственных и общественных организаций в решении вопросов энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Сделаны выводы о необходимости совершенствования законодательства, регулирующего сферу экологии, усиления государственного и общественного контроля за охраной окружающей среды.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Статья 1 Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009г. № 261-ФЗ гласит, что энергосбережение – это реализация организационных, технических, технологических и иных мер, направленных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования [1].

Энергосбережение играет ключевую роль в предотвращении экологического кризиса, в решении одной из самых важных задач человечества. Современная экономика, организация, структура и состояние хозяйственной деятельности основаны на использовании энергетических ресурсов, запасы которых увы истощаются и не возобновляются.

Каждый гражданин и каждое предприятие оказывает определенное воздействие на окружающую среду. Физические и юридические лица используют единые источники жизнеобеспечения. Благодаря этим источникам - электрическим и тепловым сетям, водопроводу, газопроводу, через торговые, бытовые, коммунальные организации и предприятия, участники гражданских правоотношений получают те или иные материальные блага. Если каждый индивидуум будет бережно относиться к расходованию природных ресурсов, экономить электроэнергию, воду, сокращать употребление пластиковых пакетов, то это будет способствовать предотвращению экологического кризиса.

Экологический кризис – это критическое состояние окружающей среды, вызванное ее загрязнением и хищническим отношением к природе [2].

Необходимо экономно вести потребление электроэнергии в быту, осознанно перейти к ресурсосбережению в доме, экономить средства на оплату потребляемых ресурсов.

Проблема энергосбережения актуальна не только для всех физических и юридических лиц, но и для регионов, государств, всего мира.

Экономия электроэнергии помогает формировать культуру энергосбережения – это разумно бережливое потребление электроэнергии, снижение собственных затрат с целью минимизации воздействия на окружающую среду, применение новых технологий и использование энергетически эффективных бытовых приборов и электрических ламп.

Что же в обществе понимается под энергосбережением?

Энергосбережение представляет собой совокупность мероприятий по сохранению и рачительному использованию электричества и тепла. Энергосбережение стало одной из главных задач человечества из-за дефицита основных энергоресурсов, возрастающей стоимости их добычи, а также в связи с неблагоприятными прогнозами в области экологии.

## 2. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ – ОДНА ИЗ ГЛАВНЫХ ЗАДАЧ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

### 2.1. Право - регулятор энергосбережения

В области энергосбережения основным нормативным правовым актом является Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009г. № 261-ФЗ.

Законодатель принятием данного закона создал правовые, экономические и организационные основы стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

В вышеуказанном федеральном законе даются следующие понятия:

энергетическая эффективность – это характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к

продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю;

энергетический ресурс – носитель энергии, энергия которого используется или может быть использована при осуществлении хозяйственной или иной деятельности, а также вид энергии (атомная, тепловая, электрическая, электромагнитная энергия или другой вид энергии);

вторичный энергетический ресурс – энергетический ресурс, полученный в виде отходов производства и потребления или побочных продуктов в результате осуществления технологического процесса или использования оборудования, функциональное назначение которого не связано с производством соответствующего вида энергетического ресурса [1].

В соответствии с «Критериями отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III, IV категорий», одним из таких критериев является осуществление на объекте деятельности по обеспечению электрической энергией, газом, паром с использованием оборудования с установленной электрической мощностью 250 МВт и более.

Энергосбережение основано на использовании энергосберегающих технологий, является самым дешевым и экологически чистым «источником» энергии. Энергосбережение ведет к экономии электроэнергии, призвано уменьшить ее потери.

Правовое регулирование в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности осуществляется на следующих основополагающих началах:

- государственная поддержка и стимулирование энергосбережения;
- обязательность использования энергетических ресурсов с учетом ресурсных, производственно-технологических, экологических и социальных условий;
- необходимость эффективного и рационального использования энергетических ресурсов;
- комплексное проведение мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности.

## **2.2. Энергосбережение как мера защиты окружающей среды**

С каждым годом производство топлива и энергии все дороже обходится человеку, при этом люди начинают понимать необходимость прекращения бессмысленного расточительства электроэнергии, которое является существенной брешью в семейном бюджете.

Повышаются расходы на электроэнергию еще и из-за того, что у людей в жилых помещениях появляются все больше электроприборов.

Поэтому одним из основных принципов работы современного дома должен стать принцип экономии энергии.

Несмотря на активное внедрение энергосберегающих источников света, расход электроэнергии на освещение остаётся значительным. Применение

более эффективных источников света нередко приводит не столько к экономии электроэнергии, сколько к избыточной освещённости и антропогенному световому загрязнению окружающей среды. Ключевыми мероприятиями оптимизации потребления электроэнергии на освещение являются:

максимально рациональное использование дневного света (рациональное размещение и оптимальная площадь окон, применение оптимального режима бодрствования, максимально совпадающего со световым днём);

повышение отражающей способности интерьера и экстерьера (светлые наружные стены рядом стоящих зданий повышают освещённость в помещениях в дневное время за счёт отражения естественного света в окна);

оптимальное размещение световых источников (местное освещение, направленное освещение);

использование осветительных приборов только по необходимости, перевод освещения в дежурный режим, когда оно меньше требуется (например, уличное освещение с 23-00 до 6-00 часов);

повышение светоотдачи существующих источников (замена люстр, плафонов, удаление грязи с плафонов, применение более эффективных отражателей) [3].

Для граждан очень актуален вопрос: как экономить электроэнергию по месту жительства? Например, можно составить энергетический паспорт дома. Далее посмотреть, сколько мы тратим электричества, когда живем обычной жизнью и не очень следим за экономией электроэнергии. Также поставить дома условие: экономить и зря не расходовать электрическую энергию. Предложить управляющей компании заменить лампы в помещениях жилого дома на энергосберегающие.

Реализация потенциала энергосбережения позволит высвободить значительные объемы ископаемого топлива, сократить выбросы углекислого газа и повысить качество жизни населения [4].

### Использование альтернативных источников энергии

Энергетика и экология – это два понятия, неразрывно связанные друг с другом.

Развитие современных инновационных технологий требует конвергенции самых различных научных школ и направлений с обязательной экологической компонентой.

С этой точки зрения экология и энергетическая эффективность представляют собой взаимодополняющие друг друга части, а в составе единого целого приобретают мощный синергетический эффект. Их слияние на законодательном уровне, где они интегрируются в национальную законодательно-правовую систему в качестве ее обязательных элементов, обеспечивает соблюдение экологических и энергосберегающих нормативов всеми участниками экономики [5].

В соответствии со Стратегией национальной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента РФ от 02 июля 2021 года №

400 одними из национальных интересов РФ на современном этапе являются: охрана окружающей среды, сохранение природных ресурсов и рациональное природопользование, адаптация к изменениям климата [6].

Энергетика – как двигатель мировой экономики – находится в центре повестки дня в области устойчивого развития до 2030 года.

При этом в решении задач обеспечения доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех должны учитываться огромные возможности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [7].

Из-за загрязнения почвы, воды, воздуха на Земле происходит так называемый «парниковый эффект». Вследствие этого температура на Земле повышается и тем самым запускаются другие необратимые последствия. Помимо этого, следует отметить, что такие источники энергии как нефть, газ и уголь трудно восполняются, а значит, в будущем из-за их бесхозяйственного использования они могут иссякнуть.

Но существуют источники, которые способны предоставить альтернативную энергию. Это – энергия солнца, ветра, воды, земли (вышеуказанные виды энергии отнесены к неиссякаемым или возобновляемым источникам); биологическое топливо.

Солнечную энергию получают с помощью солнечных электростанций. К достоинствам энергии солнца можно отнести доступность, неиссякаемость и полную безопасность для окружающей среды.

К минусам относится зависимость от погодных условий и времени суток, высокая стоимость подобных энергетических установок и то, что для эксплуатации солнечных электростанций требуется использование больших площадей.

Для получения энергии ветра используют различные приспособления, например, ветряные генераторы, «ветряки», ветряные мельницы, паруса. К плюсам использования ветряной энергетики можно отнести то, что ветряные энергетические станции безопасны, просты в обслуживании, не требуют длительной установки и больших затрат.

Существуют и недостатки, например, мощность такой энергетической установки не зависит от человека, а зависит от силы ветра. Существует опасность для птиц, некоторых животных, происходит ухудшение приема теле- и радио сигналов, изменение в ландшафте.

Энергию воды получают, используя гидроэлектростанции. Энергия, полученная подобным образом, достаточно дешевая. К отрицательным качествам относится то, что возводить гидроэлектростанции можно только в определенных местах.

Рассмотрим еще один альтернативный источник энергии – энергию Земли.

Достоинство этого метода, то, что он не зависит от условий окружающей среды. Минусы – высокая стоимость строительства и обслуживания геотермальных станций.

Еще один альтернативный источник энергии – «биологическое топливо». Под данным понятием

понимают топливо, которое получено из животного или растительного сырья.

Виды данного топлива:

твердое биологическое топливо – это дрова, щепки, солома;

жидкое топливо – представлено в основном биологическим этаноном (производят из сахарного тростника и кукурузы) и биологическим дизелем (вырабатывают из животного и растительного жира);

газообразное биологическое топливо представлено биологическим газом.

Активное функционирование и развитие промышленных и энергетических предприятий приводит к целому ряду проблем экологии.

Энергосбережение могло бы способствовать их разрешению. Принятие на государственном уровне программы по эффективному использованию ресурсов стало важным шагом по пути решения первоочередных задач в области экологии. Энергосбережение – важнейшая составляющая часть этого процесса [8].

### 3. ЭКОЛОГИЯ – ДЕЛО КАЖДОГО

#### 3.1. Экология как научная основа рационального природопользования

Экология (в переводе с греческого языка означает дом, жилище, местопребывание) – наука об отношениях растительных и животных организмов и образуемых ими сообществ между собой и окружающей средой.

Экология включает различные философские, социологические, экономические, географические и другие аспекты (например, экология города, техническая экология, экологическая этика) [9].

В главе второй Основного закона РФ говорится, что каждый имеет право на благоприятную окружающую среду, достоверную информацию о ее состоянии и на возмещение ущерба, причиненного его здоровью или имуществу экологическим правонарушением.

Помимо этого, Конституция РФ возлагает на каждого человека и гражданина обязанность сохранять природу и окружающую среду, бережно относиться к природным богатствам. Также законодатель отмечает, что в нашем государстве поощряется деятельность, способствующая экологическому благополучию [10].

Правовая охрана природной среды занимает ведущее положение в системе мер по решению экологических проблем, так как регулирование отношений в сфере взаимодействия общества и природы должно быть обеспечено системой правовых средств, обеспечивающих благополучную для окружающей среды деятельность физических и юридических лиц.

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002г. № 7-ФЗ определяет правовые основы политики нашего государства в вопросах охраны природы и обеспечения экологической безопасности.

В вышеуказанном законе дается определение следующих понятий:

окружающая среда - совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов;

природная среда (природа) - совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов;

компоненты природной среды - земля, недра, почвы, поверхностные и подземные воды, атмосферный воздух, растительный, животный мир и иные организмы, а также озоновый слой атмосферы и околоземное космическое пространство, обеспечивающие в совокупности благоприятные условия для существования жизни на Земле;

охрана окружающей среды (природоохранная деятельность) - деятельность органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления, общественных объединений и некоммерческих организаций, юридических и физических лиц, направленная на сохранение и восстановление природной среды, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и ликвидацию ее последствий [11].

В соответствии с Экологической доктриной Российской Федерации, одобренной распоряжением Правительства РФ от 31 августа 2002 года № 1225-р должны быть обеспечены радиационная и химическая безопасность, а также снижение риска воздействия на здоровье человека и окружающую среду при проектировании, строительстве, эксплуатации промышленных и энергетических объектов [12].

### **3.2 Юридическая ответственность за нарушение правил охраны природы**

Экологическое правонарушение состоит в виновном противоправном деянии, наносящем вред окружающей среде и здоровью человека.

Должностные лица и граждане несут за такого рода правонарушения дисциплинарную, административную либо уголовную, гражданско-правовую ответственность, а предприятия, учреждения, организации – административную и гражданско-правовую ответственность.

Имущественная (гражданско-правовая) ответственность состоит в возмещении убытков: реального ущерба и упущенной выгоды.

Привлечение к имущественной ответственности производится на основании решения суда по иску потерпевшего или членов его семьи, прокурора, уполномоченного на то органа государственного управления, общественного объединения.

Потерпевшей стороне должен быть возмещен имущественный ущерб и компенсирован моральный вред, то есть физические и нравственные страдания, причиненные в результате нарушений экологических требований.

Хозяйствующие субъекты, причинившие вред окружающей среде в результате ее загрязнения, истощения, порчи, уничтожения, нерационального использования природных ресурсов, обязаны его полностью возместить.

Размер ущерба окружающей среде может быть определен, исходя из фактических затрат на восстановление природных и природно-антропогенных объектов, с учетом понесенных убытков, в том числе упущенной выгоды.

Дисциплинарная ответственность может наступать за экологические правонарушения, совершенные работниками в процессе исполнения ими своих трудовых обязанностей. Дисциплинарные взыскания применяются администрацией за нарушение тех экологических правил, исполнение которых входит в круг должностных обязанностей нарушителя.

Также работник может понести полную материальную ответственность на основании пункта 5 статьи 243 ТК РФ – причинение ущерба в результате преступных действий, установленных приговором суда; и на основании пункта 6 статьи 243 ТК РФ – причинение ущерба в результате административного проступка, если таковой установлен соответствующим государственным органом [13].

Законодательством Российской Федерации об административных правонарушениях предусмотрена административная ответственность за целый ряд экологических правонарушений. К таким правонарушениям относятся:

несоблюдение экологических требований при осуществлении градостроительной деятельности и эксплуатации предприятий, сооружений и иных объектов (ст.8.1);

сокрытие, умышленное искажение или несвоевременное сообщение полной и достоверной информации о состоянии окружающей среды и природных ресурсов лицами, обязанными сообщать такую информацию (ст.8.5);

несоблюдение лицами, ответственными за содержание многоквартирных домов, требований энергетической эффективности (ст. 9.16) [14].

Уголовная ответственность за экологические правонарушения наступает в случаях наиболее общественно опасных деяний за экологические преступления такие, как нарушение правил охраны окружающей среды при производстве работ, загрязнение вод, загрязнение атмосферы, загрязнение морской среды, экоцид [15].

В Российской Федерации контроль за выполнением законных предписаний в области природопользования, охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности осуществляют государственные органы и общественные организации.

Государственный контроль представляет собой надведомственный контроль компетентных органов государства, осуществляемый в отношении всех министерств и ведомств, предприятий и организаций независимо от их подчиненности.

Государственный контроль за охраной окружающей среды осуществляет Министерство природ-

ных ресурсов и экологии РФ, а также высшие органы государственной власти республик, входящих в состав РФ.

В городах, поселках городского типа и селах, контроль за охраной и состоянием зеленых насаждений, качеством воды, почвы ведут главы соответствующих администраций.

Общественные организации осуществляют контроль за охраной природы, исходя из предоставленных им законом прав.

Научные коллективы, общественные объединения имеют право проводить общественную экологическую экспертизу по собственной инициативе. Такая экспертиза становится юридически обязательной после утверждения ее результатов соответствующими органами государственной экспертизы.

В заключение изложенного необходимо подчеркнуть, что для успешного развития и внедрения объектов распределенной энергетики в России необходимо в нормативно-правовых актах четко определить цели, задачи и ожидаемые эффекты от их интеграции и функционирования в составе распределительных сетей [4].

Также представляется интересным предложение разработать Экологический кодекс РФ, который будет включать основные принципы, цели, задачи, а также закрепить экологическую ответственность за совершение правонарушений в сфере экологии [16].

Должно проводиться дальнейшее совершенствование законодательства в области водного, лесного, земельного, экологического, энергетического права.

Для укрепления правопорядка в сфере экологии необходимо усиление государственного и общественного контроля за охраной окружающей среды.

Каждому человеку необходимо иметь активную гражданскую позицию в области экологии и энергосбережения, чтобы все граждане Российской Федерации внесли свой посильный вклад в сохранение природных богатств страны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. **Федеральный** закон от 23.11.2009г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» [Текст] - [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/>.
2. **Ожегов С.И.** Словарь русского языка – М.: Рус.яз., 1990, Издательство «Русский язык», 1989.
3. **Ru.wikipedia.org/**Энергосбережение.
4. **Илюшин П.В.** «Системный подход к развитию и внедрению распределенной энергетики и возобновляемых источников энергии в России»// «Энергетик». 2022, № 4.
5. **Метечко Л.Б.,** Сорокин А.Е., Кабанов А.С. «Экология и энергосбережение – стиль жизни современного человека». Журнал «Научные труды ВЭО России», 2018 год, 213 том, с.369.
6. **Стратегия** национальной безопасности РФ – утверждена Указом Президента РФ от 02 июля 2021г. № 400. [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/>.
7. **Афанасьев А.А.,** Баранов Н.Н. «Мировая энергетика: глобальные проблемы и перспективы развития»/Журнал «Энергия: экономика, техника, экология». № 2, 2021.
8. **Энергосбережение** и экология: [spravochnik.ru/ekologiya/ekologiya\\_i\\_energoberezhnie/](http://spravochnik.ru/ekologiya/ekologiya_i_energoberezhnie/) - [Электронный ресурс].
9. **Советский** энциклопедический словарь. Издательство «Советская энциклопедия», 1979.
10. **Конституция РФ**, М., Проспект, 2022 г.
11. **Федеральный** закон от 10.01.2002г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [Текст] - [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://www.consultant.ru/document/>.
12. **Экологическая** доктрина РФ (одобрена распоряжением Правительства РФ 31 августа 2002г. №1225-р).
13. **Трудовой** кодекс РФ, М., Проспект, 2022 г.
14. **Кодекс РФ** об административных правонарушениях, М., Проспект, 2022 г.
15. **Уголовный** кодекс РФ, М., Проспект, 2022 г.
16. **Даньшина Д.Н.** Юридическая ответственность за экологические правонарушения // Научный журнал «Молодой ученый» - 2016 - № 6 – С.7 – 9.



*А.А. Суворкина<sup>1</sup>, Ю.В. Соколова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **КОНЦЕПЦИЯ БЫТИЯ И ОБЛАДАНИЯ: ОСОЗНАННОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ РЕКЛАМЫ НА ОБЩЕСТВО**

### **АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена анализу проблемы потребления в современном обществе, где люди подвержены агрессивному воздействию рекламы. На основании концепции Эриха Фромма рассматривается проявление модусов «обладания» и «бытия» в потребительском поведении в сложившихся ситуациях. В статье демонстрируется негативное влияние на экологию и самого человека безудержного роста потребления ресурсов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Процесс потребления и жажда обладания вещами стали неотъемлемыми спутниками жизни человека. Рассмотреть эту проблему возможно через призму концепции бытия человека Эриха Фромма, немецкого социолога, философа и социального практика, с особым акцентом на влияние рекламы на потребление в современном обществе.

В рамках нынешнего общества информация является социальной ценностью, она определяется общественным сознанием. Одним из путей передачи информации потребителю становится реклама, являющаяся частью маркетинга, которая обрела в современном обществе помимо закладываемых положительных свойств и негативные. Реклама способствует увеличению спроса на продаваемые изделия, что выгодно для продавца и не всегда оправдано для потенциального покупателя.

Человек, заинтересованный в приобретении новых товаров, подвергается агрессивному воздействию рекламы, алгоритмы которой устроены так, чтобы навязать потребителю большой объем покупок, зачастую и тех, в которых он не нуждается.

### **2. ПРЕЛОМЛЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЭРИХА ФРОММА В СОВРЕМЕННОМ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОМ ПОВЕДЕНИИ**

В одном из произведений Эриха Фромма, немецкого философа и социолога, «Иметь или быть?» раскрываются такие термины как «обладание» и «бытие», которые демонстрируют отношение к различным сферам жизни. Монография «Иметь или быть?» была издана в 1976 году и является одной из поздних работ автора. На русский язык произведение было впервые переведено и издано в

2000 году издательством «АСТ». В работе мыслителя поднимаются проблемы капиталистического общества, описываются два кардинально разных способа существования человека в современном мире — по модусу бытия и модусу обладания. «Бытие» с точки зрения Фромма предполагает рост личности, внутреннюю подвижность, наличие внутреннего ресурса и возможность отдавать свою энергию окружающему миру; «обладание» — стремление зависимой личности к иллюзорной безопасности, попытка защититься от внешнего мира, окружая себя материальными объектами, за нагромождением которых вскоре перестаёт быть видна фигура самого человека. Согласно Фромму, «Обладание и бытие являются двумя основными способами существования человека, преобладание одного из которых определяет различия в индивидуальных характерах людей и типах социального характера» [8, с. 28]. При ориентации на обладание, как полагал философ, «нет живой связи между мной и тем, чем я владею. И объект моего обладания, и я становимся вещами» [7].

Обладание в данном контексте выступает как стремление потребителя овладеть различными товарами без раздумья, как приобретение ненужных вещей, навязанных рекламой. Бытие, напротив, — разумное и экономически целесообразное потребление, обустройство необходимыми и полезными изделиями; приобретение тех товаров, к которым покупатель подошёл осознанно — то, чему найдётся применение в быту и иных сферах. Здоровое общество, согласно точке зрения Фромма, формируется на основе принципа «бытия».

Приобретение продукции по модусу обладания ведёт не только к большим экономическим потерям со стороны покупателя, но и к ухудшению экологии, поскольку при этом имеет место быть и утилизация продуктов и товаров потребления, которые со временем теряют свои потребительские свойства и приходят в негодность.

По мнению Фромма, первоначально предполагалось, что чем больше вещей будет потреблять человек, тем счастливее он станет. Помимо этого, вещи должны быть наилучшего качества. Потребление имеет определённую цель — удовлетворение потребностей, удовольствие. Однако со временем эта цель исчерпала себя, дойдя до нас в искажённом виде под влиянием рекламы [9]. Яркие рекламные

заголовки действительно превращают индивида в «потребителя ярлыков»: вещь приобретается под влиянием репутации бренда, в ней появляется необходимость при наличии определённого логотипа, и уже не столь важно её качество.

Человек становится заложником цикла «покупка-избавление-повторное приобретение» не только исходя из личного спроса, но и в целом под воздействием общества и установленных в нем угнетающих правил. Жёсткие реалии ориентированного на успех и потребление общества, стремление быть воспринятым окружающими приводят к тому, что следование круговороту неизбежно [5, с. 221]. Успешными принято считать обеспеченных и богатых членов общества. Следовательно, за крупным капиталом стоит и больший объем потребления. Чтобы угодить другим необходимо соответствовать своему социальному кругу, приобретая новейшие разрекламированные товары, ценность которых может заключаться лишь в их популярности. Культура обладания окружает нас повсеместно: «одной из черт современного города является изобилие объектов — большие магазины с их богатством одежды и продовольственных товаров буквально составляют первичный пейзаж; улицы переполнены сверкающими витринами» [1, с. 6]. Усиление этого происходит за счет развития маркетплейсов и интернет-магазинов, совершения онлайн-покупок — потребление производится круглосуточно. Другими словами, торговые центры окружают нас не только в действительности, но и в виртуальном пространстве интернета.

Все, чем обладает человек, также превращается в своего рода товар — знания, способности, навыки, которые он «продает» на рынке труда. Умения конвертируются в успех, и каждый из нас в той или иной мере «продает свою личность... чувствует себя товаром или, вернее, одновременно товаром и продавцом» [8, с. 229]. Однако стремление к повсеместному успеху — это лишь манипуляция, благодаря которой человек забывает о счастье, которое, казалось бы, должно стоять на первом месте. Изобилие приобретённых товаров заставляет нас забыть о более базисных вещах. Покупатель словно растворяется в покупках, отождествляя себя с приобретёнными объектами. Об этом гласят слоганы «Ты есть то, что ты ешь», «Ты то, что ты носишь», «Ты этого достойна», которыми оперирует реклама продуктов питания, брендов одежды и техники и другого ассортимента. По своей сути реклама — это коммерческая разновидность пропаганды. Она отлична от пропаганды своим содержанием, но использует основные её методы [3, с. 418]. Реклама, как оружие маркетинга, буквально «кричит», агрессивно призывает нас приобретать то, что нам совершенно не нужно. Покупая вещь, чтобы показать принадлежность к социальному кругу или в качестве показателя статуса, человек не испытывает продолжительного удовольствия от покупки. Это действие не вызывает удовлетворение потребности человека в предмете, а выступает способом расширить своё Я, которое, без сомнения, теряется в упомянутом

цикле «покупка-избавление-повторное приобретение».

В сущности говоря, потребление можно разделить на несколько уровней, на первом из которых стоит удовлетворение природных и социальных потребностей, на втором — оно приобретает форму потребительства [3, с. 418]. Стоит отметить, что реклама обслуживает оба типа потребления: первый вид обслуживается утилитарной рекламой, которая сама по себе является объектом потребления. Чтобы иметь представление о предметах, включая товары первой необходимости, их место продажи, свойства и ассортимент, человек изучает информацию и сам ищет рекламу, в которой он заинтересован. Потребительство — это, конечно же, искусственно созданная потребность в чем-либо, и данный тип потребления имеет прямое отношение к модусу обладания; реклама в таком случае имеет совершенно иной характер — она выступает инструментом внушения, имеет сверхагрессивный характер, о чем было упомянуто выше.

Экономика общества потребления заточена на новый тип личности, склонный к безудержному потреблению. Кроме очевидных проблем в сфере экологии, рассуждая о более частных случаях, отметим, что следование тенденциям рекламы может привести человека в ещё одну чудовищную ловушку — склонности к патологическому накопительству, которое отличается большим объёмом хранения и накопления ненужных, неиспользуемых в обиходе вещей. Покупка товаров в данном случае выступает способом закрыть неудовлетворённые потребности, средством, помогающим заглушить перенесённые личные потрясения, психологические травмы и беспокойные события. К следствиям господства концепции «обладания» также может быть отнесён шопоголизм, как один из путей избавления от стресса, поскольку, приобретая продукт, человек стремится заполнить внутреннюю пустоту, вызванную различными факторами, вместе с тем счастье оказывается мнимым, а удовольствие от приобретения вещей в действительности кратковременно. К сожалению, члены общества, демонстрирующие такое потребительское поведение, так же могут быть выгодны для экономики общества потребления.

Безусловно, для человека важно чувствовать себя нужным обществу, находиться в гармонии с социумом. Человек, являясь социальным существом, естественным образом ориентирован на взаимодействие с другими людьми — из этого следует закономерная потребность в раскрытии личного потенциала, необходимости соотношения себя с другими членами социальной группы. Таким образом формируется зависимость от общественного мнения. Нужда в соответствии определённого социальному кругу кроется в усиленном чувстве неполноценности, при негативном воздействии это чувство может находить выход в различных формах асоциального поведения, в том числе и в компульсивной жажде к приобретению новейших товаров, что является «компенсацией» по А. Адлеру, который трактовал

компенсацию как «психический механизм и направленную им деятельность человека по преодолению чувства общечеловеческой или личной неполноценности» [2, с. 4]. В гипертрофированной форме компенсация способна трансформировать указанный комплекс в иной — комплекс превосходства. В попытке избежать угнетения со стороны других членов социальных групп, отдельный индивид снова становится заложником ситуации, из которой, кажется, нет иного выхода кроме следования правилам группы. Соответствие нормам определённой группы может выражаться в стремлении к превосходству и самоутверждению за счёт тех лиц, кто отказывается им соответствовать, что вызывает диссонанс у человека в выборе наиболее выгодной концепции. Следовательно, приверженность модусу обладания может повлиять негативно и сказаться на чертах характера человека и его поведении: это делает его алчным, жестоким, безрассудным не только по отношению к природе, но и по отношению к другим людям. Личность не только конкретного индивида теряет индивидуальность под воздействием общества потребления, но и последствия потребления негативно сказываются на обществе в целом.

### **3. ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ПРИНЦИПА БЫТИЕ НА РАЗРЕШЕНИЕ МИРОВЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

Тем не менее, далеко не все люди руководятся принципом «обладания», существует немало сторонников концепция «бытия». Возникновение экологических кризисов, вызванных колоссальным выбросом товаров, обусловило появление движений в защиту окружающей среды, сторонники которых следуют идее осознанного потребления. Ответственное потребление не предполагает под особой экономии и ограничение в удовольствиях — это своего рода система ценностей, в которой потребности человека по-прежнему находятся на главенствующей позиции, но эти нужды удовлетворяются экологичным путём. Разумное потребление формирует гармоничное взаимодействие человека и природы.

Во многих странах мира, в том числе и в Российской Федерации, существуют экологические организации, главной функцией которых является содействие росту экологической культуры общества, информирование граждан, которое повлечёт за собой активность и заинтересованность в решении актуальных экологических проблем, связанных с защитой окружающей природы. Согласно основному закону страны, конституции Российской Федерации, «каждый имеет право на благоприятную окружающую среду» [4].

Разумеется, создание природоохранных организаций не является достаточным условием для решения трудностей, которые окружают человека — это требует системного подхода, в котором должно быть заинтересовано большинство членов общества, а для этого необходима целенаправленная гос-

ударственная политика.

Однако экологический активизм обретает популярность: в настоящее время существуют такие виды экологического волонтерства как восстанавливающее направление — заключается в посадке деревьев и обеспечении зелёной зоны в городах, помощи в заповедниках дикой природы, строительстве экотроп, создании приютов для животных; очищающее — это участие в акциях по организации раздельного сбора отходов, а также экологический мониторинг; событийное — организация и оказание помощи на экологических мероприятиях, в частности, помощь при тушении пожаров, принадлежность к добровольным дружинам пожарных, помощь в чрезвычайных ситуациях; природозащитное — изучение прав, обращение в экологические организации при несоблюдении установленных правил, оказание финансовых пожертвований экологическим проектам, информационный эоактивизм; просветительское — проведение мероприятий, связанных с экологией: лекций, семинаров; корпоративное — интеллектуальное участие. В первую очередь, наиболее важным является необходимость информирования граждан об их правах и обязанностях, об ответственности перед природой и необходимости с почтением относиться к экологическим ресурсам. Говоря о более простых примерах, общедоступным становится повторное использование товаров пользования, заключающееся в перепродаже товаров «из рук в руки», возможности дать «вторую жизнь» устаревшим вещам, что также впоследствии должно сказаться на массовом производстве и уменьшит его расходы. Также следует отметить, что знания о природопользовании, вне всякого сомнения, важны для всякого индивида, что позволяет не только повысить уровень эрудиции, но и возможность урегулировать системные ошибки. Вышеописанный порядок предложенных действий, принадлежность к эоактивистским организациям доступны каждому. Прикладывая небольшие усилия к решению всеобщей проблемы человек может внести свой положительный вклад в экологическую ситуацию, обеспечив себе и последующим поколениям достойное существование в бескрайнем мире. Важнее всего поменять отношение людей к потреблению товаров и пользованию ими, поменять отношение к окружающей среде, и механизмом достижения может послужить социальная реклама. В настоящее время существует несколько глобальных экологических проблем, которые вызывают общественный резонанс. К несчастью, в средствах массовой информации все чаще встречаются новости, связанные с вымиранием определённых видов животных, уничтожении природного богатства Земли — лесов, водоёмов и других объектов, всецело окружающих нас. И все, что вершится в мире, происходит зачастую по вине человека. Агрессия человека по отношению к окружающей природе сказывается на качестве жизни и её продолжительности, о чем повествует Фромм.

Эрих Фромм в работе «Иметь или быть?» пишет: «Захлестнувший человечество дух завоеваний и

враждебности не даёт возможности увидеть, что ресурсы природы имеют предел и в конце концов будут исчерпаны, и природа отомстит человеку за его грабительское отношение к ней» [8, с. 16]. Можно предположить, что в данный момент мы живём «в ситуации глубокого кризиса культуры, в катастрофическом отношении природы и общества». Кризис возник не по определённой роковой ошибке, он возник из совокупности факторов и представляет собой «отражение глубинного кризиса техногенной цивилизации» [6]. Сложившаяся ситуация, безусловно, нуждается в исправлении, и в производстве «Иметь или быть?» Эрих Фромм предлагает несколько путей решения данной задачи. Проблема может решиться лишь в том случае, если изменится и сам человек, посему философ предполагает, какие для этого необходимы условия: «Мы страдаем и осознаем это. Мы понимаем, каковы причины нашего страдания. Мы понимаем, что существует путь, ведущий нас к освобождению от этих страданий. Мы осознаем, что для освобождения от наших страданий мы должны следовать определенным нормам и изменить существующий образ жизни» [8, с. 256].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, зависимость от рекламы приводит человека к нерациональному взгляду на потребление — оно перестаёт быть осознанным, приводит потребителя к циклу покупки и выброса товара, потерявшего актуальность в его глазах, а затем последующего приобретения нового. Заставляя человека покупать и потреблять все больше разрекламированных товаров, нарастающее потребление вызывает потерю природных ресурсов, поскольку производитель так же следует установленному циклу, сформированному продавцом. Чрезмерное использование природных ресурсов оказывает негативное влияние на каждого из нас, что приводит к ухудшению качества жизни в целом. Несмотря на то, что произведение «Иметь или быть?» Э. Фромма было издано во второй половине 20 века, в настоящее время, спустя шесть десятилетий, оно по-прежнему остаётся актуальным. Рефор-

мирование общества, о котором полагал писатель, принято в действие, и на данном этапе имеет определённые результаты. Несмотря на большой объём разного рода производимой продукции в мире, постепенно меняется человек: приобретает популярность культура осознанного потребления, забота о природе, организация раздельного сбора и выброса отходов производства и потребления.

В заключении следует отметить, что капитализм на определённых этапах своего развития порождает формирование общества потребления, результатом которого становится изменение всех сфер жизни человека и его отношения к самому себе, другим людям и природе. Существовая в обществе, сформированном по данному типу, мы сталкиваемся с поднятой проблемой. Это не означает то, что необходима полная смена формации, ведь в каждом из видов существуют свои недостатки, поскольку модель общества не может быть идеализированной в реальности — это говорит лишь о том, что жизнь основана на решении различных вопросов, стоящих перед массами в том числе, и совершенствование мира находится только в наших руках.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. Москва: АСТ, 2021. 384 с.
2. **Бороненкова Я.С.** Психоаналитическая социальная философия. Москва: Флинта, 2011. 140 с.
3. **Ильин В.И.** Потребление как дискурс. Санкт-Петербург: Интерсоцис, 2008. 446 с.
4. Конституция Российской Федерации. Москва: АЙРИС ПРЕСС, 2017. 64 с.
5. **Куттер П.** Современный психоанализ. Введение в психологию бессознательных процессов. Москва: Институт общегуманитарных исследований, 2020. 342 с.
6. **Лисеев И.К.** Философия экологии сегодня. URL: <https://www.phisci.info/jour/article/view/330/331>
7. **Старовойтов В.В.** Жизнь и творчество Эриха Фромма. URL: <https://psyjournal.ru/articles/zhizn-i-tvorchestvo-eriha-fromma> (Дата обращения 06.06.2022)
8. **Фромм Э.** Иметь или быть? Москва: АСТ, 2016. 320 с.
9. **Фромм Э.** Человек одинок. URL: [https://scepis.net/library/id\\_898.html](https://scepis.net/library/id_898.html) (Дата обращения 06.06.2022).

А.Л. Гынгов<sup>1</sup><sup>1</sup>Софийский Университет им. «Св. Климента Охридского»,  
Болгария**ПЕРЕХОД ОТ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО К ПОСТ-ПОТРЕБИТЕЛЬСКОМУ ОБЩЕСТВУ. ФИЛОСОФСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ****АННОТАЦИЯ**

В докладе подчеркнуты основные черты потребительского общества по Зигмунту Бауману—субъектный фетишизм и обратный синоптикон, которые служат основанием для перехода к пост-потребительскому обществу. По отношению к пост-потребительскому обществу прослеживается сочетание мягкой манипуляции и жесткого принуждения при контроле за населением, превращенного в абстрактные статистические единицы. Этот новый тип манипуляции предназначен способствовать сохранению и укреплению фундамента пост-потребительского общества—всепроникающей фикции финансовой спекуляции.

Тема потребительского общества широко обсуждается как в философской, так и в гуманитарной литературе, в целом. Нам, однако представляется, что эта проблема постепенно теряет свою актуальность за счет перехода общества в пост-потребительское состояние. Данный переход легко показать, следуя концепции Зигмунта Баумана об основных характеристиках потребительского общества: *субъектного фетишизма и обратного синоптикона* [1].

«Субъектный фетишизм» удачное приложение выражения Карла Маркса «товарный фетишизм» к современной ситуации. Маркс вкладывает в этот термин утрату существенными отношениями их общественной сути и наполнения их товарно-денежным смыслом. Самый обсуждаемый пример такого смещения перспективы *стоимость товара*, где *общественно необходимый труд* для производства любого товара иллюзорным образом воспринимается как *вещественный субстрат* данного товара. Таким образом, отношения между людьми превращаются в видимость отношений между вещами, которые воспринимаются в первую очередь как товар, предназначенный для купли-продажи [2].

Подобную перестановку действительности «с ног на голову» Бауман подметил в современном чрезмерном внимании уделяемом повсеместно значимости свободы выбора индивида. Первостепенная возможность выбирать не только продукты в супермаркете, гаджеты и мебелировку в квартиры, но и место жительства, круг знакомых и друзей, долгосрочного (относительно) партнера и даже свою собственную идентичность, оказываются такой же превращенной формой, как и товарный фетишизм. Здесь реальность также удваивается на поверхност-

ную видимость свободы выбора, выполняющую ту же самую роль что и видимость вещественности стоимости товара, и невидимую, но существенную необходимость наличия хорошо оплачиваемой работы, т.е. продажи собственной рабочей силы, для того, чтобы воспользоваться заветной свободой выбора, возвышающей индивида до субъекта всех своих действий. Следовательно, как при товарном фетишизме, так и при субъектном фетишизме проявляется принцип *превращенной формы*—совмещающей в себе иллюзорную и истинную сторону в одно и то же время, но в разных отношениях [3].

Другая основная характеристика потребительского общества—«обратный синоптикон»—является развитием понятия «паноптикона», разработанного Джереми Бентамом в 19-ом веке и широко популяризованного Мишелем Фуко в 20-ом. В обоих понятия используется схема окружности, где в центре находится система контроля, а по периферии расположены контролируемые индивиды. Разница состоит в том, что при паноптиконе центр наблюдает и следит за периферией, а при синоптиконе периферия наблюдает за центром, охотно следуя моделям предлагаемых и внушаемых центром. Очевидно, что паноптикон воплощает взаимодействие надзирателей с тюремными заключенными времен Бентама, а синоптикон—телезрителей с коммерческой и политической властью в эпоху промывания и полирования мозгов телевидением, радио и бумажными средствами массовой информации. Однако, как при паноптиконе, так и при синоптиконе, контроль однозначно осуществляется центром. Что касается обратного синоптикона, то в одном из его элементов—наблюдении—мы видим сочетание принципов паноптикона и синоптикона: и центр, и периферия наблюдают друг за другом, но контроль, как и следовало ожидать, остается за центром. Эта схема отображает двойной контроль, осуществляемый всем набором средств общения посредством интернета.

Именно обратный синоптикон стал трамплином для развертывания пост-потребительского общества по направлению дегуманизации и цифровизации людей, наметившейся задолго до его возникновения. Контроль при помощи обратного синоптикона, классифицирующий людей на правоспособных потребителей и непригодных отверженных, широко

распахнул ворота для возможности утилизации населения, идущей далеко за эксплуатацию труда и потребительских вожделений. Обратный синоптикон устанавливает определенные группы отверженных непригодных к жизни потребителей, которые, из-за этого смыслообразующего недостатка исключаются, из всех активных взаимодействий потребительского общества. Но потребительская маргинализация делает их удобным материалом для совсем различного типа общества, где самодостаточное потребление уже не имеет ведущего значения. Преодоление потребительского настроения, однако, совсем не означает торжества высоких нравственных идеалов. Напротив, пост-потребительский статус общества и отдельного человека сводится лишь к тому, что не только все личностные качества уничтожены, но и что почти все обычные функциональные характеристики повседневного индивида утратили свой обыденный смысл, сохраняя одна единственную вездесущую характеристику—быть статистической единицей [4].

Контроль за статистическими единицами остается в рамках обратного синоптикона, но его суть существенно меняется: на место коммерческой (рекламы) и политической пропаганды приходит манипуляция, имеющая цель следить за тем, дабы статистические единицы вели себя именно так, как подобает *статистическим единицам*, при этом воображали бы себе с неопровержимой убедительностью, что они ведут себя каким-то иным образом, например, выполняют роль инвесторов [5]. Таким образом, двойная реальность превращенной формы—эмпирической видимости инвестора и незримой сущности статистической единицы—гарантирует продвижение повестки финансовой спекуляции. Превратившаяся в ядро финансов спекуляция, устанавливает фикционную прибыль не только как фундамент финансов и экономики, но и двигатель и содержание всех остальных сфер общественной и частной жизни. Превращенная жизнь статистических единиц при помощи изящной манипуляции способствует распространению и воплощению всеобъемлемой фикции наряду, а часто и вместо, действительности. Действительность же все более насыщается фикцией и все более напоминает обворожительную перспективу, обещающей всеми мыслимыми блага, но ведущую если не в бездну, то, наверняка, в тупик.

Манипуляция статистическими единицами в значительной степени описывается понятием «цифрового концлагеря» [6]. Однако последнее указыва-

ет на то, что статистика и, производная от нее, фикциональность уже не является единственной целью. Сопутствующей целью, все яснее выступающей, становится контроль над эмпирической составляющей превращенного бытия статистических единиц. Для этого приходится вернуться к насилию, упражняемого центром при контроле за периферией в схеме паноптикума. Это приводит к тому, что как неотъемлемой частью мягкой силы манипуляции статистических единиц начинает проявляться жесткое принуждение по отношению с их биологико-социальной составляющей, приводящих к другому типу манипуляции: манипуляции статистическими единицами, при которой может происходить как уничтожение биологико-социальной составляющей, так и ее мультипликация.

Введение жесткого принуждения, однако, не меняет принципиальной сущности социальной реальности, а именно, ее характера фикции, основанной на финансовой спекуляции. Фикция остается составляющим элементом реальности, постоянно укрепляющимся и угрожающим вообще покончить с реальностью, даже если допустить радикальное преобразование человечества в после ковидный период, в результате чего предстоит появление «народов принципиально нового, более развитого человечества и расы «служебных» людей по Ковальчуку» [7].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bauman Z.** Consuming Life. Cambridge: Polity Press, 2007.
2. **Marx K.** Capital: A Critique of Political Economy, vol. 1. Moscow: Progress Publishers, 2010.
3. **Мамардашвили М.** Превращенные формы. О необходимости иррациональных выражений в как я понимаю философию, Москва, Прогресс, 1990.
4. **Gungov A.** Real Semblance Flourishing in Post-Consumerist Society, Sofia Philosophical Review, vol. VII, no. 2, 2013.
5. **Гънгов А.** Манипуляция и спекуляция-философского измерения в философской концепции, ценности и геостратегической идеи в XXI веке, Велико Търново, Фабер, 2017.
6. **Делягин М.** Сортировка прошла: кто на отработку? Возможная смена парадигмы, № 6, 2021, <http://www.svom.info/entry/1158-sortirovka-proshla-kto-na-otbrakovku-vozmozhnaya-s/>
7. **Marx K.** Theories of Surplus Value. Moscow: Progress Publishers, 1968.



*К.М.Сербулов<sup>1</sup>, Ю.В. Соколова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ОТРАЖЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПОТРЕБЛЕНИЯ В ИСКУССТВЕ ПОСТМОДЕРНА**

### **АННОТАЦИЯ**

В статье рассмотрено изменение отношения к потреблению в обществе на протяжении XX века, выраженное в различных направлениях изобразительного искусства. Осмысление художниками и арт-практиками результатов избыточного потребления, демонстрирующего превращение ресурсов в отходы и мусор, показывает обществу масштаб экологической проблемы, возникающей в результате безудержного роста потребления. Возникновение такого направления в современном искусстве как трэш-арт можно трактовать как неосознанный призыв к предотвращению избыточности потребления.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Искусство всегда чутко реагирует на социальные и мировоззренческие изменения в обществе, художественная среда и сфера культуры вообще неизменно транслируют ценностные и этические умонастроения людей, степень свободы в обществе, отношение к социальным институтам, науке и труду. Это позволяет изучать различные аспекты жизни общества через рассмотрение особенностей художественной культуры. Говоря о потреблении, невозможно не затронуть политические и экономические составляющие нашего бытия, а также философские и мировоззренческие концепции, существующие в обществе, поэтому проблему потребления целесообразно рассматривать как совокупность различных аспектов тех или иных сфер жизнедеятельности человека и общества. Отношение современного человека к проблеме потребления выражает протестующий голос современного искусства, призывающий нас задуматься о будущем и найти способы разрешения существующих глобальных проблем, в том числе и проблемы избыточного потребления и его последствий.

### **2. ПОТРЕБИТЕЛЬСТВО КАК ФЕНОМЕН ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО БЫТИЯ**

Определим потребительство как социокультурную систему, в которой социальная идентификация построена в первую очередь на создании видимой картины роскошной жизни, отличающейся от действительности, особое место в жизни потребителя занимает гедонистический образ жизни и его демонстрация. Некоторое время назад основным показателем престижа и успеха в жизни в целом явля-

лось место работы, а сам труд и трудовая добросовестность были показателями человеческого достоинства и основой всеобщего уважения. Избегание трудовой деятельности, не только осуждалось с общественной точки зрения, но и было уголовно наказуемо. В настоящее время классификационным первенством обладает образ жизни, отличительными чертами которого является имидж человека: место жительства, одежда, транспорт и то, где и как он проводит свои выходные или отпуск. Все демонстрируемые составляющие вашего облика не отражают ваш действительный социальный статус и положение в обществе, а транслируют иллюзию вашего достатка и места в иерархии. Есть и обратная сторона, если вы, желаете скрыть свой статус и материальное состояние, то вы вправе выставлять на обозрение, только ту часть своей жизни, которую считаете необходимой к демонстрации. Довольно часто можно увидеть новостя как какой-либо состоятельный человек едет на работу в общественном транспорте или покупает одежду не от кутюр, а в обычном магазине. Но в нашем обществе довольно часто встречается именно имитация зажиточности для приближения себя к верхам общества [1].

Стоит отметить значимую роль средств массовой информации и социальных сетей в создании и демонстрации образа не соответствующего действительности. По мере все большей интеграции интернета в нашу повседневную жизнь, человек все больше становимся зависим от мнения общества. При выборе фотографии для профиля в социальной сети, он с большей вероятностью выберет ту, что понравится его подписчикам, а не ту, которая нравится ему самому. В социальных сетях создают образы, которые не существуют на самом деле, видимость несуществующей жизни ненастоящих людей, эти образы не показывают реальность такой, какой она является на самом деле, а создают свою собственную. Тем самым происходит подмена реальной жизни, или, иными словами, симуляция.

Главенствующий в последнее время экономический принцип призывает к увеличению объемов производства и потребления. Не только производство должно возрасти, но и потребитель в свою очередь должен быть готов потреблять все больше и больше. Пользуясь эффектом морального устаревания промышленности подталкивает к приобретению новых вещей, хотя старые вещи еще в состоянии

выполнять свои основные функции. Постоянно изменяющаяся мода на товары, психологически давит и принуждает потреблять больше, чем необходимо или даже больше, чем хочется. Ключевым инструментом всей этой системы, конечно, является реклама, которая фактически диктует потребителю то, что модно и что уже вышло из моды [2]. Рекламный рынок в России в 2021 году показал рост в 22% и оценивается в 578 миллиардов рублей. Данная сумма и темпы роста, вовсе не воспринимаются как неразумные в системе, считающей, что все возрастающее производство, а значит и потребление, жизненно важный показатель экономики без которого эта система бы погибла.

### **3. ИСКУССТВО ВПЕРЫЕ ИСПОЛЬЗОВАВШЕЕ ПРОДУКТЫ МАССОВОЙ КУЛЬТУРЫ**

Сближение массовой культуры и изобразительного искусства началась еще в начале 20 века, что и привело к появлению первых объектов искусства, созданных с использованием рекламных щитов, упаковок и печатной рекламы. Испанский живописец Пабло Пикассо создал работу, посвященную любовной связи людей и их покупок, он создал образ женщины из этикетки и рекламы универмага Бон Марше, чем оставил свой след в этом интересном синтезе ранее двух противоположных аспектов культуры.

Примерно в то же время, в течение Первой мировой войны, зародилось авангардистское течение в искусстве под названием дадаизм, с которого как полагают берет свое начало постмодернизм. Дадаизм можно рассматривать как протест художников в отношении рационализма и логики, в том числе и в искусстве. Дадаизм показал, что искусство может быть бессистемным, циничным, тем самым демонстрируя разочарованность в положениях и канонах, установленных предшествующими поколениями. Одним из основателей дадаизма является Марсель Дюшан. Он утверждал, что искусство должно быть отделено от художника и не имеет значения создал ли художник что-то сам или нет. Главное, что художник выбрал что-либо как объект своего творчества. В рамках этого направления художники имеют право преобразовывать любой выбранный ими предмет и присваивать ему новое название, разместить его особым образом, чтобы его старое значение исчезло и осталась только новая концепция, созданная художником. Именно для таких целей отлично подходят обычные бытовые предметы, поскольку мы видим их изо дня в день, и они уже настолько приелись нашему взгляду, что не вызывают никаких эстетических эмоций. Это не предметы, которые вызывают плохие или хорошие чувства, они вызывают безразличие. Дадаисты одни из первых стали использовать в качестве арт-объектов предметы повседневного быта, что и отсылает нас к вопросам потребления. Ведь то, что мы потребляем каждый день и не вызывает в нас никаких эмоций [3].

### **4. ИСКУССТВО, ПРИЗЫВАЮЩЕЕ К МАССОВОМУ ПОТРЕБЛЕНИЮ**

Одним из наиболее известных результатов взаимодействия массовой культуры и изобразительного искусства является поп-арт. Поп-арт использует узнаваемые образы, взятые из средств массовой информации или популярной культуры, в изобразительном искусстве. Поп-арт зародился в Великобритании в 1950-х годах в условиях послевоенного времени, именно тогда художники обозначили путь к перенесению предметов повседневной жизни в художественную среду и возвеличанию самого предмета и его изображения до уровня изобразительного искусства.

В дальнейшем уже американские художники последуют примеру европейских коллег и станут известными сторонниками движения, заключающегося в отказе от традиционных, исторических и художественных сюжетов. Вместо этого акцент изобразительного искусства сместится на изображение продуктов массового производства, которые доминировали в визуальной сфере. Именно благодаря изображению известных предметов производства или портретов знаменитых личностей, поп-арт стал одним из самых узнаваемых стилей современного искусства.

Одной из самых узнаваемых черт поп-арта является возможность цитирования образов искусства из любых источников. Художники поп-арта стремились стереть границы между высокой и массовой культурой, путем создания картин и скульптур, демонстрирующих объекты массового потребления. Считая, что все взаимосвязано, они стремились сделать эти связи буквальными в своих работах, ища вдохновение в опосредованном мире популярных образов, рекламы и карикатур [4].

Появление поп-арта на фоне увеличения темпов производства и роста влияния средств массовой информации после второй мировой войны вполне очевиден. Многие критиковали поп-арт за выбор образов капиталистического рынка как предметов искусства в то время, как другие отмечали стремление возвышения повседневности до уровня высокого искусства. Путем установления связи между потребительскими товарами и творениями художников подчеркивается статус искусства как предмета товарно-денежных отношений, тем самым лишая искусства его высокого статуса. Поп-арт — это то искусство, которое одобрительно относится к массовому производству, и оно не стесняется говорить о нем. Возникновение и расцвет этого художественного течения и формирование общества потребления пришлось на одно время, поэтому эта связь наиболее видна. Именно через поп-арт художники обратили внимание мирового сообщества на обилие потребляемых товаров, и со временем одобрение сменилось негативной реакцией.

### **5. ИСКУССТВО, ЗАБОТЯЩЕЕСЯ О ПРИРОДЕ**

Логичным продолжением синергии искусства и культуры потребления, является изображение воз-

можных последствий данного взаимодействия. Данное направление получило название трэш-арт и через свои произведения оно призывает людей обратить свое внимание на экологический аспект нашего существования и быть более рациональными в вопросах, касающихся потребления. Из отходов, которые свозились на свалку художники начали создавать свои произведения искусства. Одни воссоздают шедевры мирового изобразительного искусства, а часть денег полученных с продажи этих арт-объектов отправляют в фонды, занимающиеся поддержанием экологического равновесия в мире. Другие воссоздают из мусора фигуры краснокнижных животных или обитателей океана, чтобы люди задумались о том, что, разбрасывая мусор, они губят среду обитания животных.

Одним из наиболее известных представителей этого направления искусства является бразильский художник Вик Муниз. Он воспроизводит шедевры мирового изобразительного искусства из переработанных материалов в монументальном масштабе. Размер их так велик, что для создания этих объектов используется проектирование контуров и частей объекта на землю с большой высоты. В качестве материалов он использует все, начиная от крупного бытового мусора и заканчивая измельченными журналами, электрическими проводами и даже пылью.

Другим известным деятелем этого направления искусства стал художник, дизайнер и иллюстратор из Флориды Дерек Горес. Он является мастером в искусстве коллажа и создает свои работы из измельченной журнальной бумаги, этикеток и других переработанных материалов. Перед началом работы Горс сортирует материалы по цвету, а затем создает из них изображения на плоскости. Вдохновляясь миром моды и дизайна, он создает портреты женщин и сцены из повседневной жизни [5].

Как правило, любой материал может быть использован для создания подобных арт-объектов, будь то мусор со свалок или выловленный в открытом океане. Часть художников создают теневые скульптуры из различных видов отходов, они выстраивают объемные, на первый взгляд бесформенные, фигуры, которые будучи освещенными с определенного ракурса установленным особым образом источником света, отбрасывают тень в виде ясно читаемого силуэта, задуманного автором. Другие используют выброшенные предметы гардероба, перекрашивают их и создают массивные арт-объекты. Популярной техникой в данном направлении является создание портретов знаменитых личностей из дискет и кассет. Работая с твердым и мягким пластиком, художники призывают нас обратить внимание на проблему переработки и утилизации этого материала.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение взаимодействия искусства и массовой культуры с момента зарождения дадаизма, где в качестве арт-объектов впервые начали использовать бытовые предметы, позже поп-арта, в котором использовались всеми узнаваемые образы, и заканчивая трэш-артом, выразительно показывает к чему может привести дальнейшее увеличение темпов роста производства и потребления. Трансформация направлений современного искусства демонстрирует, как менялось отношение общества к проблемам потребления. Во время зарождения дадаизма, проблем, связанных с излишним потреблением, как таковых еще не существовало, и демонстрация последствий потребления воспринималась как что-то новое и необычное. В поп-арте, когда экономика уже восстанавливалась после мировых войн, отношение в росту потребления в целом было положительным, что и привело к такой популярности данного направления изобразительного искусства. В свою очередь в трэш-арте художники уже обращают внимание общества на последствия иррационального потребления и призывают задуматься, о том, какой мир они хотят оставить после себя следующим поколениям.

Стоит отметить, что все проблемы, на которые обращает внимание современное искусство, являются глобальными, и мировое сообщество признает их актуальность. Множество экономических программ развернуто для поддержания и улучшения экологической обстановки в мире. Строятся мусоросжигательные заводы, запрещаются и убираются свалки. Возможно, если не было бы такого проявления протеста искусства в отношении социальных и экологических проблем, все эти программы были бы приняты на годы, а то и десятки лет позже.

Поэтому искусство было и остается одним из ключевых аспектов современного мира, обращающих внимание общественности на действительные проблемы, откладывание решения которых приведет к неблагоприятным последствиям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. АСТ. 2021.
7. **Фромм Э.** Революция надежды. Избавление от иллюзий. Айрис-Пресс. 2005 г.
8. **Кудрин С.К., Чудинова Е.М.** Проблема влияния мировоззрения марселя Дюшана на его творчество // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Философия. Политология. Культурология. Том 5 (71). 2019. № 3. С. 21-29
9. **Pop Art.** URL: <https://www.theartstory.org/movement/pop-art/> (дата обращения: 09.06.2022).
10. **10 Artists Working in Recycled Art.** URL: <https://blog.artsper.com/en/get-inspired/top-10-of-recycled-art/> (дата обращения: 10.06.2022).

С.Б. Степаненко<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия**ЭТИКА САМООГРАНИЧЕНИЯ: ЭЛЛИНИСТИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ  
РАЗУМНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ****АННОТАЦИЯ**

В настоящей статье делается попытка реконструировать идеи разумного потребления, сложившиеся в эллинистической философии. Философские школы киников, эпикурейцев и стоиков рассмотрены в тех своих моментах, которые релевантны с точки зрения тематики сбережения ресурсов. В статье также делается вывод об актуальности эллинистических этических концепций с точки зрения формирования условий для повсеместного распространения практик осознанного потребления.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Общество и экономика, ориентированные на сбережение ресурсов, нуждаются в соответствующей этике. Всеобщность и императивность моральных норм, а также непосредственный (оперативный) характер их функционирования, возможный благодаря эмоциональным механизмам регуляции поведения, объясняет действенность моральных факторов в процессе формирования социальных, правовых и технологических условий практики энергосбережения и ресурсосбережения.

Подобное рассмотрение влияний морали на экономику стало практически трюизмом через сто лет после выхода книги немецкого социолога Макса Вебера «Протестантская этика и дух капитализма» [1], в которой обосновывался тезис о воздействии этико-мировоззренческих аспектов протестантизма на формирование капиталистических отношений. Однако в настоящей статье рассматриваются этические учения двухтысячелетней давности, и какие-то соображения по поводу актуальности темы всё же необходимо привести, если дело состоит не только в историко-философском интересе.

Первое соображение связано с представленным в герменевтике Гадамера понятием действенно-исторического сознания [2]: любое понимание прошлого, в том числе этических учений прошлого, неизбежно оказывается актуализацией понимаемого и его аппликацией (применением).

Второе соображение таково: эллинистическая этика — один из источников современного, «работающего» репертуара этических образцов и нравственных мотиваций.

Согласно третьему соображению, практическую философию эллинистических школ возможно абстрагировать от её историко-философского и исто-

рико-социального контекста и приспособить к запросам настоящего.

В предлагаемой статье этические теории эллинистической философии рассматриваются в тех своих аспектах, которые релевантны и актуальны с точки зрения современных представлений о разумном потреблении.

**2. «НОВЫЕ СТОИКИ»**

Относительно упомянутого в предыдущем абзаце третьего соображения, то примером подобного использования эллинистической этики является так называемый новый стоицизм, представленный в популярных книгах Массимо Пильюччи и Уильяма Ирвина, ставших заметной частью массовой культуры — как когда-то книги Дейла Карнеги, который и сам теперь воспринимается как «новый стоик».

Современный интерес к стоицизму поощряется кризисными явлениями, связанными с быстрым изменением условий существования и неопределённостью жизненных перспектив. Вместо консервативной реакции, рассчитывающей на какую-либо форму витального, стоическая реакция на кризисные явления исходит из презумпции принципиальной возможности контроля разума над жизнью.

При этом стоицизм стремится не подавлять эмоции, а управлять ими, поэтому «новый стоицизм» можно подвести под исследовательскую категорию «эмоциональный интеллект»: практические советы древних философов-стоиков истолковываются здесь в терминах современной когнитивистики, нейробиологии, эволюционной психологии.

Основным принципом «новых стоиков» остаётся «дихотомия контроля» — различие того, чем я могу и не могу управлять. Однако, по мысли Пильюччи [3], подобный расчёт не дискредитирует социальную активность, просто делает её осознанной. Он также утверждает, что исторический стоицизм представляет собой практическую метафизику, открытую для корректировки. Дополнительным мотивом для возрождения стоицизма, считает Пильюччи, является старение населения, которому требуется «руководство по подготовке к неизбежности смерти и угасанию со-

знания». Однако стоицизм — не психотерапия. Он предлагает продуманную позицию, картину мира, а картина мира нужна каждому.

### 3. ЭТИКА: ЗНАНИЯ, НОРМЫ, ЭМОЦИИ

Что касается слова «этика», то под ним чаще всего понимают:

1) исследование и обоснование морали (теоретическая этика, философская этика, этика как наука);

2) саму мораль или систему моральных норм (практическая этика).

Практическая этика является нормативной (предписывающей) и может быть прикладной, то есть использоваться в качестве конкретизации универсальных моральных норм в применении к определённым ареалам общественных отношений, в том числе профессиональным (примечательна современная практика составления кодексов профессиональной и корпоративной этики, артикулирующих моральные требования к представителю определённой профессии или организации).

Разумеется, этика как наука не создаёт морали. Никакое этическое знание само по себе не создаёт действенной морали: допустим, мне известно о разумности и общественной поддержке самоограничения в области потребления — далее должны подключиться удовольствие от экономии, стыд от расточительности, предвосхищение угрызений совести при возможном нарушении соответствующей моральной нормы, то есть должны заработать эмоции, которые знанием не создаются.

Однако моральные дискуссии и этическое знание играют определённую роль в социальном давлении, постепенно изменяющем и закрепляющем практическую этику. Что касается различных этических теорий, то кажутся допустимыми разные обоснования морали и разные комбинации этих обоснований — этика ненасилия, этика добродетелей или этика правил, деонтология или этика долга, консенсуализм и его разновидность под названием утилитаризм. Возможно также, что этика — это сразу много разных вещей, как в случае с игрой, литературой или философией.

## 4. ЭТИЧЕСКИЕ ТЕОРИИ ЭПОХИ ЭЛЛИНИЗМА И РАЗУМНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ

### 4.1. Киники

Принадлежность киников к эллинистической философии можно оспорить, поскольку Антисфен, основатель школы, был современником Сократа, а эпоху Эллинизма в историко-философской периодизации принято размещать после Аристотеля. Однако кинизм органично сочетается с учениями эллинистических школ, образуя с ними единый идейный комплекс, отличительными особенностями которого являются практический характер философии (наиболее важной, а иногда и единственной частью философии является этика), индивидуалистическая направленность философии (антропоцентризм, иде-

ал внутренней свободы, упражнения в самосовершенствовании), а также следование философии Сократа (в частности, идеям о том, что достижению правильной жизни мешает неведение). Поэтому обзор эллинистических концепций осознанного потребления можно начать с идеи Антисфена и Диогена Синопского.

В этическом учении киников высшим благом признаётся добродетель, а способом достижения добродетели считается разумное самоограничение, предполагающее отказ от всего, кроме непосредственно необходимого, а также игнорирование лишних социальных обязанностей и условностей. Как это ни парадоксально, но придуманное Антисфеном название школы, происходящее от древнегреческого слова «кинос» (собака) и сочетающееся с девизом быть ближе к природе, для иллюстрации нравственного принципа указывает на животное. В то же время античная антропология определяет специфику человека как разумного существа через противопоставление животному. Однако ни собака, ни какой-либо иной представитель бестиария не способен к сознательному самоограничению, то есть животные лишены добродетели, а образ собаки — ироническое указание на невозможный и нежелательный предел.

Впрочем, и собака у киников уместна — здесь мы имеем дело с провокативным вариантом философии, поиском нового философского языка через перформанс с собственным телом. Подобно тому, как софистика была реакцией на избыточное разнообразие натурфилософских позиций, кинизм стал реакцией на излишний интеллектуализм современной киникам философии. Философ-киник учит жить не словами, а собственным примером, образом жизни, причём иногда этот образ жизни доходит до крайностей: Диоген Синопский ночевал в глиняной бочке, ходил в лохмотьях, питался чем придётся.

Киническое решение довольствоваться малым дополняется космополитизмом, своеобразной аскезой, отшельничеством, а также отказом от иерархий и доминирования. Петер Слотердайк [4], противопоставляя кинизм цинизму как просвещённому ложному сознанию, замечает, что минимализм и натурализм позволяет киникам устранить искусственную волю к власти, освобождая тело и телесные жесты.

Кинические образцы поведения часто воспроизводятся в культуре — к примеру, в концепции опрощения Льва Толстого, идеях простой жизни Ралфа Эмерсона Торо, в современной массовой культуре, например в литературе битников или недавнем оscarовском фильме «Земля кочевников».

В своих отзывах на рассказы о кинической философии студенты обычно оценивают отрицательно бедность и отсутствие комфорта, но положительно — независимость и контроль киников над собственной жизнью. Кинизм — одна из предложенных культурой моделей осмысления свободы.

## 4.2. Эпикурейцы

Эпикур (4 - 3 вв. до н.э.) — основатель школы, в которой удовольствие рассматривается как высшее благо. В практической жизни удовольствие является также мерилем истины, подсказывая, что хорошо, а что плохо. Данное учение также называют гедонизмом, однако современное обыденное словоупотребление связывает гедонизм с пониманием чувственных удовольствий как смысла жизни (сразу напрашивается критика гедонизма: удовольствие — это регулятор поведения, средство поддержки его смысла, а не сам смысл).

Однако Эпикур считает благом не все удовольствия, а лишь умеренные и разумные, иные ведут к страданию. Удовольствие определяется им негативно — как отсутствие страдания. В этом случае образцовым удовольствием является покой. Поощрять же следует лишь те удовольствия, которые являются одновременно и естественными, и необходимыми.

Удовольствия должны оставлять место для других удовольствий, поэтому следует быть умеренным. Удовольствие требует сосредоточенности, а неумеренность запускает каскад желаний, порождает неудовлетворённость и рассеивает удовольствие. Удовольствие важнее своего объекта и поэтому следует довольствоваться малым.

Страдания связаны не с вещами, а с переживаниями и обусловлены нашими страхами, главный из которых — страх смерти. Однако смерти не следует бояться, поскольку мы её никогда не почувствуем: «Пока мы есть, смерти ещё нет. Когда есть смерть, нас уже нет».

Эпикурейцы следуют Сократу, считая неведение источником неправильной жизни и связанных с ней страданий. Неразличение хороших и плохих удовольствий, а также наши страхи объясняются незнанием.

Поскольку поощрения достойны лишь естественные и необходимые удовольствия, гедонизм эпикурейцев покажется современным гедонистам аскезой — жизнь в общине, простая еда, общение с друзьями. Эпикуреец не тратит время на заботу о статусе внутри навязанных иерархий, избегает отношений доминирования и следует девизу Эпикура «Живи незаметно».

## 4.3. Стоики

Говоря о стоиках, мы будем ориентироваться в основном на Позднюю Стою (Сенека, Эпиктет, Марк Аврелий), хотя базовые теоретические положения, заложенные Хрисиппом, поздние античные стоики также сохраняют.

Главной частью философской системы стоицизма также является практическая философия или этика. Добродетель стоика — это апатия (бесстрастность) и атараксия (невозмутимость), что также означает счастье. Добродетель достигается жизнью сообразно природе, наша природа разумна, следовательно и нам нужно жить разумно. Первой задачей стоика является понять, что от него зависит,

а что не зависит: если внешние обстоятельства неподвластны, следует подчиниться судьбе и сосредоточиться на внутреннем мире — бессмысленно и безразлично всё то, что находится вне пределов нашего контроля.

Стоическое смирение с судьбой не следует рассматривать как капитуляцию перед жизненными невзгодами. Наоборот, это стремление сохранить достоинство даже в наихудших условиях. Если использовать терминологию американского психолога Мартина Селигмана, стоицизм предлагает человеку не «выученную беспомощность», а осознанный «рефрейминг», осмысление опыта: осознание пределов контроля необходимо не для отказа от действия, а для того, чтобы делать то, что должен и что можешь. Данной идее также созвучны сартровский тезис «Человек обречён на свободу» и мысль Виктора Франкла о том, что свобода отношения к происходящему остаётся у человека даже в концлагере.

Многие вещи контролировать нельзя, но своё отношение к вещам контролировать можно. Свобода от внешнего и сосредоточение на внутреннем помогает человеку сохранить внутреннее достоинство и при невзгодах (данная идея объединяет христианскую этику со стоицизмом).

К внешним обстоятельствам человек привязан страстями (стоики выделяют 4 вида страстей: скорбь, страх, вожделение, наслаждение). Цель стоика состоит в контроле над страстями и обретении независимости или автаркии. Для контроля над страстями используются различные психологические техники — от нормализации неудачи, горя, болезни с последующей десенсибилизацией (привыканием) до дискредитации любого объекта болезненной привязанности путём понижения его в статусе с помощью негативного переосмысления.

Стоики не считают, что страсти превращают человека в животное, страсти остаются специфически человеческими, являясь (порочным) неведением. С другой стороны, апатия не лишает мудреца эмоций. «Добродетель как апатия не означает полного бесчувствия и отказа от каких бы то ни было переживаний. Апатия или «бесстрастие» тождественно нравственному совершенству, или «благострастию»...» [5; с. 85]

В отличие от киников, стоики не призывали к бедности. В отказе от киников от комфорта стоиком виделся какой-то порок, им должно быть нравилось высказывание Сократа об Антисфене: «сквозь дыры твоего плаща я вижу твоё тщеславие».

С точки зрения стоика, богатство является предпочтительным («есть оно — пусть будет»), однако богатство не может быть целью мудреца (оно есть внешнее, что от нас не зависит). То же самое можно сказать о выполнении гражданских и социальных обязанностей — их следует выполнять, не делая при этом высшей целью.

## 4.4. Дихотомия контроля

Как уже говорилось, главная задача стоика — определить, какие вещи находятся в его власти, а

какие нет. Однако дихотомия контроля является чрезмерно упрощённой и жёсткой, и в этом пункте учение стоиков нуждается в серьёзной корректировке.

Во-первых, границы контроля устанавливаются на основе реальности и с учётом неопределённости и случая, а также возможности преобразования реальности.

Во-вторых, нельзя обесценивать деятельность прогнозируемым отсутствием главного результата: любые результаты имеют промежуточный характер, а многие результаты неожиданны.

Кроме того, действенный характер имеет презумпция достижимости целей: для мотивации требуется некоторая неадекватность, завышенная самооценка, «позитивная иллюзия» — результат невозможен без настойчивости, которая часто пренебрегает калькуляцией шансов на успех.

И наконец, в установлении дихотомии контроля принимает участие не только знание, но и воля. Подобное установление границ требует решения — решения о зоне принимаемой ответственности, а эта зона ответственности способна расширяться до бесконечности.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главный тезис стоиков, а также ряда других школ эллинистической практической философии состоит в утверждении возможности разумного контроля человека над собственной жизнью, совместимого с исполнением общественных обязанностей и достижением счастья.

Эпоха Эллинизма оказалась наиболее плодотворной с точки зрения создания хорошо обос-

нованных этических концепций, которые и для современного мира, насыщенного техникой, технологиями и различными видами искусственной реальности, сохраняют своё значение в качестве источника идеальных поведенческих моделей, артикулированных нравственных мотивов, а также мировоззренческих ориентиров.

Актуальность эллинистических этических концепций, техник и практик объясняется в том числе и тем, что данная индивидуалистическая философия двухтысячелетней давности оказалась чрезвычайно созвучной современным общественным тенденциям к большей глобализации, гуманизации, личной ответственности и социальному участию.

Возрождение и актуализация эллинистических идей «незаметной жизни», умеренности и осознанного потребления опосредованно влияет на создание культурных условий для внедрения в социальные и производственные практики новых, более совершенных стандартов энергосбережения и ресурсосбережения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вебер М. Протестантская этика и дух капитализма. Избранные произведения. — М.: «Прогресс», 1990. С. 44-271.
2. Гадамер Х.-Г. Истина и метод. — М., 1988. 704 с.
3. Пильюччи М. Как быть стоиком. Античная философия и современная жизнь. — М., 2022. 279 с.
4. Слотердайк П. Критика цинического разума. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2001. 584 с.
5. Хаджикурбанова П.А. / Стоическая теория аффектов // Этическая мысль. Вып. 6. — М.: ИФ РАН, 2005. С. 76-89.



*A.A. Miliatzidou<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup>University St. Kliment Ohridski,  
Sofia, Bulgaria

## THE SHAPING OF IDENTITY IN CONSUMER SOCIETY

### ABSTRACT

The state of modern society has shaped our society into a society of consumers. In the light of those changes, we as human beings have changed the way in which we shape and define our identity through a more material way. This shift in the way we express our identities has an impact on both the field of work ethics and practices but also on the environment.

### 1. CONSUMPTION AND IDENTITY IN MODERN SOCIETY

While the notion of consumption is something that is synonymous to human beings in the sense that they have been at the top of the food chain for many centuries, the concept of consumerism, while definitely tied to consumption, is something that has emerged only in the past few decades. Nevertheless, while this concept is relatively new, it has come to play a significant role in the shaping of each individual human identity. While in the past human identity was shaped primarily of ethnicity, social structures, religion, family status and social as well as ethnic norms, the development of capitalist society resulted to the identity of human beings becoming to a significant degree a reflection of their economic status. This includes everything from the profession one has to their bank balance and, of course, their latest purchases. In a market based society, like the one we live in, a person is defined largely by how much money he or she has, but also by the way he or she spends that money. In other words, in postmodern societies the act of buying is not performed merely to cover our primal needs in terms of nutrition and clothing as it did in the past but also in order to create and shape our identity.

It is often the case that material things such as clothing are used in order to exhibit a part of our self. While it may come as a surprise that something as trivial as a piece of fabric can be used in order to express something as deep and complicated as our sense of self, there is evidence that this in fact is the case nowadays. It is worth noting that even the way we perceive the self, has dramatically changed in postmodern societies as opposed to the previously established Cartesian Ego. The perception of the self occurs not only through our self-perception but also through our surroundings. We tend to perceive ourselves through the eyes of the others. This gaze that falls upon us can be in the literal form of the eyes of the others but it can also take place in a

completely different setting such as that of the cyber world. While it is true that the presentation of ourselves to others has been taking place for many years and our appearance may possibly affect the opinion other have of us, social media platforms have provided us with a completely innovative, different environment where interaction occurs. For example, in the past, upon viewing a man wearing a suit and carrying a briefcase one could possibly deduce that that man works in an office and is not involved in any sort of manual labor. One could also possibly believe that we are talking about a serious man based on the choice of clothing. However, even though this kind of assumption is related to one's character to a certain degree, it does not in any way resemble the degree to which assumptions regarding identity occur in modern digital environments.

Modern digital platforms have provided their users with unprecedented amount of control over their image and the range of its projection. What used to be an affair of word of mouth and reputation in small societies where all inhabitants knew one another, has grown into an elaborate process of decision, fabrication and exhibition in which manipulation is a given factor. Living in a modern society means that we are constantly bombarded with a plethora of stimuli coming from a variety of sources such as television screens or internet advertisements that urge us to consume on a daily basis in order to achieve and maintain an identity that is desirable to others. In postmodern societies, the image we project on others becomes the social truth attached to our identity.

Even though this statement may sound terrifying to an individual, capitalist society presents us with a silver lining. You are able to control that image and therefore, you are also able to control how the others perceive you. Cave emphasizes how fashion can play a significant role in both expressing our sense of self through our clothing but also in how we can compensate for anything we believe we are lacking in. Therefore, the role of fashion related to identity is dual; it is used both to express and to create an identity. The first part of this is not something that is actually brand new in modern society. Ever since the cost of production decreased due to technological evolution and people became able to acquire more garments at a lower price, fashion started becoming a medium of expression and groups of people started using particular clothing or styles in order to distinguish themselves. Davis explains that clothing provides people with a way to communicate what they

want in a collective level, as a group [1]. Consequently, symbolic meanings of values, status and lifestyle are attached to clothing. A great example of such distinction through clothing could be the hippies or even the punks who used their different choices in clothing (that deviated from the norm of the time enough to become noteworthy) in order to stand out and express their beliefs and/or personal preferences. Such enhanced stylistic expressions turn into a tool which uses material culture as a medium to detect and differentiate cultural groups.

The second part however, that of creation of identity is definitely newer and is worth discussing. Of course even upon meeting someone in person in a traditional face-to-face context of communication, dishonesty can affect the perception of one's identity. However, social media allow for this dishonesty to take place in a completely different setting where each individual can orchestrate his or her entire personality even to the tiniest detail imaginable. This could include literally anything from the physical appearance to fashion choices but also things that are seemingly less material such as one's taste in music, his or her political beliefs and values. In a way, the digital media that we have grown accustomed to using in our day and age provide us with the means to create and act as an advertisement of our selves. We can create an image for ourselves that speaks for us even before we can utter a word. This function of material culture is not part of academic discussion just recently; Martin Wobst opened the discussion back in the 1970s by marking the stylistic choices as a way of information exchange. He explained however that this strategy inevitably leads to messages through style becoming predictable even though they did support ethnicity and reinforced stronger connections between members of social and ethnic groups thus leading to social differentiation [2].

This implies that upon meeting a person (and the term meeting here often implies an encounter in a digital environment and not face-to-face interaction necessarily) we start creating an opinion regarding his or her identity based on the cues that we receive. And since we know that we evaluate others based on the way they look and dress, we inevitably know that this is the way others perceive us as well. This leads in a circle where people both judge and get judged with a materialistic basis regarding something that used to be completely unrelated to materials.

Zygmunt Bauman emphasizes the way our society has evolved and how it has affected human identity by explaining that in the place of the society of production we now have the society of consumption [3]. This becomes evident if we think of how technological evolution has affected the process of production meaning that fewer and fewer workers are required for manual labor nowadays. This however does not mean that production has ceased; far from it, it is actually thriving now more than it ever did in the past. This has changed the role of humans from beings that spend a significant portion of their lives engaged in production to beings that are engaged with consumption. Of course, consumption has always been a key concept of human society as it logi-

cally follows production. Nonetheless, the consumer of postmodern society is radically different from the consumer of production society. By shedding the title of the worker, humans accepted the role of consumer in modern day society and they are judged by their ability and willingness to fulfill that role [4]. That willingness for Bauman included the refusal to commit as a consumer to any particular choice as there is always a better, smarter choice coming our way. However, Bauman insists that while most of us may want to act as consumers and take advantage by this overwhelming amount of choices at our disposal, not everyone is fortunate enough to do so [5].

## 2. THE CONSEQUENCES OF CONSUMER SOCIETY

While I recognize the truth in Bauman's statement for how consumer society functioned at the time most of his works were produced, today has brought forward a different situation. Nikolay Anguelov remarks that technological evolution (especially regarding the cost of materials) has created a market that is no longer reserved for the select few who can afford quality garments; instead now there is a market that is rapidly available to many people, created by many people and enjoyed by most [6]. With technology enabling us to accelerate the rate of production more and more, prices are getting lower and lower thus enabling more and more people to assume the role of consumers. At first this seems mostly like a great idea. After all, why wouldn't we want a world in which we are all able to buy what our hearts desire? There is however a dark side to this more accessible market. First of all, in order to accelerate production in a viable manner, corporations seek the most profitable conditions that will minimize the cost of production. This would include moving factories to developing countries with different working laws and while they generate a significant flow of income for developing countries in this way [7], they also promote economic activities and practices that take advantage of the workers [7] who are often children or people of very young age working in sweatshops. Bearing all of the above in mind it is important to comprehend that the availability of cheap garments to a significant part of the population (mainly residing in the West) means the exploitation and existence in cruel working conditions for a different part of the population.

Moreover, the rise of fast fashion practices which include cheap manufacturing, frequent consumption and short-lived garment use [8], has a significant negative effect on the environment as well. Increased water use, significant chemical pollution and CO2 emissions are some of the most important issues that rise from such practices while textile waste is also a prominent issue [8]. Considering the already critical condition our planet is, fast fashion is rapidly contributing to its decline one cheap garment at a time.

All of the above raise the issue of how much the process through which we shape our identity has grown so attached to materials that has inevitably become un-

ethical towards others and the environment. Human identity has turned from something entirely related to our inner self to something that is exhibited to the world through material goods that are meant to reflect the self. The modern state of consumer society has turned everything even things that used to be completely spiritual and immaterial to a series of products that are promoted and displayed as all advertisements. Consequently, human identity has become, as most things in our days yet another commodity that is created, polished, displayed and then discarded before being replaced by a newer flashier version depending on the needs of the world around us.

## REFERENCES

1. **Davis F.** Fashion, culture, and identity, 2-4. Chicago: University of Chicago Press, 2008.
2. **Wobst M.** "Stylistic Behaviour and Information Exchange." In Research Essays in Honor of James B. Griffin, edited by Charles E. Cleland, 317–342. Anthropological papers 61. Ann Arbor, Michigan, 1977.
3. **Bauman Z.** "The Self in Consumer Society." *The Hedgehog Review*, 1999, 35–40.
4. **Bauman Z.** *Liquid Modernity*, 53–91. Cambridge, UK: Polity Press, 2012.
5. **Angelov N.** *The Dirty Side of the Garment Industry: Fast Fashion and Its Negative Impact on Environment and Society*. Boca Raton: CRC Press, 2021.
6. **MacCarthy B.L.**, and P.G.S.A. Jayarathne. "Sustainable Collaborative Supply Networks in the International Clothing Industry: A Comparative Analysis of Two Retailers." *Production Planning & Control* 23, no. 4 (2011): 252–68.
7. **Shen B.**, Yulan W., Chris K. and Momoko S.. "The Impact of Ethical Fashion on Consumer Purchase Behavior." *Journal of Fashion Marketing and Management: An International Journal* 16, no. 2 (2012): 234–45.
8. **Niinimäki K.**, Greg P., Dahlbo H., Patsy P., Rissanen T., and Gwilt A.. "The Environmental Price of Fast Fashion." *Nature Reviews Earth & Environment* 1, no. 4 (2020): 189–200.

*N. Atanasova*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sofia University "St. Kliment Ohridski"  
Sofia, Bulgaria

## MANIPULATING ART'S DIGITAL SCARCITY: OWNING, SHARING AND DOWNLOADING PIECES OF DIGITAL CULTURE

### ABSTRACT

The manipulation of perceptions nowadays is used as a marketing tool to create demand for a proposed resource. On the other hand, scarcity in the digital space refers only to the notion of "granting access" to an object/service, as the availability of the resource can always be digitally replicated. On the other hand, the new technology of Blockchain and NFTs have contributed to the development of a new form of a digital market that depends on the paradox of digital excess and "sameness," creating both demand and scarcity for objects that are gratuitously retrievable via download on the Web. Consequently, the following paper argues that the more a digital artwork is available through the internet and is shared and downloaded, the more prestigious this resource becomes.

**keywords:** digital scarcity, sharing, artworks, ownership, NFT

### 1. INTRODUCTION

To publish something means to make it available for the use of others. Mainly, the act of publishing gives access to others, besides oneself, to something that was previously enclosed. In a certain sense, it can be said that what was once private is being given away. It is therefore an act of sharing with others.

Nonetheless, making something public for others to use opens it up to the possibility of being manipulated, changed and transformed. Thus, such an act of sharing is sometimes regulated by conditions that must be respected, in order for the shared object to remain available. But what about the immateriality and infinity of digital cultural resources, disseminated online and always already open to the possibility of being appropriated, reproduced ad infinitum and continuously retransmitted anew?

As Vilém Flusser points out, etymologically, it is the author who makes things grow [1]. So the role of the author is to make what is sown grow, but through its reproducibility and consequent ubiquity, it loses any relationship with its source - the author and the originator - the authority of the object is thus lost, and therefore, its originality.

The same happens with the act of publishing on the web: the replicability of what is published makes the authority and the relationship with the author of what is reproduced superfluous, thus giving life to infinite possible copies. On the other hand, a copy, always etymologically speaking, derives its meaning from the abundance and richness that can be drawn from a single source, namely "the original".

While, as Walter Benjamin stated that the more an image is technically reproducible, the more democratic that piece of culture becomes, thus opening up the space

of culture, in spreading it everywhere, not just limiting it to its designated space in galleries and museums [2].

Similarly, seen as one of the most democratic tools, the internet permits everyone to author, spread, use, own and exchange any piece of a cultural resource. Thus, today's economy mainly relies on artistic products in order to maintain its status of being based on information culture and the possibility of proclaiming the freedom in the realm of culture, present on the internet through the free access and free digital cultural artifacts. In fact, the structure of the internet, through its interface's embedded buttons for download, copying and sharing, implicitly gives permission to everyone present in the digital space to take what they see, thus establishing a culture of the free digital good, that everyone is allowed to take and use at their will.

While, Benjamin's theory of technical reproducibility eliminates the dichotomy between high and low art, thus democratizing culture, art spread by the "gift economy" of the Internet always grants access to a given intellectual/cultural object – a feature that could potentially increase the creativity of society through disposing and transforming what is already at hand, as a tool that can be used in order to create something different. On the other hand, this unlimited accessibility conditions society into thinking that culture is free and should remain free, but without sustaining those who have contributed to its production and have indiscriminately granted access. Today's economy takes advantage in its favour and most often than not, as the policies of the majority of social networks allow companies to use for their own benefit personal images shared on people's profiles.

This democratic utopia of the information culture has been constructed by the labour of artists who altruistically contribute to the erection of a society with no limits for knowledge. Thus, through the proliferation of digital cultural content of the web, art and artistic products are seen as gifts, satisfying the democratic thirst for freedom and egalitarian consumption [3].

### 2. GIFT ECONOMY

While scarcity was once strictly associated with physicality, in the digital space scarcity is manufactured. Today scarcity mostly regards the notion of the possibility of gaining "access" to the object of desire and not to its actual availability. Thus, digital scarcity is frequently an artificially constructed notion maintained by companies and corporations to create demand and desire for the proposed object (as the scarcity of domain names ending in .com, .org, or net extensions) [4]. In

these regards, while the idea of the copiousness and abundance of a resource carries the tranquillity of satiety, the idea of scarcity, on the other hand, is what makes a resource desirable. Perception manipulation is thus used as a marketing tool to create demand because, as Baudrillard states, desires are always manipulable [5]. Additionally, as claimed by René Girard, desire is mimetic and external - it is not a process internal to the subject, meaning that desire can be easily manipulated by external factors [6]. The concept of scarcity becomes a mechanism that regulates the production and consumption of needs and necessities. And as Baudrillard argued, "the satisfaction of needs is the precondition of consumption but not its definition – it is more than a practice of survival or sustainment" [7]. In these regards, every object we desire is already impregnated with connotations and associations that we make throughout our social life – furthermore, the object of our desire also always anticipates the possibility of new experiences to which we do not have access yet. Thus, consumption is a relation we make and have with objects, which is what Baudrillard means by stating that through consumption, we always manipulate signs [8].

On the other hand, following Simpson, what we own or have the possibility to own, nowadays, is just the temporary access to cultural experiences, such as when we access to streaming services, where we pay a subscription fee, based on a time limit we are given to make use of the desired object [9].

So in the case of digital culture and its artefacts, what is limited is just the time on one's disposal to spend while using the requested good. Leaving aside the claim concerning today's impossibility of really owning a resource – especially in real estate, nowadays it is difficult to own almost any kind of asset. As a matter of fact, almost everything in today's cultural industry is acquirable on the basis of renting, lending, or borrowing - similar to the management of a public library, where one could borrow a rare book with a set time of use, only in order for others to have the possibility to gain access to that book. In the case of digital culture, this latter feature is what is different from the library concept of the object's scarcity, as in today's digital culture industry resources are not limited or scarce, because of their inherent characteristic of replicability. On the other hand, the main similarity between the digital culture industry and the library example is the temporary access one gains by using their services. In fact, what is now limited and scarce is only the time one can spend with the desired good without negating others from simultaneously having the same good.

But the paradox of the digital culture industry field is that on the one hand, you have intellectual labour heavily regulated by copyright laws and on the other hand, there is a total dissemination of digital and virtual cultural goods that are easily retrievable via downloads, screenshots and others means of appropriation, via the web. From this, it can be inferred that, as free copies of digital goods annuls demand for these easily retrievable items, the role of the artificial digital scarcity is to create desire for consumption.

In fact, downloading, sharing, and uploading are all acts of consumption – to consume is to nullify through accomplishment and satisfaction and making one's own

– but at the same time, those acts are also acts of dissemination of the same content that has been consumed through its use [10].

Copies are all the same, and even if they are aesthetically just like the original, they are different while being homogenous. Nevertheless, as Theodor Adorno and Max Horkheimer also observed, the principle of replicability and equivalence is also at the center of commercial exchanges, which makes "what is heterogeneous comparable by reducing it to abstract quantities," giving so on to a continuous process of an ubiquitous fungibility of things [11].

Returning to Baudrillard, as previously stated, for an object to be consumed, it must become a sign, thus pointing toward a socially accepted and relevant meaning. As Baudrillard further explains, the object of consumption needs to become personalized according to the subject who desires it, as an object is consumed in its meaning and not in its materiality [12].

Furthermore, according to Baudrillard via Barthes, on a social level, after the advent of the car, the materiality of consumption has lost importance for the subject, through the act of (immaterial) driving. For the subject behind the wheel, who is in control of his path, movement, and direction, what matters is only her personal and subjective experience in using the car. Accordingly, the utopia of "symbolic exchange beyond equivalence" has been substituted by the "logic of "driving", thus erasing "a very subjective logic of possession and projection" [13].

As Flusser reminds, originally the meaning of cybernetics draws its origins from the Greek word for "steering", evolved in the Latin word for "governance". Thus, it is clear that, cybernetics has always been about taking control and responsibility in manipulating an object [14].

If, as Baudrillard states, consumption is a relation we make, and we have with objects, through the manipulation of signs, that is their socially accepted meaning. The use and consumption of any resource is also an act of acquiring one's social status through the object of interest. Thus, consumption can be viewed as the production of differentiation, status and prestige [15]. In these regards, the personalization and customization of a resource dictate "new principles to a social organization" thus, also forming consumer experience [16]. Although with the possible digital reproducibility, there might be the perception of sameness of the resources, the need to be in control of what is available is even greater – and while being controlled by the manipulation of digital content and its meaning, one feels the need to managing it according to her own subjectiveness and preferences.

### 3. NON-FUNGIBILITY

Following Walter Benjamin, with the advent of the industrial revolution, the once unique work of art is now subject to "technical reproducibility", thus losing its "aura" of originality [17]. However, in the digital space of communication and exchange, the more a cultural content is repeated, reproduced and exchanged, the more special that content becomes on a cultural and social level. Thus, instead of being redundant and

unnecessary, the reproduced object acquires even greater importance than the original source ever had.

Nevertheless, what happens in the case of the new technology for art production, namely the non-fungible tokens (NFT), is that free copies of the digital goods, which are easily retrievable from the internet (as a download), do not reduce the desire for paying in order to have them. They acquire the same logic of the web - the more an image is visible and present in the digital space, the higher its value as a non-fungible token. NFTs have thus contributed to the development of a new form of a digital market that depends on the excess of the same identical resource, while creating demand through an artificially constructed scarcity that advocates for the notion of "originality" in the space of digital culture.

Consequently, as stated above, the more a digital artwork is accessible on the web and is shared and appropriated through a download, the more prestigious it becomes for someone to claim ownership over it. Accordingly, if consumption is the production of differentiation, status, and prestige [18]. NFTs convey the feeling of prestige that the idea of ownership might often carry, but without negating others any access to the object of possession. In this case, what is owned by one is also possessed by many.

While Adorno and Horkheimer envisioned the universal fungibility of everything, the potential of the NFT is to refuse exchangeability by claiming unicity that is entirely re-constructed. A unicity and originality that return to the author, instead of coming from her. Moreover, also the non-fungible tokens manipulate the notion of scarcity for the benefit of all: without putting under a common denominator the nature of people, NFTs are made to consider those who, influenced by the notion of scarcity and fame act selfishly, feeling the need thus to appropriate what is scarce, and on the other hand of those who altruistically create and spread pieces of culture, in the digital space that is free for everyone to use [19]. Thus, in the case of the non-fungible tokens, what is possessed by many is owned by one.

Additionally, as claimed by Rancière, in the act of consumption, there always is the desire to liquidate the intermediaries between oneself and the object of their desire [20]. It is precisely because of this desire for the liquidation of the mediator, that the egocentric consumer can actually act altruistically, helping the art producers, by wanting to pay for the absence of the mediator, possible in the system of the NFTs.

Thus, NFTs create value and uniqueness where uniqueness was previously absent - within the banality of the most replicable and repetitive cultural object - which becomes an object of desire, exactly because of its property of replicability and redundancy.

Some might argue that the advent of the NFT new politics of art production enhances the commodification of art - nevertheless, this same art that is gratuitously exchanged and freely appropriated on the web is already being commodified at the moment in which one downloads the unit for the first time and passes it over to someone else. Free pieces of digital culture on the internet have the appeal of a gift - but they are just rewards for using the space of the internet and paying for

the rest of many inaccessible services in the form of a digital good, offered online.

It is clear that, the project of the NFT attempts to put in practice an idea that might resemble the act of giving the means of production in the hands of the art-workers, restituting them sovereignty over their own creation.

On the other hand, the repeatability inherent to the social exchange and its possible authority in the form of an NFT pose the question of creativity. Flusser wonders about the same issue in relation to the abundance inherent to the technical image. Or should we produce new things over and over again - prototypes - that will initiate another cycle of infinite repetitiveness - an abundant sequence of elements, when in fact "everything is readily available" [21]. The risk when choosing to repeat something until the point of making it redundant is that it actually could indicate a scarcity of imagination through the copiousness of the same. Nevertheless, Flusser suggests that something new can always be created out of the surplus and of the excess, which does not necessarily need to go to waste. As Baudrillard defined it, waste is everything that is unnecessary to one's sustenance or survival [22]. The ontological status of the NFT solves the problem of what is there to do with the ubiquitousness and copiousness of abstract objects such as those taking part in the field of digital art. NFTs propose a method of how not to forget and how to reuse that which is already there - on how not to put to waste what is in excess and to use it to the advantage of artists and their gesture of incommensurable equivalence - that of giving away to others [23].

In these regards, the web turns out to be a fundamental tool for organizing our everyday lives and our consumption - as non-fungibility resists exchange, stating unicity and incommensurability of its value, by always repeating the same, but in that way it legitimates the repeated impregnating it with social meaning through its continuous exchange and circulation [24].

## 4. IN CONCLUSION

NFT is still a new technology in its initial phase of development. Although being present as a tool since 2014, it was only in 2021 that this technology demonstrated its potential in recompensing justice to part of the most exploited roles in the capitalist system - that of the artist.

Thus, finally through the methods and techniques of manipulation of the concept of scarcity (the same method used by the current economic regime) the possibility of a new technology such as that of the NFTs art makers can seize the means of production in their hands, without sacrificing any form of distribution and access to knowledge.

### 4.1. Towards sustainability

There is an ongoing debate regarding the energetic use of the computers that allow the creation processes of NFTs - as such technology still prevalently consumes significant amounts of energy in generating assets. The actual consumption of the miners (the computers that generate the NFTs) cannot be estimated with precision, as every transaction is unique to every single digital creation, thus consuming each time a different amount of energy in the process. Still, the consumption of pow-

er of the miners is a crucial aspect that needs amelioration, especially when the energy use needs to be reduced in compliance with the UN energetic regulations for reducing the carbon footprint and with respect to the environment. The possibilities for social justice offered in the case of the NFTs are suitable for solving any distributive social inequality. Still, they do not fully respect the environment - which, again, in the bigger picture, turns back to us as a society. Now, many blockchain platforms that sustain the transactions and transferability of NFTs test new solutions (such as fewer computing machines for the transaction and also trying to invest in renewable sources) prompted by environmentally conscious artists, who have started researching new ways to take advantage of this new technology while also helping the environment. For example, in order to solve the problem of the negative environmental impact due to the production of cryptocurrencies, China has completely forbidden the use of any kind of cryptocurrency and NFTs. However, instead of solving the problem of the environment, such a decision just displaced the problem elsewhere, as the miners were transferred to other countries. In their study on the environmental impact of cryptocurrencies Jon Turby et al. [25] propose energetic efficiency taxations and financial obligations linked to miners' use of energy to reduce the damage. In fact, another option suggested by the authors of the study would be to switch to another less devastating technology for creating such resources, or perhaps to deepen the research into new possibilities for the miners to do the transfer and at the same time contribute to efficient energy creation. As a matter of fact, with the act of prohibiting the use of cryptocurrencies and NFT, having such a promising capacity to contribute to restituting justice to whom sacrifices themselves in the name of culture, would mean to return a step back to when such a project did not exist yet. Thus, making it illegal, as in the case of China, would signify erasing any progress towards new democratic possibilities that could ameliorate the production and dissemination of creativity. Maintaining such a project for encouraging creativity could be helpful not only to art but also to the future healthy formations of social relations, thus also facilitating bureaucracy and making the administrative sphere more transparent and just. Instead, it is clear that the innovative project offered by the technology of NFTs, through its automated and self-sufficient technology and methods, has attempted to take a chance on the long-awaited moment of self-governance of the creative individual. Thus, by proposing this novel aesthetics of exchange, NFTs are enhancing the individual's creative autonomy, through the manipulation of scarcity for the benefit of those who have always been the most disadvantaged by the current economy and more precisely, by its use and manipulation of the idea of scarcity.

## REFERENCES AND NOTES

1. **Flusser V.** Into the Universe of Technical Images / N. A. Roth, Trans. Minneapolis: University of Minnesota Press. 2011. p. 96.
2. **Benjamin W.** The Work of Art in the Age of Mechanical Reproduction // Illuminations / Hannah Arendt, Ed., H. Zohn Trans. (1935) New York: Schocken Books. 1969.
3. **Rancière J.** The Emancipated Spectator. Verso: London, 2009.
4. **Brekke K. J.** Digital scarcity // Glossary of decentralised technosocial systems. Vol. 10, issue 2, 2021. available on: <https://policyreview.info/glossary/digital-scarcity>.
5. **Baudrillard J.** Consumer Society // Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001. p. 39
6. **Girard R.** Violence and the Sacred // Things Hidden Since the Foundation of the World. John Hopkins University Press. 1977 p.146, as well as **Oughourlian J. M.** Desire is Mimetic: A Clinical Approach // Contagion Journal of Violence, Mimesis, and Culture 3. 1996. pp. 43-49.
7. **Baudrillard J.** The System of Objects // Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001. p. 22.
8. **Baudrillard J.** The System of Objects // Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001. p. 23 -25.
9. **Simpson J.** The Nft: A wealth and poverty of imagination, *Aesthetics for Birds: 2021* <http://lnr.li/KYghH>
10. **Baudrillard J.** The System of Objects // Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001. p. 23 -25.
11. **Horkheimer M., Adorno T.** The Dialectic of Enlightenment. Stanford Press / John Cumming Trans. (1944), p.7.
12. **Baudrillard J.** Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001. p.22 .
13. **Baudrillard J.** The Ecstasy of Communication // The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture/ H. Foster Ed. Bay Press. 1987. p. 127.
14. **Flusser V.** Into the Universe of Technical Images / N. A. Roth, Trans. Minneapolis: University of Minnesota Press. 2011. p. 123.
15. **Baudrillard J.** The Ecstasy of Communication // The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture/ H. Foster Ed. Bay Press. 1987. p. 127.
16. **Krupar S. and Al S.** Notes on the Society of the Brand // The Sage Handbook of Architectural Theory. 2011. 248.
17. **Benjamin W.** The Work of Art in the Age of Mechanical Reproduction // Illuminations / Hannah Arendt, Ed., H. Zohn Trans. (1935) New York: Schocken Books. 1969.
18. **Baudrillard J.** The Ecstasy of Communication // The Anti-Aesthetic: Essays on Postmodern Culture/ H. Foster Ed. Bay Press. 1987. p. 127.
19. The idea of scarcity of an object manipulates behavior — inciting the birth of desire, which according to René Girard has a competitive character. See **Girard R.** Violence and the Sacred // Things Hidden Since the Foundation of the World. John Hopkins University Press. 1977 p. 146.
20. **Rancière J.** The Emancipated Spectator . Verso\_ London. 2009. p.39.
21. **Flusser V.** Into the Universe of Technical Images / N. A. Roth, Trans. Minneapolis: University of Minnesota Press. 2011. p. 61.
22. **Baudrillard J.** Consumer Society // Selected Writings / M. Poster Ed. Stanford University Press. 2001.
23. Such a gesture reminds of the act of the sacrifice – an incommensurable act of giving away oneself until one's perdition.
24. **Mehta R. and Zhu M.** in their Creating When You Have Less: The Impact of Resource Scarcity on Product Use Creativity – the authors state that having less resources tends to make consumers “think beyond the traditional functionality of a given product”, consequently enhancing product use creativity. / *Journal of Consumer Research*, Volume 42, Issue 5, February 2016, pp. 767–782.
25. **Truby J, Brown R. D., Dahdal A., Ibrahim I.** Blockchain, climate damage, and death: Policy interventions to reduce the carbon emissions, mortality, and net-zero implications of non-fungible tokens and Bitcoin // *Energy Research and Social Science Journal*, Vol. 88, June 2022.



С.В. Хохлов<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия**ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕСУРСОВ КАК ФИЛОСОФСКАЯ ПРОБЛЕМА****АННОТАЦИЯ**

Статья направлена на освещение с философских позиций вопросов потребления ресурсов. Задача философского осмысления данной проблематики в условиях культа потребления материальных благ видится в поиске новых векторов и подходов, призванных установить консенсус межчеловеческих отношений при сохранении достаточности ресурсов для жизнедеятельности человечества в обозримом будущем.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Потребление человечеством ресурсов, многие из которых ограничены в своем количестве и относятся к не возобновляемым, представляется не только экономико-правовой, но и философско-социологической проблемой, приобретающей при этом глобальный характер. Среди других проблем общемирового масштаба, таких как войны, перенаселение, загрязнение окружающей среды, эпидемии и болезни, бедность, проблема ограниченности запасов природных ресурсов все более занимает человечество. Причем, необходимо понимать, что все эти проблемы так или иначе взаимосвязаны между собой и одни из них провоцируют другие.

**2. ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕСУРСОВ  
В ФИЛОСОФСКОМ ПОНИМАНИИ****2.1. Общая характеристика ресурсов**

Само понятие «ресурс» французское по происхождению означает «вспомогательное средство». Существуют различные основания классификации ресурсов.

Природные ресурсы принято подразделять на неисчерпаемые и исчерпаемые, которые в свою очередь бывают возобновляемые и не возобновляемые (нефть, газ, уголь и т.п.).

Особое значение имеют энергетические ресурсы – то есть те, которые используются для извлечения энергии. Многие столетия и тысячелетия люди использовали химическую энергию дерева, энергию воды на плотинах, ветровую и иные виды природной энергии. К XIX-XX веку главными источниками энергии становятся, нефть, каменный уголь, природный газ. Энергетические ресурсы играют ключевую роль в современной экономике и потребляются как для производственных целей, так и для личных целей отдельными индивидами, гражданами. Есть и другие виды ресурсов, такие как инфор-

мационные, трудовые и прочие. Их значимость для экономики также велика, но в контексте рассуждений о необходимости снижения уровня потребления наибольшее значение приобрели мероприятия и дискуссии по отношению именно к энергетическим видам ресурсов.

**2.2. Предпосылки возникновения полемики об экономии ресурсов**

Начиная со второй половины XIX и особенно в XX веке, вторжение человека в биосферу стало настолько мощным, что природе все сложнее восстанавливаться. Большого количества ресурсов требует промышленность, строительство, энергетика, транспорт, сельское хозяйство и другие отрасли хозяйства. В работах, написанных в начале 70-х годов XX века в рамках Римского клуба (объединение ученых и политических деятелей, моделирующих сценарии перспектив развития человечества и биологической сферы), утверждалось, что при тех же темпах роста населения на Земле в первой половине XXI столетия все доступные ресурсы будут исчерпаны. Было предложено минимизировать и даже свести к нулю рост материального потребления в развитых странах. Также было предложено проводить мероприятия, направленные на ограничение рождаемости в государствах азиатского региона. Человечеством данные мероприятия были восприняты неоднозначно ввиду наличия нравственного аспекта. Критическим образом были восприняты и идеи по затормаживанию технического прогресса. Достаточно сложно было принять с воодушевлением призывы отказаться от привычного многим материального благосостояния, комфорта и привычного объема потребления, что означало бы понижение материального уровня жизни людей. В итоге, к концу XX века попытки остановить рост материального потребления не увенчались успехом, их культ, по сути, не изменился. Что же касается экологических проблем (выбросы в атмосферу и водную среду, сокращение лесов), то такие проблемы, в некотором смысле, даже обострились, приобретя глобальный масштаб [1].

Однако на данный момент исчерпание ресурсов пока не наступило. Вновь проведенные подсчеты дали человечеству еще как минимум несколько десятилетий до полного израсходования нефти и газа.

Надо сказать, что угольных запасов на планете гораздо больше, чем нефти и природного газа, но и

его запасы не безграничны. Потребление этого ресурса значительно увеличилось не только в развивающихся, но и в развитых странах с высоким уровнем жизни и высокими доходами в расчете на душу населения. По существующим прогнозам, запасов угля должно хватить еще приблизительно на 400 лет. Но если его потребление будет расти большими темпами, то запасы могут исчерпаться гораздо ранее.

Тем самым, точные подсчеты по любым видам ресурсов сделать довольно сложно.

Сегодня, очевидно, что наступление пределов роста и апокалипсис человеческой цивилизации пока откладывается на неопределенный срок [2].

В связи с быстрым ростом потребления энергии возникли многочисленные проблемы. Соответственно, ученых и практиков волнует вопрос о будущих источниках энергии. Нельзя не отметить, что проводится активная деятельность в области энергосбережения, которая еще несколько десятилетий назад не была столь системной хотя бы даже в отдельно взятых странах. Человечество находится в поисках более чистых видов энергии. Имеются в виду солнечная, геотермальная, ветровая и иные виды энергии.

В этой связи перед философией возникает сложная задача осмысления имеющихся глобальных противоречий, чтобы находить новые ответы на существующие вызовы современности и будущего [1].

Все глобальные проблемы экологического, демографического и иного характера, связанные с потреблением ресурсов философия призвана рассматривать в разрезе возможностей обеспечения комфортной жизни человечества и сохранения человеческой сущности. Для философии традиционно характерно задаваться вопросами о том, что представляет собой мир и что представляет собой человек и вопросами о месте человека в этом мире.

Активное потребление ресурсов для производственных и личных целей, приводящее к целому ряду проблем, стимулирует интерес к использованию экономических и экологических ресурсов, что естественно должно решаться без отрыва от гуманитарных и нравственных вопросов с помощью философского знания.

### **2.3. Последствия и эффект расширяющегося потребления в современных условиях**

Рост потребления различного вида ресурсов, сопровождаемый непрекращающимся ростом населения на планете, вызывает необходимость увеличения добычи сырьевых ресурсов, наращивания производства.

Решение данных задач осложняет экологическую ситуацию.

Большее потребление ресурсов требует поиска новых и расширения существующих мест для утилизации отходов. Имеют место и многие другие негативные последствия, вызванные широким потреблением ресурсов.

По некоторым оценкам демографов население планеты Земля может достичь 12 млрд и тогда наиболее остро будет ощущаться дефицит в таких ресурсах как вода, нефть и прочее. Будут и проблемы, связанные с нехваткой территории, пригодной для проживания. В различных странах и регионах мира проблема нехватки тех или иных ресурсов может достичь своего апогея и начать распространяться на другие страны и регионы. При высоком уровне истощения природных ресурсов вкупе с другими проблемами реальна угроза экологических катастроф [1].

В то же время существуют и иные оценки, предрекающие остановку роста численности населения, скажем на 9 млрд, то есть уровне, который будет еще допустимым для Земли.

## **3. ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ**

### **3.1. Характеристика предпринимаемых мер и их нравственная оценка**

Каковы же могут быть способы предотвращения глобальных катастроф, вызванных истощением ресурсов и перенаселением Земли?

В недавней истории имеются примеры политики, проводимой в некоторых странах по ограничению рождаемости.

Программа планирования семьи была принята в Индии в период правления Индиры Ганди в 1976 году. Говорилось о возможности пренебрежения правами личности во имя права нации, права на прогресс. Такие взгляды излагались политическим руководством страны. Неудивительно, что многими людьми подобные меры были восприняты как геноцид. Имели место выступления несогласных лиц в отдельных районах Индии.

Можно привести в качестве примера практический опыт Китая в данной области. С 1971 года руководство этой страны, осознав опасность стремительного роста населения, приняло программу ограничения рождаемости. Но этого оказалось недостаточно. В 1978 году провозгласили лозунг «Одна семья – один ребёнок». Таким семьям были предоставлены различные меры социальной поддержки: бесплатное образование и медицинские услуги, увеличенные пенсии и т.д. В ряде случаев китайским гражданам удалось снизить среднее количество детей в семье до двух [1].

Однако, подобного рода политика, как в Индии, так и в Китае удостоилась самой неоднозначной реакции и расценивалась во многом как безнравственная, антигуманная.

Следует сказать о так называемом движении «Зеленых», в основе которого экологичное использование ресурсов, отказ от вредных производств, машин, оборудования и так далее.

Надо полагать, что в условиях экологического кризиса деятельность данного движения может являться конструктивным способом преодоления экологических проблем [3].

Однако, при попытке исследования философских оснований «зеленого капитализма» и оценке возможностей их реализации в системе хозяйствования различных стран обнаруживается немало противоречий.

Можно наблюдать множество призывов к экономии, сбережению, ограничению потребностей во благо будущих поколений. «Зелеными» декларируется бережное отношение к ресурсам. Но, это совершенно не соотносится с идеологией безудержного потребления, восхваляемой и распространяемой западными государствами на протяжении многих лет. Идеология потребления была необходима для развития капиталистической экономики и поддерживалась целым арсеналом способов.

Население «золотого миллиарда» (самые богатые и развитые страны) именно так и жило, а остальной мир во многом пытался и пытается до сих пор им подражать.

У многих вызывает сомнение то, с какой быстротой изменились лозунги потребления на лозунги экономии. Стали выдвигаться призывы минимизировать использование природных ресурсов и экономить ресурсы, уменьшать антропогенное влияние на климат, оберегать озоновый слой и т.д.

При этом призывы к «зеленому росту» часто адресованы странам, стоящим в начале пути экономического роста. В 1992 году было анонсировано, что путь экономического развития развитых стран, неприемлем для развивающихся, ввиду ограниченности ресурсов планеты. Тем самым, напрашивается вывод о необходимости недопущения нежелательных сценариев.

Высказываются мнения о том, что если «зеленый капитализм» и существует как экономическая реальность, то наиболее близки к ней экономически развитые страны Европы, например, Германия. Не один десяток лет в Германии существует специфическая практика хозяйственной деятельности – «ландшафтное планирование».

В рамках такого планирования проводится экологическая экспертиза, которая определяет различные типы землепользования для той или иной территории [3].

Определенных успехов в политике энергосбережения и экономии ресурсов при сохранении достойного уровня жизни добились скандинавские страны.

Безусловно, заслуживают внимания и уважения переработка использованных материалов, разделение мусора, расширение использования электромобилей. Вместе с тем, до полного отказа от вредного и неэкономичного использования производств и механизмов еще очень далеко.

В ряде западных (и не только) стран имеет место высокая стоимость воды, бензина и прочих товаров, что также воспринимается неоднозначно.

Представляется, что, для того, чтобы иметь эффект в виде отказа от использования автотранспорта, нужен комплекс иных мер, таких как строительство развитой сети велодорожек, запуск электробусов. Без предложения какой-либо альтернативы на смену бен-

зину и нефти, сокращение загрязняющих атмосферу ресурсов, видится проблематичным.

Можно бесконечно приводить массу подобных примеров.

Таким образом, со стороны государств помимо организационно-экономических мер необходим и комплекс мер по экологическому воспитанию и образованию. В частности, особую актуальность на текущий момент приобретает аккуратное обращение с огнем как способ избежать сокращения лесных ресурсов вследствие пожаров.

### **3.2. Гуманизм как ориентир в поиске путей решения проблемы. Роль философии**

Глобальные проблемы современности и, прежде всего, резкое обострение экологической проблемы, поставило перед человечеством задачу поиска новых путей развития, переосмысления отношения к окружающему миру. Данные вопросы решаются не только на национальном уровне, но и в рамках крупных международных организаций. Одной из таких организаций является вышеупомянутый «Римский клуб». Им были организованы важные исследования и смоделированы сценарии развития кризисных тенденций во взаимоотношениях между человечеством и окружающей его средой. Д. Форрестер, Д. Медоуз, М. Месарович и Э. Пестель и другие исследователи усматривают основную проблематику в безудержном научно-техническом прогрессе, ориентированном на возрастающее потребление. Из этого следует, что человечеству необходимо принимать меры, направленные на ограничение технико-экономического развития [1].

Однако, в решении этих проблем необходима некая общая идея, нечто вроде «философии преодоления кризиса». Философами ставится вопрос о необходимости изменения пути развития современной цивилизации. Есть мыслители, солидарные в том, что глобальные проблемы современности – это не чисто экономические, политические или научные проблемы, а, прежде всего, проблемы духовно-нравственные по своему характеру. Решение данных проблем немислимо без внутреннего преобразования человечества, переориентации людей с мирских ценностей на ценности духовные. Речь идет об изменениях социальных и нравственных установок личности и общества, об изменении мышления и мировоззрения.

Появлению глобальных проблем современности предшествовало широкое распространение идей потребления. Современное производство позволяет удовлетворять многие потребности населения. Более не является такой острой проблемой добытие пищи по сравнению с прошлыми эпохами, когда приходилось затрачивать большой объем времени и усилия на охоту, земледелие. Многие процессы стали автоматизированными. Однако современный человек все более и более попадает в зависимость от многообразия вещей. Каждое последующее удовлетворение какой-то потребности порождает у человека новую дополнительную потреб-

ность. Таким образом, человек попадает в бесконечный круг.

Распространение идей потребления наносит немалый урон духовности, способствует некритическому отношению к окружающей действительности, развитию конформизма. Французский философ-персоналист Ж.-М. Доменак обращает внимание на то, что потребление становится чуть ли не общественным достоянием. Внешне свободное общество трансформируется в квазитоталитарную систему, в которой индивид превращается в дисциплинированного производителя-потребителя [1].

Не утрачивают своей актуальности взгляды Г. Маркузе, Ж. Делеза и Ж. Бодрийяра, сформулированные ими несколько десятилетий назад. В их работах потребление становится звеном в цепи широкого символического обмена, который включает в себя всех членов общества.

Неофрейдист и неомарксист Г. Маркузе высказывает мысли о том, что современное общество предстает для него обществом «одномерного человека». Это «одномерное общество» стало возможным, по его мнению, благодаря «новым формам социального контроля»: массовой культуре и рекламе, которые, производя новые потребности, объединяют людей вокруг потребления. В таком обществе истинные потребности уступают место ложным – «расслабляться, развлекаться, потреблять и вести себя в соответствии с рекламируемыми «идеалами», любить и ненавидеть то, что любят и ненавидят другие» [4].

Из-за массового и стремительного распространения идеологии потребления в сознании человечества укрепляется мнение, что целью и смыслом его жизнедеятельности является производство вещей и их потребление.

По мнению известного французского философа Ж. Бодрийяра, рост изобилия, то есть возможность располагать все более многочисленными индивидуальными и коллективными благами и оборудованием, имеет в качестве своей противоположности все более серьезную «вредоносность»: это последствия промышленного развития и технического прогресса, с одной стороны, самих структур потребления – с другой [5].

Это, вне всякого сомнения, наносит урон духовному миру личности, ограничивает её всестороннее развитие. Бодрийяр считал, что «риск, которому подвергается человеческий род, связан, скорее не с нехваткой, вызванной истощением природных ресурсов, грабительским отношением к окружающей среде и т.д., но с излишествами...».

В современной России, к сожалению, также имеет место популярная идеология потребления самых различных ресурсов. Экологичное и экономичное использование ресурсов не внедрено в достаточной степени. К примеру, мы можем использовать дешевую бытовую воду, и ее расходование не такое экономичное, как в европейских странах.

Выход из описанной проблемы ограниченности ресурсов многими мыслителями, в том числе философами, видится в самоограничении производства и

потребления, принятии идеологии «нового аскетизма». В религиозной философии может быть предложена переориентация людей с материальных ценностей на духовные. Важная роль отводится идее необходимости восстановления связи человека с Богом. Религиозные мыслители XX века предостерегали о забвении Бога при достижении высокого уровня обладания всеми необходимыми вещами. Данные идеи с развёрнутым изложением своих воззрений можно найти, например, у Н.А. Бердяева.

Существенную роль в решении глобальных проблем должна сыграть новая культура мышления, прежде всего, экологическая. «Мыслить глобально, действовать локально» – широко распространенный призыв для решения многих глобальных проблем. Рассуждая о необходимости изменения ориентиров мышления и формирования основ экологической культуры и образования, можно прийти к выводу, что познание мира и сохранение окружающей среды должно стать для современного человека интеллектуальной и жизненной необходимостью. По средством воспитания в семье и школе необходимо привить каждому ребенку основы экологических знаний и культуры, бережного отношения к природе, ко всему живому, в том числе и к человеку. Государство же, в свою очередь, может и должно этому всячески способствовать с помощью законодательства, средств массовой информации, образовательных программ и иных рычагов воздействия. С. Лем утверждал: «Всякую угрозу для цивилизации можно свести либо к неумению овладеть общественными силами, либо к неумению овладеть силами Природы. В обоих случаях речь идет, таким образом, об одном и том же типе источника угрозы: этим источником служит невежество – незнание законов развития, будь то общественного, будь то естественного, природного» [1].

Принципиальное преодоление глобальных проблем – нелегкая задача, не имеющая на текущий момент однозначного и эффективного решения. Вместе с тем многие мыслители призывают к укреплению в сознании масс новой этики, дальнейшему развитию культуры и ее гуманизации.

Описание всех бед, негативных сценариев будущего можно продолжать до бесконечности. На этот счет накоплена немалая документальная база. Для философии же важно не только оперировать фактами, а уметь делать определённые обобщения и выводы по закономерностям развития того или иного явления.

Делаются выводы, что человек способен выжить в пределах достаточно ограниченной экологической ниши, то есть совокупности различных условий и факторов окружающей среды. В современной цивилизации возможности приспособления человека к условиям жизни в окружающей среде не столь велики. Это касается и температурного режима условий проживания, использования определенных материалов для строительства жилья, материалов для одежды, потребления определенных продуктов питания. Для создания и обеспечения современного

существования человека недостаточно ресурсов природы в своей первозданности и не подвергнутых обработке или производству.

Решение глобальных проблем современности – это общее дело всего человечества. Человечеству важно налаживать эффективные формы сотрудничества и взаимодействия, которые позволили бы всем странам действовать сообща, несмотря на различия социально-политических, религиозных, этнических и иных мировоззренческих ориентаций. Для этого представляется необходимым опираться на определённые базисные ценности. Многие современные философы небезосновательно полагают, что такими базисными ориентациями могут быть ценности гуманизма. Исторически под гуманизмом чаще всего понимают систему ценностных установок, направленных на удовлетворение потребностей человека. В этом смысле понятие «гуманизм» совпадает по своему значению с понятиями человечности и уважительного отношения к человеческой личности.

Гуманизм как определённая система ценностных ориентаций и установок, рассматривает человека как высшую цель общественного развития, в процессе которого обеспечивается создание необходимых условий для полной реализации всех возможностей, достижения гармонии в социально-экономической и духовной сфере жизни, развития конкретной человеческой личности.

Глобальные проблемы современности в контексте гуманистических принципов – это осознание трагических перспектив будущего человечества перед вызовами голода и экологической катастрофы вследствие чрезмерного потребления ресурсов. Вышеописанное стимулирует к преодолению локальных, относительных ценностей и обращению к поиску непреложных вечных общечеловеческих ценностей. К этому человечество побуждает не только стремление к дальнейшему существованию цивилизации, инстинкт самосохранения, но и имманентная потребность человека в наличии гармоничной взаимосвязи с другими членами общества. Общечеловеческие ценности рассматриваются как трансцендентные ценности, интерпретируемые как универсальные. Они в той или иной степени принадлежат всем народам, но не у всех выражены однородно. Эти ценности обусловлены особенностями культурно-исторического развития той или иной страны, того или иного народа, его религиозными и иными традициями.

Трансцендентные ценности имеют глубокий смысл, который не всегда может быть осознан, поскольку его осознание связано с обращением к исконным истокам фундаментальной исторической традиции, сохраняющей своё духовное содержание [1].

Следует отметить, что в России существует философская традиция исследования созидющей, творческой роли человека в развитии природы.

Сюда можно отнести философские идеи космизма, ноосферную концепцию, идеи философов В. Соловьёва и Н. Бердяева касательно творческой роли человека и иное [3]. Наличие такого философского наследия вполне может быть задействовано в поиске решений современных проблем и вызовов, стоящих перед человеческой цивилизацией.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение представленной темы приводит к пониманию необходимости обеспечения человечества требуемыми ресурсами, включая продовольствие, сырьё и источники энергии. В то же время необходимо дальше развивать энергоёмкие и экологичные производства. Для глобального их распространения необходимо выстраивание общего диалога между различными государствами.

Немецкий философ, представитель экзистенциального направления, К. Ясперс предсказывал, что человечество обречено на общность судьбы и единую веру. В противном случае история человечества может закончиться катастрофой. Поэтому установление взаимопонимания, открытость различных типов общества, религий и культур является жизненно необходимым для человечества. Отсюда вытекает особая роль философии, которая, по его мнению, с помощью философской веры, открывающей смысл и предназначение истории, призвана и способна объединить человечество на общих духовных основаниях [6].

Изречение, сформулированное известным философом, представляется достаточно актуальным в свете решения любых глобальных проблем, включая и проблему сохранения природных ресурсов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. **Волкова Т.И.** Философские основания глобальных проблем современного общества. Учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЧелГМА, 2008. 44 с.
2. **Гузенкова Т.С.** Глобальный кризис глазами глобалистаторов. Как эксперты Римского клуба хотят предотвратить планетарную катастрофу // Свободная мысль. 2019. № 1 (1673). С. 23 - 38.
3. **Захарова О.В.** Философия «Зеленого капитализма» // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 26 (381). С. 62 - 67.
4. **Ланцев А.О.** Становление концепта «общество потребления» в западной философии. От античности к современности: автореф. дисс. канд. филос. наук: 09.00.03 / Ланцев А.О.; ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – Екатеринбург, 2013. 35 с.
5. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. Его мифы и структуры / Бодрийяр Жан; перевод с французского, послесловие, примечания Е. А. Самарской. – М.: Республика: Культурная революция, 2006. 269 с.
6. **Ясперс К.** Смысл и назначение истории. – М.: Республика, 1994. 527 с.

*Д.Д. Антипова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Данная статья раскрывает историческое формирование правового регулирования, начиная с времен добычи нефтепродуктов в Советском Союзе. Рассматривается процесс перехода к новым источникам энергии, а также основы правового регулирования, процесс развития и изменения законодательства Российской Федерации. Рассмотрены основные направления государственной политики по вопросам энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Изучаемая проблематика раскрывает основные законодательные акты Российской Федерации, действующие по сей день. Также дается пояснение и выводы относительно несовершенства существующего процесса правового регулирования сферы энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Разобраны законодательные органы и органы, принимающее активное участие в разработке и реализации правовых актов в РФ.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

На современном этапе развития экономики России огромное внимание уделяется проблемам развития и повышения эффективности в области энергетики. Учитывая, что Российский топливно-энергетический комплекс занимает одну из лидирующих позиций на мировом рынке, следовательно, является одной из основополагающих направлений развития экономики страны в целом. По данным Росстата, топливно-энергетический комплект формирует около 25% валового внутреннего продукта России, 40% доходов бюджета, а также более половины российского экспорта. Таким образом, благодаря развитию энергетического сектора экономики, в стране формируется достаточное количество рабочих мест, а также происходит пополнение бюджета страны для нормального функционирования государства.

### **2. ПРОБЛЕМАТИКА ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Уже в 70-х – 80-х годах Советский Союз вышел на лидирующую позицию по добычи нефти в мире, при этом темпы роста по добычи нефтепродуктов росли с огромной скоростью [5]. С такими же темпами росли и добыча природного газа, но сниженные возможности по его транспортировке, не давали электроэнергетике их использовать в полном объеме и приводили к замещению более дешевыми нефтепродуктами.

Таким образом, с 70-х годов начался процесс постепенного перевода энергетики страны с нефти на природный газ. На сегодняшний момент Россия переключилась на природный газ, который намного экономичнее и более энергетически выгоднее в использовании, а также более экологичнее, чем использование нефти.

В связи с этим за период с 70-х годов Советского Союза по 2013 - 2015 годы Российской Федерации энергетическая сфера страны осуществила огромный рывок в вопросах повышения энергетической и экономической эффективности энергетики, вследствие чего Россия заняла в этом вопросе передовые позиции в мире. Но процесс дальнейшего улучшения и повышения эффективности энергетической сферы стало одной из серьезных проблем современности во всем мире.

Для более эффективного использования энергетических ресурсов необходимо привлекать разработки из сфер возобновляемых источников энергии, использование которых в крупных масштабах приводит к серьезным вложениям. Или использование разработок термоядерной энергетики, что также не нашло твердого основания для экономической эффективности. Более того с 2013 - 2015 годов серьезный вопрос из области энергоэффективности переместился в область транспортировки и потребления энергии. Все это требует серьезной государственной политики, направленной на вопросы энергосбережения и энергетической эффективности.

Главными факторами дальнейшего повышения энергетической эффективности становятся: обеспечение дальнейшего экономического роста за счет инноваций на основе новейших научных достижений и применение действенных правовых регуляторов. Таким образом, одной из функций эффективности государственного регулирования становится эффективность энергии [5].

Несмотря на масштабы запасов энергоносителей, Российская Федерация приступила к разработке правового механизма регулирования энергосбережения, а также к осуществлению государственной политики по энергосбережению и повышению энергетической эффективности не так давно. В данной ситуации необходимо было разработать законодательство, а также государственные программы, нацеленные на получение серьезных результатов.

Таким образом, с 2008 - 2009 годов в нашей стране значительное внимание отводится процессу законотворчества в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Основная деятельность по нормотворчеству в данной сфере отводится Государственной Думе РФ, где, в частности, особое внимание уделяется Комитету по энергетике, возглавляемому на сегодняшний день П.Н. Завальным. Данный орган государственной власти принимает активное участие в разработке подходов правового регулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности, а также играет важную роль в процессе реализации федеральных законов.

Таким образом, в 2009 году был принят один из основополагающих федеральных законов в сфере энергосбережения, а именно Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». В тот же период развития нормативного регулирования сферы энергосбережения и повышения энергетической эффективности в России принимаются следующие законы и нормативно-правовые акты:

1. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 года № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики»

2. План мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации, направленных на реализацию Федерального закона "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". Утвержден распоряжением Председателя Правительства РФ 1 декабря 2009 года № 1830-р.

3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Председателя Правительства РФ от 13 ноября 2009 года № 1715-р

Важной целью государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности на сегодняшний момент является рациональное использование энергетических ресурсов на основе обеспечения заинтересованности их потребителей в энергосбережении, повышении собственной энергетической эффективности и инвестировании в эту сферу [1].

В соответствии с энергетической стратегией России намечается существенное снижение энергоёмкости экономики страны [4]. Это выразится в сокращении к 2030 г. удельной энергоёмкости ВВП - более чем в 2 раза.

Целью принятия закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергоэффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» является создание правовых, экономических и организационных основ стимулирования энергосбережения и повышения энергетической эффективности [1].

Государственное регулирование в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности осуществляется путем установления:

- требований к обороту отдельных товаров, функциональное назначение которых предполагает использование энергетических ресурсов
- запретов или ограничений производства и оборота товаров, имеющих низкую энергетическую эффективность
- обязанности по учету используемых энергетических ресурсов;
- требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений;
- обязанности проведения обязательного энергетического обследования.

Таким образом, можно выделить основные приоритетные направления государственной политики России [2]:

1. Энергетическая безопасность:
  - полное и надежное обеспечение населения, объектов бюджетно-социальной сферы и предприятий всех форм собственности энергоресурсами по доступным ценам;
  - снижение рисков и недопущение кризисных ситуаций в обеспечении всеми видами энергии;
  - дальнейшее формирование целостной энергетической системы на основе существующего пространства межрегиональных топливно-энергетических услуг и связей.
2. Энергетическая эффективность экономики:
  - снижение удельных затрат на производство и использование энергоресурсов за счет рационализации их потребления;
  - применение энергосберегающих технологий и оборудования во всех секторах социально-экономической жизни;
  - максимально полное и эффективное использование местных топливно – энергетических ресурсов, включая возобновляемые источники энергии.
3. Экономическая (бюджетная) эффективность энергетики:
  - развитие и территориальная диверсификация энергетической инфраструктуры;
  - реконструкция, модернизация и техническое перевооружение действующих мощностей топливно-энергетического комплекса;
  - оптимизация государственного воздействия на функционирование топливно-энергетического комплекса;
  - расширение практики взаимодействия государства и частного бизнеса;
  - стимулирование энергосбережения населением и хозяйствующими субъектами.
4. Экологическая безопасность энергетики:
  - минимизация техногенного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду и здоровье граждан;
  - внедрение инновационных технологий добычи, переработки, транспортировки, реализации и потребления топливно-энергетических ресурсов, приводящих к сокращению вредных выбросов в



окружающую среду и техногенного влияния на климат.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в 2008 - 2009 годах был сделан огромный скачок в развитии правового регулирования сферы энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Однако, на современном этапе развития экономики и нормативного регулирования в данной сфере необходимы более детальная проработка различных сторон повышения эффективности использования источников энергии, в связи с чем, необходимо провести глубокий анализ существующего законодательства и доработать его с учетом изменяющейся ситуации в стране.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической

эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

2. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 года № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики».

3. План мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности в Российской Федерации, направленных на реализацию Федерального закона "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Утвержден распоряжением Председателя Правительства РФ 1 декабря 2009 года № 1830-р.

4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Председателя Правительства РФ от 13 ноября 2009 года № 1715-р.

5. Правовое регулирование развития энергосбережения и повышения энергетической эффективности. – М: Издание Государственной Думы, 2013. – 144с.

6. <https://www.eens.ru/clients/obchaya-informacia/energostonabzenie/gos-politika-po-energostonabzeniy>.

*А.С. Аджемов<sup>1</sup>, А.Б. Денисова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», Россия

## **ФИЛОСОФИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ**

### **АННОТАЦИЯ**

Процессы индустриального, экономического, общественно-политического и личностного развития взаимосвязаны и взаимозависимы. В настоящее время они приближаются к новым пределам и ограничениям, требующим соответствующего философского осмысления и поиска адекватных ответов в складывающихся условиях, что позволит избежать кризисных явлений и создаст условия для последующей гармонизации развития нашего общества.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Рассмотрение различных этапов существования цивилизации на Земле, складывающихся общественных, политических, социальных, межличностных и проч. отношений никогда столь очевидно не приводило к проблеме исчерпания используемых ресурсов, необходимых для дальнейшего развития, да и просто существования человечества. Причем, если в прошлом, в теоретическом плане возможность этого только предполагалась, то сегодняшнее настоящее требует реального практического решения. Это касается и экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды, и недостатка продовольствия, и перенаселенности отдельных регионов, и т.д. и т.п. При этом важнейшим фактором развития является энергетическое обеспечение процессов, имеющее устойчивую тенденцию к нарастанию. Однако это нарастание используемой энергии не реализуемо выше определенных границ, а потому само дальнейшее развитие общества возможно только при рациональном осмыслении энергетического потребления и изменений в мировоззрении современного человека на основе «философии энергосбережения».

### **2. ОСОБЕННОСТИ ОБЩЕСТВА ПОТРЕБЛЕНИЯ**

Термин «общество потребления» появляется в работах Эриха Фромма в начале XX века. Фромм анализирует общество, в котором потребление является главным видом взаимодействия индивидов. Сегодня для значительного числа стран – это одна из основных черт, сформировавшаяся под влиянием множества факторов: глобальное развитие товарно-денежных отношений, рост социальной мобильности, урбанизация, быстро расширяющееся потреб-

ление роскоши, создание системы масштабного потребительского кредитования и т. д. [1; 50]

Общество потребления определяется современными социологами как постиндустриальное общество, возникающее в результате развития капитализма в условиях значительного роста доходов заметной части населения при соответствующих уровнях технического, технологического и экономического развития [2]. Его формирование связано с трансформацией общественных ценностей: участие в потребительской деятельности придает жизни людей смысл. Конечно, разные слои населения имеют разные возможности доступа к потреблению тех или иных товаров и услуг, но потребительские ценности усваиваются и разделяются большинством, а не только теми, кто имеет возможность потреблять с переизбытком. Поэтому, происходит «культивирование и распространение вкусов, ассоциирующихся с удаленностью от труда, занятости», а также «копирование поведения тех, кто занимает более высокое положение на социальной лестнице» [3; 108]. Тем самым в обществе происходит расширение «демонстративного потребления» и стандартов высшего класса [4; 245].

Действительно, в условиях капитализма произведенный товар, услуги, на создание которых были потрачены определенные средства, должны быть обязательно проданы, дабы были возмещены расходы, получена прибыль и т.д. Для повышения прибыли производители должны много производить, а люди — много покупать (потреблять). Данный круговорот является движущим механизмом развития капиталистического общества, в котором, следует признать, имеются значимые достижения, и не случайно исследователями отмечаются положительные черты общества потребления, обеспечивающие его устойчивость и поддержку со стороны населения:

- производители видят ясную и понятную, а не абстрактную, хотя, возможно, и более возвышенную цель в постоянно расширяемом производстве и совершенствовании производимой продукции, позволяющие им обеспечить себе достаточно высокий в материальном отношении уровень жизни;

- потребители, стремясь к материальным благам, имеют стимул и мотивацию работать и зарабатывать больше денег;

- потребительские мотивы, преобладающие в повседневной жизни, замещают и сглаживают воз-

можные религиозные и национальные разногласия, снижают экстремистские настроения и радикальные идеи, способствуя тем самым определенной стабилизации общества, формированию значительной терпимости и толерантности;

- правительства имеют возможность решать сравнительно более простые задачи в условиях ясных целей общества потребления и социальной устойчивости;

- страны с более низким уровнем развития вовлекаются в общие процессы как поставщики сырья и новые рынки сбыта производимого товара, а также сравнительно дешевой рабочей силы.

Вместе с тем, несомненно, видны и отрицательные черты общества потребления, причем зачастую, согласно законам «отрицания отрицания» и «единства и борьбы противоположностей», вытекающие из положительных черт, указанных выше:

- человек становится зависимым от идеологии потребительства;

- размываются традиционные моральные устои общества, появляется новая и быстро расширяющаяся «псевдокультура», навязывающая обществу новые стандарты поведения, которые до этого казались немислимыми и, более того, порицаемыми и даже уголовно наказуемыми;

- исчезают стимулы повышения образовательного и культурного уровня общества, все заменяется массовыми идеологическими «субпродуктами»;

- все меньшее значение приобретают талант и индивидуальность, если они не совпадают с идеологией потребительства;

- «привыкнув» решать традиционные задачи общества потребления, правительства оказываются не в состоянии адекватно реагировать и находить решения в кризисных ситуациях, возникновение которых объективно неизбежно;

- страны, являющиеся поставщиками сырья и дешевой рабочей силы, получив доступ к новым технологиям, проходят определенный этап развития, в результате которого они становятся все более значимым участником общего рынка и в результате этого начинают выдвигать свои новые условия общего производства и дележа образующегося дохода, что ведет к образованию кризисной ситуации.

Жан Бодрийяр, размышляя над смыслом потребления в книге «Система вещей», написанной еще в 1968 году, когда облик общества потребления только начинал формироваться, заключает, что это не пассивное состояние поглощения и присвоения, это – основополагающий процесс социокультурной жизнедеятельности современного буржуазного общества [5; 164]. В другой работе он пишет: «расточительное потребление стало повседневной обязанностью, вынужденным и часто бессознательным установлением вроде косвенного налога, бесстрастным участием в правилах экономической системы» [6; 72]. Потребление, обладание вещью является знаком, символом («симулякр» [5; 21]), так как смыслом потребления является уже не удовлетворение физиологической, эстетической или какой-либо иной потребности, а стремление сообщить о

себе определенную информацию – потребление как символ успеха, престижа, символ счастья и т.п. Вся жизнь становится потреблением симулякров, и реальность превращается в симуляцию, манипуляцию этими символами, знаками. В этих рассуждениях Жан Бодрийяр продолжает К. Маркса и Э. Фромма: «Чем ничтожнее твое бытие, чем меньше ты проявляешь свою жизнь, тем больше твое имущество, тем больше твоя отчужденная жизнь...» [7; 68]; «Человек, подчиненный своим отчужденным потребностям, — это уже не человек ни в духовном, ни в телесном смысле... это всего лишь самодетельный и сознающий себя товар» [8; 401].

Следует отметить, что многие религиозные организации официально осуждают идеалы общества потребления, разрушающего душевное и физическое состояние человека. Так, Патриарх Московский и всея Руси Кирилл говорит: «...Если все общество встанет на путь такого безудержного потребления, то и земля наша, ресурсы ее этого не выдержат!...если средний уровень потребления будет такой, как в США, то основных ресурсов хватит всего на 40 – 50 лет... А, если все не могут жить так – что означают эти колоссальные имущественные диспропорции?» [9].

Несмотря на названные очевидные недостатки, при наличии большого, ставшего значимым, количества людей, имеющих возможности потребления товаров, продуктов и услуг согласно сформированным в данном обществе стандартам, характеризующим так называемый «средний класс», отрицательные черты, способные привести общество к определенному излому, а затем и быстрой деградации, остаются без должного внимания. Хотя, как показывают, например, исследования, проведенные сотрудниками системы банков JAK (Швеция), в Германии уже в 1993 году средняя «процентная» составляющая кредитов от общей стоимости товаров и услуг достигла 50% [10], что демонстрирует опасную тенденцию в развитии общества потребления, а именно, «жизнь в кредит»: отсутствие адекватной оценки перспектив и понимания объективно существующих ограничений и возможного безвозвратного исчерпания ресурсов.

Кардинально изменилась сама структура стоимости товаров и услуг. Из-за быстрых изменений в моде вещи устаревают и становятся ненужными быстрее, чем они физически изнашиваются. Короткие циклы сменяющихся трендов создают финансовые условия для расширения производства и, как следствие, получение дополнительной прибыли. Таким образом, с одной стороны, производимая продукция имеет «стилистический срок годности», не соответствующий ее физическим характеристикам. Этот искусственно существенно укороченный «срок годности» закладывается производителями с целью рентабельности будущего воспроизводства тех же товаров, но с измененными потребительскими свойствами, появление которых диктуется не насущной необходимостью, а новым модным стилем. С другой стороны, нацеленность исключительно на прибыль, приводит к приоритету количества

над качеством: технически вещь специально производится так, что срок ее работы ограничен непродолжительным периодом (стоит сравнить качество, например, автомобилей раньше и теперь). Получается производство ради производства, чего опасался М. Вебер [11; 395]. Человек же общества потребления вынуждается очень много работать, чтобы приобретать вещи за неадекватно высокую цену, относительно затраченного на них труда и материалов.

Забавна и поучительна иллюстрация вышеизложенного, взятая в сети Интернет (рис.1)

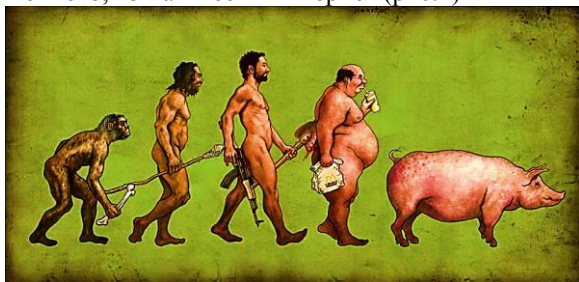


Рис. 1. Этапы развития человека

### 3. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В РАЗВИВАЮЩЕМСЯ ОБЩЕСТВЕ И ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ГРАНИЦЫ

Многие исследователи отмечают, что рост производства в обществе потребления происходит в основном за счет нарастающего использования невозобновляемых ресурсов и, в первую очередь, энергетических ресурсов. Попытки изменить это не приводят к желаемым быстрым успехам. Практика сегодняшнего дня доказала это, когда разрекламированная программа европейских стран по переходу к новым «зеленым» источникам энергии оказалась несостоятельной, что, впрочем, не означает, что не следует искать новые возобновляемые источники энергетического обеспечения.

Одним из мощных двигателей развития современного общества стали достижения в области микроэлектроники, информационных технологий и телекоммуникаций, позволившие со сравнительно малыми энергетическими затратами сформировать цифровое информационное общество, в котором основу капитализации многих традиционных производственных процессов составляют информационные продукты и технологии. Сегодня никого не удивляет, когда ваш мобильный телефон, смартфон, в течении нескольких минут проходит глубокую модернизацию, на что в прошлом при аппаратной реализации данного устройства ушли бы месяцы и даже годы, необходимые для организации нового производства и продажи новых изделий. При этом происходит и существенная экономия энергетических затрат на производство товаров и услуг с новыми качественными характеристиками.

Весьма показателен рис.2 [12; 29], на котором показаны успехи миниатюризации и связанной с этим стоимости изделий, широко используемых в современных информационных системах.

### Цена 1-го Мегабита памяти

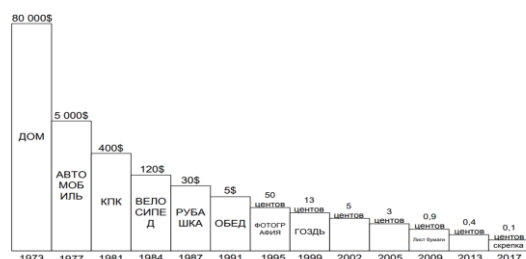


Рис.2. Стоимость элементов памяти информационных систем

Помимо стоимости резко снижалось и энергопотребление информационных и радиотехнических систем, а также систем связи. Тем не менее современный человек потребляет все больше энергии, существенно превышая то, что ему было необходимо буквально 10 лет тому назад, не говоря о более дальнем временном расстоянии.

Самые простые, повседневно используемые электроприборы уже достаточно энергозатратны:

Таблица 1. Мощность, потребляемая бытовыми приборами

Прибор	Мощность, Вт	Прибор	Мощность, Вт
Кондиционер	1000-5000	Чайник	1000-2000
Стиральная машина	2000-3500	Посудомоечная машина	1800
Фен	500-2000	Компьютер	400-750
Утюг	500-2000	Телевизор	100-400
Обогреватель	1000-1500	Холодильник	150-600
Тостер	500-1500	СВЧ-печь	1500-2000
Духовка	2300-2500	Вентилятор	750-1700

Информационные технологии, объединенные телекоммуникациями, находят применение во всех сферах современного общества: в производстве, в управлении, в экономике, наконец, и в личной жизни. Человек, случайно забывший свой мобильный телефон дома, чувствует себя потерянным, «выключенным» из современной жизни. Сеть Интернет, стала чем-то глобальным, без чего невозможно обойтись. Причем наряду с несомненными положительными чертами здесь сосредоточены и значительные угрозы. Информация, расположенная в этой сети и возможности ее распространения становятся мощнейшим влияющим фактором. Не случайно столь актуальными становятся вопросы информационной безопасности, информационного суверенитета и т.д.

Широчайшее распространение сети Интернет, появление технологий Интернета вещей (Internet of Things (IoT)), блокчейна (Blockchain), телемедицины, умного города и т.д. и т.д. показали, что заложенные ранее технические возможности сети по численности конечных пользователей недостаточны. Действительно, теперь не только люди, но и различные устройства, датчики, бытовые приборы, компьютеры становятся полноправными абонентами сети Интернет. И эти технологии становятся все более масштабными, расширяя бизнес в сфере инфокоммуникаций. Так, например, исследования, проведенные Fortune Business Insights, предсказы-

вают, что с 2018 г. по 2026 г. объем мирового рынка Интернета вещей вырастет со 160 млрд. долларов до более, чем 1,1 трлн. долларов. Исходя из этого, был разработан и принят новый протокол IPv6, который существенно расширил возможности сети Интернет. Согласно этому протоколу адресно пространство расширено до  $2^{128} \approx 340 \times 10^{36}$ , т.е. 340 ундециллионов. Если вспомнить, что площадь поверхности Земли составляет 510 100 000 кв. км, из которых суша занимает 148 940 000 кв.км, то несложно определить, что всего на 1 кв.мм суши будет приходиться  $2,3 \times 10^{18}$  возможных абонентских адресов или, другими словами, миллиард миллиардов!

Если исходить из того, что на сегодня в различных странах проживает 7,8 миллиардов человек, то каждому «можно предложить» использовать  $4,4 \times 10^{28}$  различных адресов. Со школы известно, что масса Солнца равна  $1,99 \times 10^{30}$  кг, что соответствует энергии  $E = M \times C^2 = 1,79 \times 10^{47}$  Дж. Если сопоставить это с энергетическими затратами, вытекающими из возможного числа пользователей сети Интернет согласно новому протоколу IPv6, то станет понятно, сколь велика может оказаться энергетическая потребность.

Данное обстоятельство очерчивает реальные возможности человечества в его развитии и доказывает насущную необходимость в экономии энергетических затрат, чему должна стать опорой новая философия энергосбережения.

Мировое энергетическое обеспечение складывается в основном из следующих источников (рис.3):



Рис.3 Источники энергетического обеспечения (2020 год) (по данным сайта Enerdata [13])

В различной литературе, в публикациях, имеющих в сети Интернет, можно встретить много прогнозов развития энергетических рынков и нарастания энергозатрат. Хотя в них имеются определенные количественные отличия, однако, в целом очевидно, что потребление угля, как источника топлива неуклонно сокращается, а газ остается наиболее массовым и востребованным источником. Увеличивается также доля возобновляемых источников энергии, хотя об их надежности и устойчивости функционирования, по-видимому, следует особо озаботиться, имея в виду их зависимость от складывающихся погодных условий.

Россия, являясь одним из крупных поставщиков энергетических ресурсов, в тоже время уступает

первые места по их потреблению Китаю, США, Индии (рис.4) [по данным 14].

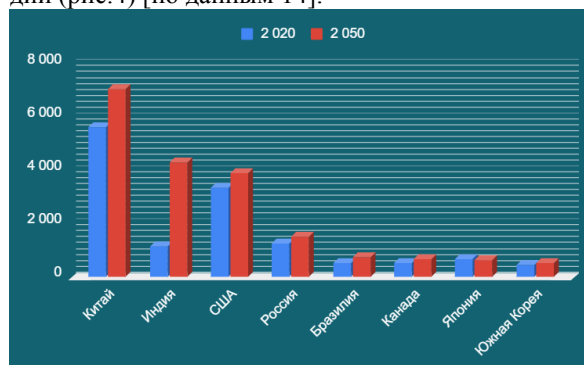


Рис. 4. Прогноз энергопотребления в разных странах (млн. тунт)

Если диаграммы, показанные на рис.4, пересчитать с учетом численности населения стран и перспективы их развития, предполагая выравнивание уровней жизни, а, следовательно, и уровня потребления энергии, то станет еще более понятным насущная необходимость внедрения «философии энергосбережения» и отказ от тупикового пути развития согласно идеологии общества потребления.

Данная проблема является нетривиальной, поскольку она не сводится только к лозунгу экономии всего и во всем. Ее не следует упрощать, уподобляясь Степану Плюшкину - известному герою Н.В. Гоголя. Необходим многовекторный подход, касающийся и политики государства по разумному стимулированию энергосбережения, и перенастройки производства, и законодательного регулирования, и, наконец, формирование адекватной реакции человека, его мировоззрения. Следует также учитывать, что данная философия, несомненно, столкнется с мощнейшим противостоянием со стороны сторонников общества потребления, число которых, как указывалось выше, огромно. Достаточно представить себе представителей «среднего» класса развитых капиталистических стран, которым придется принять объективно складывающиеся условия ограничения потребления. Необходимо также сформировать новые стимулы в развитии производства новых товаров и услуг, которые действительно станут новыми и необходимыми в плане получения ранее не существовавшего качества с целью развития, а не извлечения дополнительной прибыли «любым путем». Существенные изменения должны произойти и в экономике, и в управлении. Философия энергосбережения должна стать одним из ключевых факторов, по которым следует оценивать новые предлагаемые технологические решения, товары и услуги.

Как следует из рис.5 [15; 96], каждый глобальный кризис вызывает снижение потребления энергии и уход с траектории экспоненциального роста, что можно прогнозировать и в настоящее время.

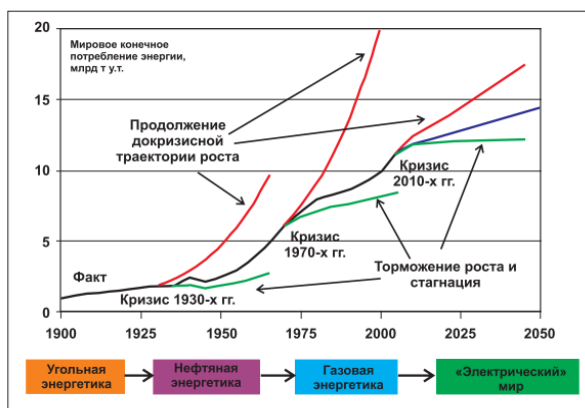


Рис. 5. Кризисы и энергопотребление

Период кризисов, как известно, является временем, когда в обществе должны произойти соответствующие изменения, без которых выход из кризиса сильно затягивается и, в конечном итоге, может стать невозможен. При этом общество либо выходит обновленным, либо разрушается и на его основе формируется новая конструкция.

В этой связи предлагается имеющиеся оценки возможного истощения энергетических ресурсов, в том числе приведенные в данной работе, использовать в основах формирования философии энергосбережения, как составляющей части мировоззрения современного человека.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общественное осмысление философии энергосбережения становится важным фактором формирования общества настоящего и ближайшего будущего с пониманием условий его существования и необходимости обеспечения социальной стабильности и развития.

Возросшая численность населения, современная индустриальная насыщенность, расширение сферы различных услуг и сервисов требуют все больших энергетических затрат, размер которых приближается к теоретически достижимой границы, за пределами которой дальнейшее развитие невозможно.

Важнейшим становится лозунг: «От насущной необходимости к разумной и обоснованной вариативной достаточности».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sassatelli R.** Consumer Culture: History, Theory and Politics. SAGE Publications, 2007.
2. **Ильин В. И.** Общество потребления как форма капиталистического развития // Материалы III Всероссийского социологического конгресса. М.: Институт социологии РАН, Российское общество социологов, 2008.
3. **Мирошина Е.Ю.** Общество потребления: критика и пути преобразования // Известия ТулГУ. Гуманитарные науки. 2017. №2. - С.105-112. – С.108.
4. **Веблен Т.** Теория праздного класса. М.: Прогресс, 1984. 367 с.
5. **Бодрийяр Ж.** Система вещей. - М.: Рудомино, 2001. - 231 с.
6. **Бодрийяр Ж.** Общество потребления. Его мифы и структуры / Пер. с фр., послесл. и примеч. Е. А. Самарской. М.: Республика; Культурная революция, 2006. 269 с.
7. **Маркс К.** Экономическо-философские рукописи 1844 года // Маркс К., Энгельс Ф. Соч. : в 50 т. 2-е изд. М., 1974. Т. 42. С. 41–174.
8. **Фромм Э.** Концепция человека у К. Маркса // Душа человека. М.: «Республика», 1992, С. 375-414.
9. **Патриарх Кирилл.** Я приехал как паломник // «Аргументы и факты в Украине» № 32 (677) (05.08.2009).
10. **Яшин Н.** Процентное кредитование - мировая война? // Арктогея. Философский портал. URL: <http://arcto.ru/article/790> (дата обращения: 15.06.2022).
11. **Давыдов Ю.Н.** Веберовская теория капитализма – ключ к универсальной исторической социологии // История теоретической социологии. В 4-х т. Т. 2. М.: Канон+, 2002. С. 376–408.
12. **Berner Georg;** Management in 20XX, Siemens, 2004. 224 p.
13. **Мировая статистика по потреблению энергии // Enerdata** URL: <https://yearbook.enerdata.ru/total-energy/world-consumption-statistics.html> (дата обращения 15.06.2022).
14. **EES EAEC.** Мировая энергетика. URL: <https://www.eeseaec.org/potreblenie-elektroenergii-v-regionah-i-stranah-mira> (дата обращения 15.06.2022)
15. **Кризис 2010-х годов и Новая энергетическая цивилизация /** Под ред. В.В. Бушуева, М.Н. Муханова. М.: ИД «Энергия», 2013. 272 с.



D.L. Tomasi<sup>1</sup>,<sup>1</sup>University of Vermont,  
Burlington, VT, USA

**BETWEEN EMPIRICAL EVIDENCE AND THEORETICAL  
FRAMEWORKS: THE CONCEPT OF FREE WILL AT THE  
INTERSECTION OF PHILOSOPHICAL UNDERSTANDING,  
PSYCHOLOGICAL ANALYSIS, AND NEURAL CORRELATES**

**ABSTRACT**

Understanding the role of (human) Free Will is a necessary premise and substantial process for the appropriate application of any healing art, starting with psychotherapeutic approached focused on the amelioration and improvement of emotional, cognitive, and behavioral elements in the suffering person, and more generally in the path toward healing and truth every person embarks on. This article examines the three interconnected areas of philosophy, psychology, and neuroscience to explore what the existence and activation of Free Will represents in the life of human beings, from its clinical-medical-therapeutic outcomes to its implications to identity, community, and society.

**1. INTRODUCTION**

At the beginning of any serious inquiry into the ontological nature of a human being, one must face the *selective problem* of deciding which areas of investigations -and related methods- to incorporate in such analysis, and which areas one ought to reject. Our decision is to utilize philosophy, psychology, and neuroscience to investigate the concept of free will, with a specific focus on its relevance and application toward healing processes. More specifically, the intent of this investigation is to provide evidence for the ontological connections between the conclusions reached by philosophy, psychology, and neuroscience and the benefits of a psychotherapeutic approach (of note, in this context, we utilize the term “psychological analysis” *not* in Freudian or Jungian terms) based on the above. This is possible only when precise evidence is provided to defend the universal truth of free will, first to make such therapeutic work possible in the first place, then to avoid forcing, pushing, or even suggesting the beneficial effects of such approach, despite of the non-existence of free will in the subjects studied and with whom we interacted. An important factor in this analysis is the full recognition that a separation between philosophy, psychology, and neuroscience is only useful in terms of taxological considerations, especially when we are utilizing the distinct (and distinctive) methods each field contains. In both practical and theoretical terms however, we will see how any of these fields could not truly present any truth (both factual and usable, even from a utilitarian perspective) if they are not aware of each other’s constructs, methods and study design (when applicable), scope of investigation, and ultimately *way of interpreting conclusions*.

**2. FREE FROM WHAT?****2.1. An overall philosophical discussion**

The assumption of the existence of free will in humans has been discussed throughout the history of philosophy, and the problem of free will should rightfully be regarded as one of the most important problems in any scientific field. The purpose of this paper is not to list all the different viewpoint in this area, but to utilize specific philosophical perspectives to illustrate what direction we ought to take to shed light of truth to this issue. An important consideration is to think how, in everyday circumstances, most societal norms and behavior do indeed work on the presupposition that free will exist. In fact, one could argue that the primary presupposition of most modern governmental institutions – and all democracies– consider human beings as capable of decision-making processes. The best example in this context is the very essence of electoral voting. Of course, this does not necessarily mean that these decisions are well-informed (in fact, propaganda and brain-washing aside, they are often not informed at all), but simply that there is an understanding of a certain liberty to make the decision in the first place. So, can we argue that even though we might be able to demonstrate the existence if free will, we all live *as if* it did exist? An important segue to this question is the full realization that this *intent*, this tension, has a fundamental role in the psychotherapeutic practice. In fact, believing that a person possesses free will (or, in non-paradoxical terms, is possessed by free will) is a necessary-yet-not-sufficient element for any type of psychotherapy to be effective. Furthermore, this “believing that” is also “believing by” both the person receiving therapy and the one offering it. In other words, this process occurs both internally, i.e., within the person experiencing it, as well as dialectically, between the two parties. This “believing” could certainly *be believed* by some -albeit this could only happen if their analysis remains superficial- to be nothing more than “make believe,” in the sense that it could represent a form of self-delusion, even if motivated by ethical goals such as the (temporary? Momentaneous?) emotional improvement of the patient. Even a form of folk etymology (thus, not true) interpretation of “be-li(e)ve,” could provide an indication that we are talking both about existential and essential elements, about ontological and phenomenological factors, about cognitive and behavioral observations. Now, this interpretation is wrong not only from the per-



spective of science and history, but also because it juxtaposes being and living *without any glue or reason*. The true origin of the noun and verb instead is even clearer and significant description of the process we're describing, since it is directly connected with terms such as care, love, desire, trust, and esteem. Thus, believing one has free will means much more than either pretending that one does, or that one can simply behave as if. In this sense, the *act* of believing can be truly interpreted under a metaphysical, we would even say transcendental or mystical, lens.

## 2.2. A useful perspective

Starting with a Thomistic approach, we could surpass distinctions and diatribes between compatibilism and determinism [1] -even *molinism*, one could argue- (which does not mean that we will venture into this logical examination or demonstration in this paper), and observe free will in the psychotherapeutic process in a similar way the act of self-reflection, *examen*, or prayer (albeit not mindfulness, in the sense utilized in certain Western areas) works in the individual practicing, experiencing, and living it. To summarize a few important aspects, St. Thomas Aquinas wrote that: 1) God causes necessary things to happen necessarily, and 2) We understand things as ends, and pursue ends as ends. This second point is especially relevant given the claim that some deterministic/biologicistic form of psychological behaviorism according to which human beings are pretty much identical to other animals (mammals in particular, and primates almost in entirety) in all areas of psychological-neuroscientific investigation, and they differ only in terms of gradient, not essence or structure. This means that whether we are talking about cognitive processes (but the same can be said about perception, emotion, memory, etc.) human being are simply on a higher (computational) level in certain areas but perform with a lower degree of ability or accuracy in others (we could think of olfaction as an example). In the Thomistic interpretation, points 1) and 2) also indicate that human beings are not the same as animals in any of the areas discussed above; they are, in other words "special" and "free." Of course, in this interpretation (which, is not just Thomistic or Christian, but also Aristotelian in some sense, even ancient Roman, for instance in the conceptualization of the *Virtus*), when we think about Free Will, we think about Freedom as a power for the good, not freedom for freedom itself. Free Will is therefore connected to *Grace* (which is intrinsically related to the practice and process of healing, at the center of psychotherapy). Thus, following Thomas, God gives *grace sufficient to pray*, i.e., in order to reach the (higher) *good* that its awaiting. This *good* is the full manifestation (some could see even an *epiphanic* moment in this sense, even a movement toward *Theosis* in the Orthodox sense) of true Free Will, where our full freedom coincides -thus it is the same but also presents itself and creates Truth inwardly and outwardly- with the Divine Will, again in the manifestation of the Logos. It follows that the recognition of Free Will in psychotherapy allows for psychotherapy to be properly received by the person who is/becomes able to under-

stand and put-in-motion the teachings received, and therefore to embark on the healing path.

## 3. MIND MATTERS

### 3.1. Neuroscientific considerations and Psychological interpretations

As we stated elsewhere [2] a central approach to the possibility of existence, or lack thereof, of free will comes from fields which attempt to link evidence-based observational, empirical, and biological aspects of human function and structure to the way human beings interact in and with the world. As examined, the claims of differentiation from biological observation and considerations around (inner) existence and essence of free will has to face possible mechanistic explanations. These explanations are ontologically speaking understood as neural underpinnings of perception, behavior, cognition, memory, and truly anything else which modern culture has associated with human features, (self) identity and identification. Thinking about scientific investigations such as the Libet experiment [3], we can quickly recognize how the current scientific paradigm pushes beyond the boundaries of "neural underpinnings" to a full recognition of neural processes as intrinsically explanatory of all the above. As it is well known, Benjamin Libet investigated the connection, whether causal or not, between the conscious experience of volition and the *Bereitschaftspotential*, following Kornhuber and Deecke (1964). Living mistaken interpretations aside (Dennet and Churchland's in particular), experiments like this are connected to the concept of recollection, thus involving an objective vs. subjective perception of the passing of time, in which a) *decision of taking* action precedes the action itself, and b) recollecting something is meaningful (true) only if this something happened/existed before the act of recollection [4]. Furthermore, a recollective approach which is solidly aligned with current neuroscientific evidence - which does not imply that it must be based on it, but that it is compatible and proof-providing to satisfy the appetite of a materialist-reductionist- indicates similar consideration for the veto power of the "Free Won't" problem (Klemm, 2010) in [5], as in the research by the Berlin group led by Haynes (2016), in [2] indicating that in a "speed-activation" competition between human subjects and a Brain Computer Interface, the "point of no return" for the ability of humans to veto an action was at 200 milliseconds before the movement. As previously stated, (*ibid.*), among the most important aspects of Klemm's analysis we should evidence that both concepts of decision and conscious realization need to be reassessed in the context of evidence-based experimentation, more specifically understanding that the processes underlying decision-making are multiple and therefore:

- a) Cannot be reduced to a single mental process to be analyzed, and
- b) Cannot be used as a basis (i.e., as experimental justification) for "all mental life".

While in this analysis, we will not discuss in depth the specific connection between neuroanatomical func-

tions, processes, and functions, it is fundamental to review how specific locations and processes which occur (and are thus easily observed with neuroimaging) in the human brain -especially in areas such as the Nucleus Accumbens, the Ventral Pallidum, the Anterior Cingulate Cortex, the Prefrontal Cortex and its relations, in terms of dialogue, between cognition and emotion with the Limbic system, or the role of the Hippocampus and the olfactory bulb play in memory- are strongly linked to the integration of proper (in the sense of truly *free*, aligned with the good) responses vs. maladaptive behaviors and misguided emotional and cognitive interpretations. More specifically, the research clearly indicates [6, 7] that on a neurological level, the activation and perception of Free Will and related emotional-cognitive-behavioral responses follow a bottom-up / top-down regulation. As illustrated in Fig1., the corticocortical signaling happens via the Anterior Cingulate Cortex (Response conflict) and the Posterior Cingulate Cortex (Perceptual conflict), the corticosubcortical signaling via the Cerebellum (Temporal Violation) and the Basal Ganglia (Frequency violation, and the Prefrontal Cortex implements control through *selection and judgment*, i.e., biasing relevant signals. If Free Will is therefore connected to both transcendental aspects as well as pure biology as evidenced above, can we argue that there are levels of Free Will which can promote or hinder therapy, well-being or even happiness? In the interpretation by Kornhuber and Deecke (2012) there are ways human beings can “increase” the level of freedom through Tan “improvement of the self,” as opposed to self-mismanagement (and, we would argue, even opposed to certain forms of superficial, materialistic forms of *self-improvement* within certain types of so-called “Health and Wellness Coaching”), which would lead to an incremental loss of degrees of such freedom. As discussed, this interpretation is solidly based on neuroscientific evidence and it is fully consistent with those religious perspectives according to which the concepts of “sin” and “repentance” involve an external source of judgment and activation [8], because we, as human beings, -part and in- this world cannot have “full” free will, as this would entail a complete freedom *from* nature, which we are part of.

Following this interpretation, we hereby mention the very interesting series of studies by Sartori and Defanti (2012), In [2] and the substantiated claim that our belief in the existence of free will has the power to impact the readiness potential positively (with a decrease in time) or negatively (with an increase in time), by virtue of our judgment of this “positivity” or “negativity,” with string neural connections to cognitively-driven vs. emotionally-driven activation / response (Fig. 2). This is an essential component of understanding how free will, and our realization of its existence within ourselves, positively impacts the therapeutic process: The more we believe that free will exists, the more our readiness potential will increase in speed, thereby allowing us to have more direct control over our decision-making processes, and thus our actions.

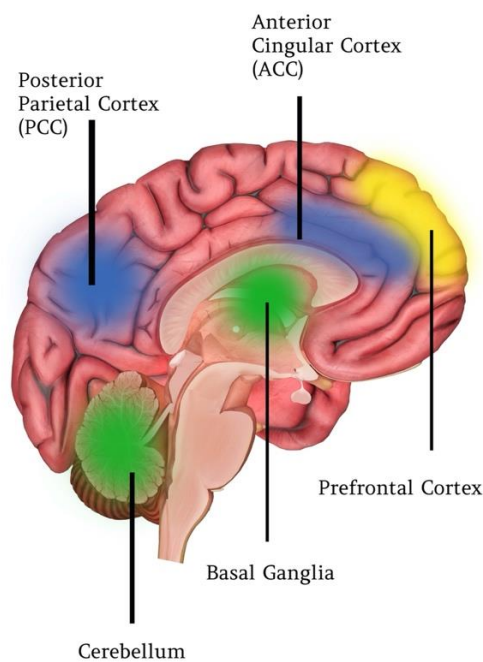


Fig. 1. Corticocortical signaling, Corticosubcortical signaling, and implementing control areas in the neural bottom-up / top-down regulation system.

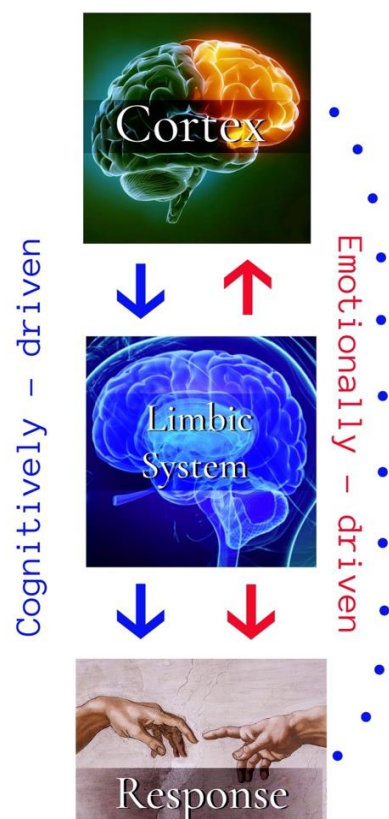


Fig. 2. Relationship between Cortex and Limbic System in the context of cognitively - driven vs. emotionally - driven responses.

### 3.2. Perception(s) and limitation(s) of self

Neuroscience also informs our current understanding (that is, it shows empirically) of Thomistic perspec-

tives regarding perceptual modalities in human beings, including our 5 senses and the *sensus divinitatis* and, more importantly for the purpose of this area of analysis, the *sensus communis*. The theoretically understood and empirically demonstrated interactions between “subjective free will” and “common-communal free will” have thus a further impact in relation to action and being at the community level. This in turn represents the translational shift from patient-provider to subject-community interactions.

From these considerations, the natural follow-up is that our Free Will-informed decisions will ultimately impact society (this time as a distinct notion and group, from community) in multiple ways, some of which would be considered fully “free” or “good,” while some others will be its opposite. A great example in this context is represented by the misplaced faith – a true superstition in the current usage of the term – in a free will toward extremist self-determination and/or self-identification (ideation?). As we have seen, Free Will is consistent with the “ultimate good” in the sense that it is contained by it, or it is a manifestation of it. Again, it is “a power for the good, not freedom for freedom itself.” In other words, human beings are certainly free to proclaim any type of self-determination and/or self-identification, at least in ontological terms, which does not apply to historicity or the context, as they could be held captive by external coercion, as in a potential repression of freedom of expression by certain institutions, governments, cultures, etc. However, just because human beings are free to claim anything they want (or at least they think they want) about themselves, society, or anything else, this does not make their claims true in any way. Let us remember the beginning of this analysis – the matter at hand was the connection between Freedom and Good, where “freedom” was to be interpreted under the lens of an ability/capacity/potential for free cognition-emotion-action, and “good” indicated the ultimate, higher goal of inner and outer healing, wellbeing, and meaning, purpose, and peace for the person experiencing it, realizing it, or, in psychotherapeutic terms, *shown*.

Therefore, no psychotherapist (in fact, no other professional, although psychotherapists should be held accountable in a particularly high standard given the above) should “lie” to his/her patient, despite the fact that the patient might disagree with this. A great example of this would be the clinical situation where certain patients, claiming Free Will, should be allowed to harm themselves regardless of the ideas or opinion of their therapists or society-at-large. Of course, even outside of neuroscientific observation, one could disagree on what constitutes (self) harm, but it remains evident that the ultimate duty of the provider is to help patients getting closer to truth, which ultimately will set them free (or, better said, will allow them to reach their freedom *again*). Of course, the necessary condition for this, is the recognition of the intrinsic value of human life (a concept and position which, while not intrinsically demonstrable through science, can be vastly corroborated by the observation of biological functions), without which:

a) Any therapeutic intervention would be pointless, given the absence of basic biological existence (as in the case of a patient committing suicide), and

b) There would be an a priori rejection of the skills, training, scope of practice, clinical/medical goals, and even basic human understanding (again, no need to venture into metaphysical domains, since this is easily verified by observing the work of neural processes and areas such as mirror neurons, see [9]) a psychotherapist has, since this professional should be trained to see the good, beauty, and potential of the person he/she works with, despite or against the fact that the patient is not able to recognize them (yet) within himself/herself.

This could be simplified by other, unfortunately common, examples, such as a patient who perceived himself/herself as “fat” despite of being critically and dangerously underweight. We could certainly disagree on the semantic decisions around which term we utilize, clinically speaking to describe such situation (for instance, what criteria, parameters, and traits will decide what eating disorder label to use), but we should not agree with the self-identification of the patient as “fat.” This identification is both (read: Unequivocally “at the same time”) false and dangerous, untrue and evil. Of course, any health professional (psychotherapists, psychologists, psychiatrists, counselors, etc.) should approach these problems with an open mind and a nurturing, loving heart. This however does not and should never mean that the professional should suspend judgement. Doing so could give the false appearance of an open-minded, tolerant approach, but the truth is that it will contribute, even magnify the issue. There are numerous other examples of the misplaced understanding and application of Free Will in clinical and social settings. For instance, a person could identify herself as “depressed.” This label could be beneficial, as it could represent a healthy understanding of a crisis (regardless, at this stage, if viewed as neurological, psychological, or situational) in need of professional help. Of course, any label come with “extra burden” to the person giving it and the person receiving it. The person might self-actualize depression in every aspect of her life, thus making herself more depressed. A person could also identify herself as a (or with a) title, a fictional character, a mission, a gift, etc. For instance, a person could identify herself as a “Doctor.” In early stages of development this is also healthy, as children use the power of imagination to envision a future which has not yet come, and is yet within reach if, as they say, “they put their mind into it” or, in more realistic terms, if the person has enough passion, consistency, healthy priorities, a balanced delayed gratification, and work/study ethic to achieve the goal. As adults however, we all (should) understand that we can and should still nurture our imagination to create our future, but the demands of reality and truth will not allow us to claim that we are doctors if we did not achieve that academic level or degree. If a therapist will reply to a person who claimed to be a doctor without having any if that, the therapist will be right and ultimately promote health in the patient, despite of the fact that the patient might feel a sense of uneasiness, offense, or even threat in front of the provider. Of course, a criticism coming from a certain kind

of philosophy (we would argue, Western, especially US, neo-post-modernist) and psychology (albeit mixed with pseudosociological elements mixed with self-entitled social justice warrior activism and virtue signaling elements) could claim that there is no agreement on what the very definition of “Doctor” should (in prescriptive and descriptive terms) entail. However, as we demonstrated elsewhere [10] -as if there was a need- the definition is solid and universally recognized, whether we recognize the term in its historical significance (“Doctor of the Church”), true academic meaning (“Person holding a Doctoral Degree”) or, especially in the US, the extended description -which is certainly culturally constructed- of a person, without an academic doctoral degree but who is at least qualified as *physician*. In all these cases, it is not up to the person to decide whether she is a Doctor, as this title, label, and status is conferred upon her *by others*.

Of course, in all these examples the truth remains the same. There can be disagreement and confusion. In the first case an element does not “fit/please” (etymologically we see again the connection with the “higher” good) with another. In the second case, two elements are “fused” together, which does not benefit either, as this fusion is not the result of an act of truth or love (a god example, if too common sense, could be a sacred union of opposites, for instance). However, this disagreement/confusion does not remain in the domain of philosophical speculation, societal prescription, or political correctness. It is fully found in neuroscience by examining the connection, interaction, interruption, and conflict between the areas mentioned above. Certainly, human beings are fallible beings and can therefore make substantial and continuous mistakes (even psychotherapists). But the recipe for amelioration and improvement, is not a suspension of judgement and (clinical/medical) interpretation, it is a *refinement* of such judgement and interpretation, which is, as we have seen, also connected with the role of the Prefrontal Cortex in the bottom-up / top-down regulation processes.

#### 4. CONCLUSION

Describing the intersection of philosophical understanding, psychological analysis, and neural correlates is a useful way to analyze the existence and role of Free Will in human existence in general, and more specifically to provide a solid explanation of how the recognition of Free Will is an intrinsic, sine-qua-non component of psychotherapy. In fact, a possible criticism of this approach could stem from the fact that the distinction between philosophy, psychology, and neuroscience could be viewed as an unnecessarily artificial one, since they all come -when properly and logically applied- to the same conclusion. In our opinion, recognizing the existence and the importance of (human) Free Will through three separate lenses could be more beneficial for the overall conclusion, given that enough importance, in terms of precise analysis, has been given to multiple perspectives. Of course, despite of the existence of logical arguments and proofs, some could argue that claiming that Free Will is a fundamental aspect for a fulfilled and healthy life (a basic goal of any clinical-medical-therapeutic intervention) is ultimately the result (or premise?) of personal opinion. In

response to this claim we would keep reminding the person making this claim, that *correct opinions on Free Will* find their proof in all the areas discussed above (thus avoid any type of circular reasoning and logical fallacies), since the proof required exists independently of the person making the claim for the role Free Will has as we previously illustrated, this proof existing simultaneously outside the person (thus being connected to the real of empirically observable, evidence-based, logical, rational, natural sciences) and inside the person, again both in a strictly biological sense as well on the area of theoretical frameworks, as illustrated by the very term *opinàre*, thus literally touching, reaching, and creating, more specifically [2]:

a) Touching with the eye, reaching with the eye, creating with the eye (based on the Sansc. Root \*op as in the Gr. ὄψις, thus [ap]perception, grasping, seeing), and/or

b) Touching with the mind, reaching with the mind, creating with the mind (based on the Sansc. Root \*ap as found in Opus / Opera)

In conclusion, all human beings make mistakes in judgement, as all their perception/sensory/ cognitive (etc.) understanding can be fallible. However, with proper training and recognition (in the best case scenario and in our specific area of debate, combining *at least* philosophy, psychology, and neuroscience) we can all re-learn (or, better said, re-discover, remember) how to see and recognize the truth and the freedom we have been graced (gifted) with.

#### REFERENCES

1. **Van Inwagen, P.** Thinking about Free Will. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2017.
2. **Tomasi, D.** Critical Neuroscience and Philosophy. A Scientific Re-examination of the Mind-body Problem. Basingstoke, UK: Palgrave Macmillan, 2020a
3. **Libet, B.** Do we have a free will? Journal of Consciousness Studies, 1999, 5, 49.
4. **Tomasi, D.** Anterior Cingulate Cortex (ACC) and  $\mu$ -opioid receptors (MOR): a dialogue between free will, responsibility, and mental health. Williston, VT: NAMI - National Alliance on Mental Illness, 2020b.
5. **Todorov, I., Kornell, N., Larsson Sundqvist, M., Jönsson, F.U.** Phrasing Questions in Terms of Current (Not Future) Knowledge Increases Preferences for Cue-Only Judgments of Learning. Archives of Scientific Psychology, Washington, DC: APA, American Psychological Association, 2014, pp. 7 - 13.
6. **Sammut, S.** The Neurobiopsychosocial Basis of Crowd Behavior. Ohio, US: Franciscan University of Steubenville, 2022.
7. **Kornhuber, H. H.** and Deecke, L. The Will and Its Brain: An Appraisal of Reasoned Free Will. Lanham, MD: University Press of America, 2012.
8. **Drewerman, E.** ... und es geschah so. Die moderne Biologie und die Frage nach Gott. D: Patmos, 1999.
9. **Rizzolatti G., Sinigaglia C.** The functional role of the parietofrontal mirror circuit: interpretations and misinterpretations. Nature reviews neuroscience, 2010. 11(4) 264 - 274.
10. **Tomasi, D.** Medical Philosophy. Philosophical Analysis of Patient Self-Perception in Diagnostics and Therapy. New York, NY: Ibidem Verlag / Columbia University Press, 2016.

# СОДЕРЖАНИЕ

## Секция 1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*Д.Д. Голдобин, М.А. Савелков, С.Н. Петин*

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА ПАРОВОЙ КОНВЕРСИЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТКОВ ТЕПЛА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ..... 8

*А.М. Латыпов, Н.Б. Садартынов, Н.А. Татарникова, А.В. Стерхов*

О РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ НА ТЭС, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРЯМОТОЧНУЮ СИСТЕМУ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ..... 15

*В.Ю. Наумов, С.К. Осипов, О.В. Злышко, В.О. Киндра*

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ В УГЛЕКИСЛОТНЫХ ЦИКЛАХ БРАЙТОНА И РЕНКИНА..... 19

*Н.А. Татарникова, Р.Н. Такташев, А.Б. Ондар, М.Ю. Горин, И.И. Хрушков*

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ТЭС С БАШЕННЫМИ ИСПАРИТЕЛЬНЫМИ ГРАДИРНЯМИ..... 26

## Секция 2. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭНЕРГИИ

*А.С. Демиденко, Г.В. Шведов*

ЗИМНИЕ И ЛЕТНИЕ ГРАФИКИ НАГРУЗКИ РАБОЧИХ И ВЫХОДНЫХ ДНЕЙ МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ..... 32

*Йе Хтут Мьят, Г.В. Шведов*

ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА РАЗЛИЧНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ СОЮЗ МЬЯНМЫ..... 37

*В.А. Холмичев, Г.В. Шведов*

СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТДЕЛЬНОЙ КВАРТИРЫ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МЕГАПОЛИСОВ..... 42

*О.А. Чехранова, Е.Г. Гаши, В. Иванко*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ..... 49

*В.Ю. Чайкин, А.Р. Шайхеева, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, А.В. Скоробатюк, А.Н. Нечаев*

ТЕПЛОВАЯ ИЗОЛЯЦИЯ КОММУНИКАЦИЙ ПОДЗЕМНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ..... 52

*А.Р. Шайхеева, В.Ю. Чайкин, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, А.Н. Нечаев, А.В. Скоробатюк*

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СЕЗОННОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА ..... 57

*Н.А. Белехова, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, Б. Бу Дакка, А.И. Бартенев*

СИСТЕМА ПРОИЗВОДСТВА, ХРАНЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА ДЛЯ СЕЗОННОГО АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОМ ДОМЕ..... 63

*В.А. Поженъко, И.Д. Калякин, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, Х. Келлер, Т.В. Яцюк*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ДОМА В ГЕРМАНИИ НА ОСНОВЕ BIM И VEM МОДЕЛИРОВАНИЯ..... 70

*Е.Г. Гаши, А.И. Киселева, А.М. Фокин*

МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СИСТЕМАХ ПАРΟΣНАБЖЕНИЯ В НЕПРОЕКТНЫХ РЕЖИМАХ..... 74

*Т.А. Матухнов, О.Д. Матухнова, М.Ю. Юркина*

АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НАКИПИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ..... 78

*Б. Бу Дакка, И.А. Султангузин, Ю.В. Яворовский, А.И. Бартнев, Н.А. Белехова*  
КАМЕРА СГОРАНИЯ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА..... 81

### **Секция 3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПОТРЕБЛЕНИИ ЭНЕРГИИ**

*А.Д. Лобов, А.А. Кобзева, Ч.А. Кадыров, В.С. Глазов*  
ВЛИЯНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА..... 89

*Т.С. Вайсс, Л. Вайсс, А.Б. Гаряев*  
СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВА В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ПРЯМЫМ ВПРЫСКОМ..... 91

*И.В. Яковлев, Н.В. Авдокунин*  
ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ..... 95

*В.А. Филиппов, В.С. Агабабов*  
ВЗАИМОВОСТРЕБОВАННЫЕ УСТАНОВКИ В МЕТАЛЛУРГИИ..... 102

*А.А. Добринская, О.Е. Прун*  
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВЛАГОВЫПАДЕНИЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА ВЫСОКОЙ ВЛАЖНОСТИ..... 107

*А.В. Кульбякина, Н.А. Озеров, А.И. Савельева, А.П. Мунин*  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРЕДПРИЯТИЙ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ..... 111

*В.В. Бухмиров, М.Г. Сулейманов, Е.Н. Бушуев, О.Б. Колибаба*  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ НАГРЕВЕ НАСЫПНЫХ САДКОВ В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ..... 118

*М.С. Пурдин, Н.Э. Тукбаев, И.А. Герасимов*  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА АККУМУЛЯЦИИ ТВЕРДОГО ИЗОЛИРОВАННОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ ..... 120

*Н.М. Савченкова, А.И. Симоненков*  
РАСЧЕТ ПЛОСКОЙ ТЕПЛОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ..... 124

*А.А. Воробьев, Я.А. Кирюхин, Е.М. Горячева, М.В. Горелов*  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗДАНИЯ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПИКОВЫХ РАСХОДОВ ТЕПЛОТЫ В СИСТЕМЕ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ..... 128

*Е.П. Валужева, В.С. Зюкин*  
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКСИАЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ..... 133

*Е.П. Валужева, Е.А. Морозов*  
ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ..... 138

*О.Д. Матухнова, Д.А. Ефимов, А.Б. Гаряев*  
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ОРОШЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ СОЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК..... 143

*Г.П. Власенко, А.В. Антипов, М.О. Морозов, М.А. Балакин, К.О. Плешков, А.Р. Аляутдинов*  
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТНУ ..... 146

*В.Д. Алексеева, С.В. Полканов, И.Г. Леонов, И.С. Плашков*  
ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
СУЩЕСТВУЮЩИХ И РЕКОНСТРУИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И ОБЪЕКТОВ БЮДЖЕТНОЙ СФЕРЫ..... 151

*Г.И. Парфенов, Н.Н. Смирнов, В.В. Тютиков, В.М. Захаров*  
СНИЖЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО  
МИКРОКЛИМАТА В ЗДАНИЯХ С ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫМИ СВЕТОПРОЗРАЧНЫМИ  
КОНСТРУКЦИЯМИ..... 156

*Е.Е. Корочкина, О.В. Блинов*  
РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ  
РАБОТЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ..... 163

*О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов*  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПЕЧЕЙ ПИРОЛИЗА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ  
ОТХОДОВ..... 167

*А.А. Кобзева, С.К. Ву, В.С. Глазов*  
ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ В КАНАЛЕ, СТЕНКИ КОТОРОГО ИМЕЮТ РАЗНЫЕ  
ТЕМПЕРАТУРЫ И ИНТЕНСИФИКАТОРЫ ТЕПЛООБМЕНА..... 173

*Е.Е. Ельникова, А.А. Кобзева, Ч.А. Кадыров, В.С. Глазов*  
ОБ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЯХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ТРЕБУЕМЫЙ  
ТЕПЛОЙ КОМФОРТ В ЗДАНИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНЕ ЛОКАЛЬНОГО  
ПОТЕПЛЕНИЯ..... 177

*А.А. Арбатский, С.И. Поляков, И.В. Рычков, А.Н. Жидков, А.В. Дубовой*  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТАКТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА..... 181

*А.А. Арбатский, В.С. Глазов, С.И. Поляков, С.П. Останин, К.И. Королева, А.В. Дубовой*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ ПРЯМОГО НАГРЕВА ВОДЫ И ВОЗДУХА  
МЕТОДАМИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ..... 187

#### **Секция 4. ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*А.А. Борисов, В.С. Королев, С.Н. Петин*  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОХИМИЧЕСКОЙ АККУМУЛЯЦИИ ДЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА..... 194

*Н.С. Сергиенко, А.Ю. Свеженцева, А.Н. Казаков, Д.В. Блинов*  
МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ С ФАЗАМИ ЛАВЕСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ  
ИСТОЧНИКОВ ТОКА..... 200

*А.Ю. Свеженцева, Н.С. Сергиенко, Д.В. Блинов, А.Н. Казаков*  
РАЗРАБОТКА МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ОСНОВЕ  $\text{LaNi}_5$  И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИХ СВОЙСТВ..... 205

*Т.А. Гатауллин, А.Н. Казаков, Д.О. Дуников*  
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  $\text{AB}_5$  ТИПА..... 210

*И.Д. Карпилов, Р.М. Мустафин*  
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ  
РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПОДОГРЕВЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ВСТАВКИ  
РЕГЕНЕРАТИВНЫМ МЕТОДОМ..... 215

*Р.М. Мустафин, И.Д. Карпилов*  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В  
УСТАНОВКАХ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ЗА СЧЕТ ПАРОВОЙ  
КОНВЕРСИИ МЕТАНА..... 221



*В.Н. Кулешов, С.В. Курочкин, А.А. Гаврилюк, М.А. Климова*  
РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОДНО-ДИАФРАГМЕННЫХ БЛОКОВ ДЛЯ ЩЕЛОЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОЛИЗЁРОВ ВОДЫ..... 227

*А.В. Бездудный, Д.В. Блинов, В.И. Борзенко*  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОГИДРИДНОМ  
РЕАКТОРЕ ХРАНЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ..... 230

*И.В. Пушкарева, М.А. Соловьев, М.В. Козлова, С.И. Бутрим, Д.А. Симкин, А.С. Пушкарев, Н.В. Кулешов*  
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ  
ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ВОДЫ С АНИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ..... 235

## **Секция 5. ДИАГНОСТИКА, МОНИТОРИНГ, ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ**

*С.В. Гумилевский, Т.Ю. Фрозинова*  
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА  
ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ОБЪЕКТАХ СЕТЕВОГО ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА..... 240

*В.И. Лазарев, С.В. Вишняков*  
РАЗРАБОТКА МЕТОДА КЛАССИФИКАЦИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО  
ОСЦИЛЛОГРАММАМ ТОКА..... 244

## **Секция 6. МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА, НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**

*П.В. Хорева, С.К. Попов, И.М. Бернадинер*  
ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ  
ТЕРМИЧЕСКОГО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД..... 250

*А.А. Чепига, Ю. Али, Е.О. Столяров, А.Р. Золотов, Н.А. Травкин, Т.К. Масленников*  
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ 3-УРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ  
ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ..... 256

*А.А. Валинеева, С.К. Попов*  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ОДИНОЧНОЙ ТВЕРДОЙ ЧАСТИЦЫ..... 262

## **Секция 7. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

*Д.В. Никифорова, Д.А. Смирнова, Е.Д. Хащенко*  
ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЭС ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
САНАТОРИЯ В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ..... 270

*М.С. Скиба, В.В. Бологова*  
ЦИФРОВИЗАЦИЯ, КАК ИНСТРУМЕНТ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ..... 274

*А.Ю. Амелина, А.С. Риттер*  
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ  
РЕГУЛИРОВАНИИ ТАРИФОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ..... 280

*П.И. Пысина, И.М. Бернадинер, П.В. Хорева*  
ТЕПЛОВОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ ПЕЧИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ  
МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ..... 287

*Е.А. Пехова, Д.Г. Шувалова*  
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ ПРИ  
РЕАЛИЗАЦИИ БАЛАНСА ИНТЕРЕСОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ..... 292

<i>Ю.А. Овчинникова, Д.Г. Шувалова</i> ВЛИЯНИЕ ПОЛИТИКИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОТРАСЛЕВОМ РЫНКЕ.....	296
<i>И.А. Зайцев, Д.А. Смирнова, Д.В. Никифорова</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ Г. КЛИН.....	299
<i>Д.А. Смирнова, Д.Г. Шувалова</i> КОНЦЕССИЯ КАК КОМПЛЕКСНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ.....	306
<i>Р.И. Туктамышев, Д.А. Смирнова</i> ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА.....	310
<i>Е.Ю. Кваснюк, В.В. Бологова</i> ИНЖИНИРИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ.....	316
<i>Колданова Н.И., Бологова В.В.</i> ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА АТОМНОЙ ЭНЕРГОСТАНЦИИ.....	318
<b>Секция 8. СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ</b>	
<i>А.В. Клименко, А.Г. Терёшин, О.Е. Прун</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИИ В СНИЖЕНИИ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ.....	322
<i>Д.Д. Волкова, А.М. Боровкова</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	327
<i>О.Е. Кондратьева, О.А. Локтионов</i> ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К УЧЕТУ СПОСОБНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ЛЕСНЫМИ МАССИВАМИ.....	332
<i>И.В. Королев, Д.А. Бурдюков, Е.Г. Антоненко</i> ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ С УЧЕТОМ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ.....	337
<i>Л. К. Зеленская</i> АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И УЧЕТА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ.....	343
<i>М.М. Руквишников, Н.В. Озерова, Д.М. Комаров, Д.В. Держаев</i> СНИЖЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ.....	347
<i>Е.Г. Гашио, С.В. Гужов</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ - ОСНОВА РЕГИОНАЛЬНЫХ/ГОРОДСКИХ ПЛАНОВ И ПРОГРАММ КЛИМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ.....	351
<i>Ю.А. Таран, В.М. Фуфаева, Н.Д. Разина</i> ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ И ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ.....	354
<b>Секция 9. АКТУАЛЬНЫЕ ФИЛОСОФСКИЕ ВОПРОСЫ СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕСУРСОВ</b>	
<i>Л.Ю. Пионткевич</i> ЭТИЧЕСКИЕ ПРОГРАММЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ (К ВОПРОСУ О МОРАЛЬНОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТИ).....	360

<i>А.М. Кучинов</i> БОЖЕСТВЕННАЯ ЭНЕРГИЯ В ПАТРИСТИКЕ ГРИГОРИЯ ПАЛАМЫ: ИНТЕРПРЕТАЦИИ И АКТУАЛИЗАЦИИ В РОССИЙСКОЙ МЫСЛИ.....	365
<i>Ю.В. Соколова</i> ТОТАЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ КАК СОВРЕМЕННЫЙ СОЦИАЛЬНЫЙ ФЕНОМЕН.....	370
<i>Л.К. Рашитова, С.Н. Курилов</i> КУЛЬТУРНО-ИСТОРИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БАШКИРСКИХ ШИХАНОВ).....	373
<i>О.А. Чалова</i> ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ИЗУЧАЕМ ЭКОЛОГИЮ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ» КАК СРЕДСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МИРОВОЗЗРЕНИЯ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА.....	377
<i>А.Ю. Шелковников</i> ФИЛОСОФСКИЙ АСКЕТИЗМ И СОВРЕМЕННАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМАТИКА...	382
<i>В.В. Хоминская</i> ОБЩЕСТВО ПОТРЕБЛЕНИЯ: ОПАСНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБРАЗОВАНИЯ.....	387
<i>О.Б. Власенко</i> ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ.....	390
<i>А.А. Суворкина, Ю.В. Соколова</i> КОНЦЕПЦИЯ БЫТИЯ И ОБЛАДАНИЯ: ОСОЗНАННОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ И ВЛИЯНИЕ РЕКЛАМЫ НА ОБЩЕСТВО.....	395
<i>А.Л. Гынгов</i> ПЕРЕХОД ОТ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО К ПОСТ-ПОТРЕБИТЕЛЬСКОМУ ОБЩЕСТВУ. ФИЛОСОФСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	399
<i>К.М. Сербулов, Ю.В. Соколова</i> ОТРАЖЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПОТРЕБЛЕНИЯ В ИСКУССТВЕ ПОСТМОДЕРНА.....	401
<i>С.Б. Степаненко</i> ЭТИКА САМООГРАНИЧЕНИЯ: ЭЛЛИНИСТИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗУМНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ.....	404
<i>А.А. Miliatzidou</i> THE SHAPING OF IDENTITY IN CONSUMER SOCIETY.....	408
<i>N. Atanasova</i> MANIPULATING ART'S DIGITAL SCARCITY: OWNING, SHARING AND DOWNLOADING PIECES OF DIGITAL CULTURE.....	411
<i>С.В. Хохлов</i> ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕСУРСОВ КАК ФИЛОСОФСКАЯ ПРОБЛЕМА.....	415
<i>Д.Д. Антипова</i> ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	420
<i>А.С. Аджемов, А.Б. Денисова</i> ФИЛОСОФИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ОБЩЕСТВЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ.....	423
<i>D.L. Tomasi</i> BETWEEN EMPIRICAL EVIDENCE AND THEORETICAL FRAMEWORKS: THE CONCEPT OF FREE WILL AT THE INTERSECTION OF PHILOSOPHICAL UNDERSTANDING, PSYCHOLOGICAL ANALYSIS, AND NEURAL CORRELATES.....	428

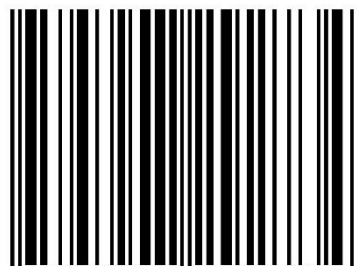
*Научное издание*

## **Энергосбережение – теория и практика**

Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции  
с Международным участием

Верстка *М.С. Пурдин*

ISBN 978-5-907292-73-4



9 785907 292734 >

Подписано в печать 07.09.2022  
Формат 60×84 1/8, Бумага офсетная  
Усл.печ. л. 50,7 Тираж 100 экз.  
ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“»  
117105, город Москва, Варшавское ш., д. 28а

Отпечатано в ООО «Радугапринт».  
117105, г. Москва, Варшавское шоссе, д.28А,  
Тел.: (495) 252-75-10.  
<http://www.raduga-print.ru>