



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

19 – 23 октября 2020 г.
Москва

Москва
НИУ МЭИ
2020

УДК 620.92.004.14(063)
ББК 31.15я5
Э 653

Э 653 **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.

ISBN 978-5-907356-27-6

Публикуемые доклады содержат результаты исследований молодых 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 978-5-907356-27-6

© Авторы, 2020

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2020

Участникам X Международной школы-семинара молодых специалистов и ученых «Энергосбережение – теория и практика»

Уважаемые участники школы!

Поздравляем вас с открытием X юбилейной международной школы-семинара «Энергосбережение-теория и практика», посвященной 90-летию Национального исследовательского университета «МЭИ» и 100-летию плана ГОЭЛРО.

Первая школа-семинар состоялась 18 лет назад, в 2002 году. Школа была организована 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) и Федеральный закон РФ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности...» (2009 г).

Сейчас эта проблема приобретает все большую актуальность. Озабоченность общества состоянием окружающей среды и изменением климата, необходимость снижения затрат на производство продукции, желание сохранить энергетические ресурсы для новых поколений – все это побуждает людей экономить энергию. Пандемия коронавируса в 2019 и 2020 годы и сопровождающий ее экономический кризис внесли свои коррективы в жизнь людей по всему миру. В результате возникает еще большая потребность в энергоэффективных технологиях, позволяющих снизить издержки и сохранить прежние темпы экономического роста.

Состоявшиеся в 2002 - 2018 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.

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 охватывает всю страну. Школа является

международной. В ней участвовали представители Казахстана, Белоруссии, Германии, Аргентины, Вьетнама, Доминиканской республики.

На X юбилейной школе традиционно будут представлены доклады по результатам исследований энергосбережения при генерации, транспортировке, потреблении, энергии, в комплексе городского хозяйства, малой энергетики, экономическим вопросам энергосбережения, а также его информационно-аналитическому обеспечению.

Школа будет проведена на базе Института энергетической эффективности и водородных технологий НИУ «МЭИ» с привлечением других подразделений университета. В 2020 году Институт проблем энергетической эффективности был переименован в Институт энергетической эффективности и водородных технологий. На кафедрах работают научные коллективы, цель которых – сделать производство, хранение и использование водорода более эффективным и безопасным. И в этом году в работе конференции появилась новая секция, посвященная водородным технологиям.

Существование нашей школы 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.

X международная школа-семинар позволит молодым ученым обсудить полученные научные результаты со своими коллегами и расширить кругозор при обсуждении научных и технических проблем с ведущими учеными.

Мы хотим посвятить X юбилейную международную школу-семинар научно-преподавательскому составу, стоящему у истоков её создания, в том числе ее первому организационному комитету: А.В. Клименко, А.Г. Вакулко, Ю.М. Павлову, В.С. Агабабову, Н.И. Морозкиной, и ушедшим из жизни преподавателям и ученым МЭИ, которые внесли большой вклад в исследование и разработку энергоэффективных технологий, в продвижении идей энергосбережения на государственном уровне и в отечественной промышленности: О.А. Данилову, А.Д. Ключникову, Н.В. Коровину, А.А. Ефимову и другим.

Ваше дело не забыто, и мы надеемся стать достойными его продолжателями.

Желаем участникам школы плодотворной работы, творческих успехов и дальнейшего профессионального роста.

Оргкомитет школы-семинара X ЭТИП

Организаторы школы-семинара

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Комитет Российского Союза НИО по сушке и
термовлажностной обработке материалов

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

При поддержке



Торгово-производственного холдинга «Русклимат»

wilo

ВИЛО РУС

Информационные партнеры:

журнал «Промышленная энергетика»

Научно-организационный комитет

С.В. Захаров – председатель, к.т.н. директор Института энергоэффективности и водородных технологий ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

Е.В. Цепляева – зам. председателя, к.т.н. Заместитель директора по учебной и воспитательной работе Института энергоэффективности и водородных технологий ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

А.Б. Гаряев – зам. председателя, д.т.н. профессор, зав. кафедрой Теплообменных процессов и установок ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при потреблении энергии".

М.С. Пурдин – секретарь, к.т.н. доцент кафедры Теплообменных процессов и установок ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

В.С. Агабабов – д.т.н., профессор кафедры ТЭС ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при генерации энергии".

А.А. Арбатский – к.т.н., доцент кафедры Теплообменных процессов и установок ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

А.В. Бобряков – д.т.н., профессор, зав. кафедрой Управления и информатики ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", директор Центра информационных Аналитических Систем Минобрнауки России, руководитель секции "Диагностика, мониторинг, информационно-аналитические системы в энергосбережении".

А.В. Дедов – д.т.н., директор института тепловой и атомной энергетики ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

В.В. Клименко – д.т.н., чл.-корр. РАН, профессор, зав. НИЛ глобальных проблем энергетики ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

Н.В. Кулешов – д.т.н., профессор, зав. кафедрой Химии и электрохимической энергетики ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Технологии водородной энергетики".

Г.Н. Курдюкова – к.т.н., проректор по экономике, зав. кафедрой Экономики в энергетике и промышленности ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

А.Н. Роголев – д.т.н., доцент, зав. кафедрой Инновационных технологий наукоемких отраслей.

Г.А. Романов – к.т.н., директор Научно-технического инновационного центра энергосберегающих технологий и техники ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

С.П. Рудобашта – д.т.н., профессор Московского государственного агроинженерного университета МСХА имени К.А. Тимирязева, председатель Комитета Российского Союза НИО по проблемам сушки и термовлажностной обработки материалов.

А.В. Рыженков – д.т.н., руководитель Научного Центра "Повышение износостойкости энергетического оборудования электростанций" ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение в комплексе городского хозяйства".

Н.М. Савченкова – к.т.н., доцент кафедры Теплообменных процессов и установок ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель отдела иностранной аспирантуры ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

Т.А. Степанова – к.т.н., доцент, зав. кафедрой Энергетики высокотемпературной технологии ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ".

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 экономики в энергетике и промышленности ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Экономические аспекты энергосбережения".

Ю.В. Яворовский – к.т.н., зав. кафедрой промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", руководитель секции "Энергосбережение при транспортировке энергии".

**СОДЕРЖАНИЕ СБОРНИКА ТРУДОВ
X Международной школы-семинара
молодых ученых и специалистов
«Энергосбережение – теория и практика»**

Секция 1. Энергосбережение при потреблении энергии

Секция 2. Энергосбережение при транспортировке энергии

Секция 3. Энергосбережение при генерации 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. Энергосбережение в комплексе городского хозяйства



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 1

*Энергосбережение
при потреблении энергии*

A.S. Zhumabekov, A.R. Baibassarova
Shakarim State University of Semey, Kazakhstan

THE ROLE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MEAT AT NEGATIVE STORAGE TEMPERATURES IN THE CHOICE OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES

ABSTRACT

One of the most important directions of creating new technologies is to reduce energy consumption in production. Food production has a sufficient reserve for carrying out energy security measures. This article discusses various ways to reduce energy consumption in the production and storage of food products, as well as the role of thermal characteristics in the application of energy-saving technologies.

1. INTRODUCTION

One of the most important directions of creating new technologies is to reduce energy consumption in production of food. This study allowed to identify the most energy-intensive industries in the food industry, as well as the stages of technological processes where it is especially appropriate to use energy-saving technologies and technical means. The most energy-intensive industries are meat, dairy, canning, fat-and-oil, and others. Food production has a sufficient reserve for carrying out energy security measures. At the same time, the capital cost of fuel and energy saving measures is two to three times less than the capital cost required to generate an equivalent additional amount of energy [1].

The basic values for calculating technological processes in which food is heated, cooled or frozen are the thermal characteristics, they are also necessary for the design and selection of technological equipment for this type of process.

2. METHODS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION

Thus, in the meat industry, it is possible to achieve an energy-saving effect by applying the technology of processing raw meat with the use of heat treatment machines without the use of hot water. Steam consumption is reduced by 3.5 times and is 100 kg/hour, against 350-400 kg/hour according to the traditional technological scheme. The fat content in the wastewater during separation is minimized and is only 1.0 mg/dm, against 1000 mg/dm. In order to achieve significant energy savings, it is possible to increase the temperature of product storage in the refrigerator from -18°C to -12°C . For short-term cold storage, the specific daily cold consumption at the storage temperature of meat is minus 12°C depending on the degree of loading of the chamber (from 25% to 100%) and changes in the average annual outdoor temperature is reduced by 4 times. Due

to an increase in the air temperature in the chamber, the cost of cold is reduced by an average of 9.2%.

Thermal insulation is an important part of any refrigerator, since its characteristics and installation quality determine the cooling capacity of the used refrigerator its resource, the service life of the refrigerator as a whole, and other parameters. Many meat processing plants use mineral wool and its modifications as a thermal insulation material for cold storage rooms. However, this material has a number of disadvantages, one of which is, during prolonged operation of the chambers, its thermal properties deteriorate. The obtained values of thermophysical characteristics of meat reflect the physical laws of changes in the state of moisture in it during freezing and can be used to intensify the freezing processes and calculations of low-temperature equipment for preserving meat products. Exclusion of hot water at the stage of heat treatment reduces the total water consumption and allows to intensify the entire process by 40 times [2, 3].

In order to develop effective and energy-saving technologies for low-temperature preservation and storage, reliable and objective information about the thermophysical properties of meat over the entire temperature range is necessary. In addition, knowledge of thermal characteristics is necessary when designing and selecting technological equipment for the implementation of freezing processes.

When determining the thermal properties in the selected temperature range, maintaining the constant temperature of the cooling medium depends on the size of the object being cooled and the temperature difference between this object and the cooling medium. The smaller the size of the object to be cooled, the shorter the period of passage of the specified temperature range, the greater the guarantee of maintaining a constant temperature of the cooling medium. Due to the heterogeneity of even the same-named food products, associated with their biological nature of origin, when choosing the size of the test sample, it is necessary to take this factor into account. Otherwise, the obtained experimental values of thermal properties will not reflect the distinctive features of its composition and structure characteristic of the object under study. The initial temperature difference between the object and the cooling medium should be as close as possible to the selected temperature range. With a greater temperature difference, the uneven temperature field of the ob-

ject increases, which increases the difference in the amount of heat generated by the volume of the body and leads to distortion of the results of determining the thermal properties. Apparently, to obtain reliable results for determining the thermal properties of food products, the temperature fluctuation of the cooling medium in the experimental installation should not exceed 2-3%. In this case, when determining the thermal properties in a temperature range equal to 1°C, the temperature fluctuation of the cooling medium in the installation should be no more than 0.02–0.03°C [3].

For the same temperature range, the error in determining thermal properties during ice formation will be greater for products with a high moisture content. On the example of a product with a sufficiently high moisture content, such as beef meat, it is possible to estimate the amount of change in its thermal properties in the temperature range of 1°C. Results of calculating the specific heat capacity c , thermal conductivity coefficients λ and thermal diffusivity a according to the calculated formulas [4, 5] for meat containing 70% of moisture and having a cryoscopic temperature of -1°C and densities of 1020 kg / m³ are shown in table 1.

Table 1. Thermal characteristics of beef meat.

Temperature, °C	Heat capacity, c , kJ / kg · °C	Thermal conductivity, λ , W / m · °C	Thermal diffusivity, $a \cdot 10^8$, s	Difference, %		
				c	λ	a
-2	120,40	1,134	0,92	65,4	7,8	68,3
-3	41,63	1,230	2,90			
-4	21,86	1,286	5,77	36,2	1,5	37,5
-5	13,95	1,314	9,23			
-6	9,99	1,334	13,09	23,0	1,1	22,2
-7	7,69	1,348	17,19			
-8	6,23	1,358	21,37	14,8	0,6	15,3
-9	5,31	1,366	25,22			
-10	4,64	1,373	29,01	10,7	0,4	11,0
-11	4,15	1,379	32,58			
-12	3,79	1,384	35,80	7,6	0,4	8,0
-13	3,50	1,389	38,90			
-14	3,28	1,392	41,60	5,2	0,3	5,5
-15	3,11	1,396	44,00			
-16	2,94	1,398	46,62	3,7	0,3	4,0
-17	2,83	1,402	48,57			
-18	2,74	1,405	50,27	3,6	0,1	3,7
-19	2,64	1,406	52,21			
-20	2,58	1,407	53,47	1,2	0,1	1,2
-21	2,55	1,408	54,13			

Table 1 shows that the results of determining the thermal conductivity in the range of 1°C for meat and products with similar properties for temperatures of -2°C and below are quite suitable for use in technical calculations of processes of food refrigeration technology [6]. For heat capacity and thermal conductivity, this temperature range is below -8°C. To obtain data from these thermal properties at temperatures above -8°C with an error not exceeding the permissible limits, the temperature range of their determination must be reduced to 0.4-0.5°C.

The most energy-intensive devices in the cooling system are storage rooms. Their share in the energy consumption of the cooling system is 30-60 %. Existing chambers are usually large in size, have poor thermal insulation, and have an extremely low load level. During loading and unloading of products through open doors and gates, intensive air exchange occurs with

warmer rooms. The cells need to be modernized: insulation repair, partitioning, use of modern means of loading/unloading, sealing of doors and gates. The introduction of modern technologies and less energy-intensive equipment at fruit and vegetable processing enterprises on average can reduce energy consumption by 20-25% by increasing the coefficient of useful use of energy of the heat carrier, improving the thermal schemes of installations, rational methods of heat and mass transfer intensification, and other measures [7, 8].

Based on the results of the analysis of regular mode methods, an experimental unit was created for determining the thermal properties of food products in the temperature range from +10 to -50°C, including calorimeters, refrigerating thermostatic and thermometric systems. The schematic diagram of the installation is shown in figure 1.

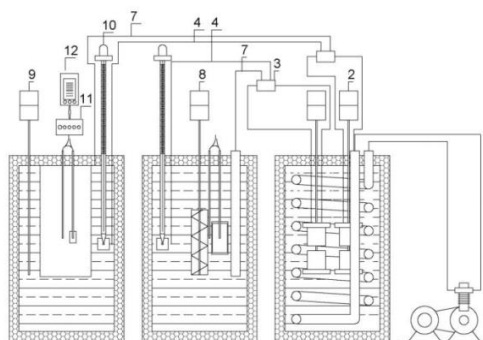


Fig. 1. Installation diagram for determining the thermal properties of food products.

When performing thermophysical calculations of thermal and refrigerating processing of food products, both experimental and calculated values of thermal properties are used [3, 4]. However, the reliability of calculated thermal properties is always evaluated by comparing them with experimental data. Therefore, the experimental determination of the TFH of food products and the establishment of patterns of their changes, especially during ice formation, is still an important tool for performing thermophysical calculations of the processes of food refrigeration technology.

The results obtained with the help of an experimental setup for determining the values of specific heat capacity, thermal conductivity coefficients and thermal conductivity at temperatures from 0 to -42.5°C of chicken egg melange containing 72.5% moisture and having a cryoscopic temperature equal to -0.62°C . Checking the efficiency of the installation showed that the choice of methods of regular heat regime (acalorimeter and microcalorimeter) for determining the TFH of food products, including during ice formation in them, is quite justified, and the proposed technical solution is quite reliable [9, 10].

3. CONCLUSIONS

In order to improve the efficiency of domestic food enterprises and at the same time create a wide range of diverse products, the development of resource-saving technologies that allow the rational use of raw materials, as well as secondary raw materials, is becoming increasingly important.

Resource-saving technology of refrigeration processing and storage of meat raw materials with the use of synthetic oils that intensify the work of refrigerants, helps to reduce the shrinkage of meat raw materials by 30-35% and reduce raw material losses by 2 times. The introduction of lines for the use of secondary raw materials in the production cycle of meat processing will reduce their availability by up to 30%. Currently, waste-free cycles of processing meat raw materials using secondary raw materials up to 50% are being developed.

The performance of the above directions of energy saving in food industry of the country will allow more rational to expend production resources, reduce energy intensity of processes that reduce waste, increase product quality to the level of compliance with international standards.

LIST OF DESIGNATION

TFH – thermophysical characteristics

λ - thermal conductivity, $W/m \cdot ^{\circ}\text{C}$;

a - thermal diffusivity, s ;

c - heat capacity, $kJ/kg \cdot ^{\circ}\text{C}$;

t – temperature, $^{\circ}\text{C}$.

BIBLIOGRAPHY

1. **Tereshhenko T.A.** Strategiya integracionnogo razvitiya molochno-produktovogo podkompleksa APK Krasnodarskogo kraja [Strategy of integration development of the dairy and food subcomplex of the agro-industrial complex of the Krasnodar territory] *E'konomika i biznes. Vzgljad molody'x: sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii studentov i aspirantov.* Chelyabinsk, 2007. S. 11-15.
2. **Kuczakova V.E., Frolov S.V., Filippov V.I., Danin V.B.** Xolodilnaya texnologiya pishhevix produktov [Refrigerating technology of food products]: *Uchebnik dlya vuzov: v 3 kn. / - SPb.: GIORD, 2007. - 224 s.*
3. **A.V. Baranenko, V.E. Kuczakova, E.I. Borzenko, S.V. Frolov** Primery i zadachi po xolodilnoj texnologii pishhevix produktov [Examples and tasks of food refrigeration technology]: *Teplofizicheskie osnovy - SPb.: GIORD, 2012. - 269 s.*
4. **V.E. Kuczakova, I.A. Rogov, S.V. Frolov, V.I. Filippov.** Primery i zadachi po xolodilnoj texnologii pishhevix produktov [Examples and problems on refrigeration technology of food products]: *Teoreticheskie osnovy konservirovaniya: Uchebnoe posobie - SPb.: GIORD, 2008. - 160 s.*
5. **Bolshakov, S.A.** Xolodilnaya texnika i texnologiya produktov pitaniya [Refrigerating appliances and food technology]: / S.A. Bol'shakov. - M.: Izdatel'skij centr «Akademiya», 2003. - 304 s. 5.
6. **Volkenshtejn, V.S.** Skorostnoj metod opredeleniya teplofizicheskix xarakteristik materialov [High-Speed method for determining the thermal characteristics of materials]: - L.: Izdatelstvo "Energiya", 1971. - 145 s.
7. **Rysmyatov A.Z., Balashova I.V., Osennij V.V.** Optimizaciya prikrepleniya obektov syrevoj bazy proizvoditelej moloka k molokozavodam [Optimization of attachment of objects of raw material base of milk producers to dairies]: // *Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.* 2010. №55. S. 132-146.
8. **Rysmyatov A.Z., Kirichenko A.O.** Bazovye resursosberegayushhie texnologii sovremennogo texnologicheskogo uklada v plodovodstve [Basic resource-saving technologies of modern technological structure in fruit growing]: // *Sbornik nauchnyx trudov KRIA DPO FGBOU VPO Kubanskij GAU.* Krasnodar: Dom-Yug, 2013. S. 170-173.
9. **Korotkij, I.A.** Primenenie metoda dvux temperaturno-vremennyx intervalov dlya opredeleniya teplofizicheskix xarakteristik pishhevix produktov i materialov [Application of the method of two temperature-time intervals for determining the thermal characteristics of food products and materials]: / I.A. Korotkij, E.V. Korotkaya // *Izvestiya vuzov. Pishhevaya texnologiya.* - 2008. - № 2-3. - S. 109.
10. **Platunov E.S., Baranov I.V., Kuslieva E.V., Sergeev S.V.** Pribor dlya kompleksnogo issledovaniya teplofizicheskix svoystv vlagosoderzhashhix materialov [Device for complex research of thermophysical properties of moisture-containing materials] // *Izvestiya SPbGUNIPT.* 2009. №1. S. 143-146.

Р.О. Алексеев¹, Т.С. Березина¹, Г.П. Власенко¹, А.Н.Сабанова¹, Е.Н.Сабанова¹, Т.Тепель²

¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия,

²Бранденбургский технический университет, Германия

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ СЕМЯН ДИКО- РАСТУЩЕЙ ТРАВЫ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования сорбционных свойств и капиллярно-пористой структуры объектов сушки для уточнения параметров процесса сушки дикорастущей семенной травы. Предложены варианты совершенствования сушильных установок, применяемых для термической обработки дикорастущей семенной травы, а также для технических сортов растений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы обосновывается необходимостью наращивания производства семян дикорастущей травы, используемой для озеленения ландшафтов. Современному миру досталось тяжелое наследие индустриальной эпохи. Для восстановления природы необходимо ликвидировать негативные последствия человеческой деятельности за прошедшие десятилетия и взять вектор на новый технологичный, экологичный путь развития энергетики и технологии. Во многом это определяет потребность как в воспроизведении растительного мира на рекреационных землях, так и интеграцию растений в существующие ландшафты. Различные виды дикорастущих растений используются как для восстановления природного ландшафта, поврежденного после человеческой деятельности, так и в устройстве зеленых насаждений на кровлях зданий, придорожных территориях.

На сегодняшний день в технической и научной литературе отсутствуют предложения по разработке и совершенствованию сушильных установок, применяемых для термической обработки дикорастущей семенной травы, а также для технических сортов растений. Процессы сушки у многих компаний проводятся с использованием неэффективного оборудования и несоблюдением режимных параметров. Это приводит к тому, что собранные семена либо полностью лишаются активных веществ, либо частично снижается их качество, что приводит к экономическим издержкам. Для повышения показателей качества и энергоэффективности процесса сушки травы и получения семян необходимо проводить эксперименты по изучению процессов теплообмена растительного сырья. Изучение процессов сушки таких объектов позволит разработать наилучшие режимы и предложить параметры обезвоживания для нужд производства. Спрос на такие

установки обусловлен реализуемыми многочисленными проектами в различных странах для улучшения экологической обстановки на территориях, где до этого добывались полезные ископаемые открытым способом, в частности, в Германии.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНОГО СОРБЦИОННОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ СЕМЯН ДИКОРАСТУЩИХ ТРАВ

2.1. Экспериментальное исследование кинетики сушки

Немецкая компания Nagola Re GmbH (<https://www.nagolare.de>) с 2011 года уделяет повышенное внимание экологическим проектам, например, связанным с восстановлением естественного растительного покрова территорий, которым был нанесен ущерб в результате добычи бурого угля открытым способом. Ежегодное увеличение мощности производства потребовало реорганизации процессов сушки семян, в связи с чем руководство компании обратилось к партнеру НИУ «МЭИ»-Бранденбургскому техническому университету (BTU). Анализ состояния производства подтвердил необходимость исследования кинетики сушки семенной дикорастущей травы для уточнения режимных параметров процесса.

Для повышения энергоэффективности сушки травы и получения из нее семян были спланированы и проведены эксперименты по изучению процессов теплообмена растительного сырья, по анализу капиллярно-пористой структуры и сорбционных свойств исследованных растений.

Один из путей изучения механизма взаимодействия влаги и растений представляет собой исследование гигроскопических свойств как целого объекта, так и отдельных частей растений [1].

Равновесное влагосодержание зависит не только от вида культуры, но и от ее сорта. Банк данных по сорбционным свойствам и параметрам капиллярно-пористой структуры семян непрерывно пополняется, полученные данные для удобства кинетического расчета описываются соответствующими уравнениями, выражающими зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха и температуры [2], [3], [4], [5].

На основании данных по кинетике сушке определяется время и параметры сушки.

В данной работе нами рассмотрены три вида типичных полевых растений. В качестве объектов сушки исследованы семена, соцветия и стебли следующих растений: Ähriger Blauweiderich/*Veronica spicata* (растение 1), *Nachtkerze/ Oenothera* (растение 2), *Braunelle/Prunella* (растение 3), а также смеси указанных компонентов для растений 2 и 3. По морфологическим признакам указанные растения относятся к разным группам [6]. Для проведения исследования была использована установка сорбции водяного пара ProUmid SPS11-10μg (<https://proumid.com>). Даты проведения эксперимента: октябрь 2019 - февраль 2020.

2.2. Обработка полученных данных по параметрам сушки дикорастущих трав

По полученным экспериментальным данным построены графические зависимости равновесного влагосодержания исследованных образцов от относительной влажности воздуха при постоянной температуре 20 °С.

Выбор температурных параметров обусловлен существующими режимами хранения на производстве.

На рис. 1 представлена зависимость равновесного влагосодержания материала от относительной влажности воздуха для растений 1-3 для различных компонентов материалов.

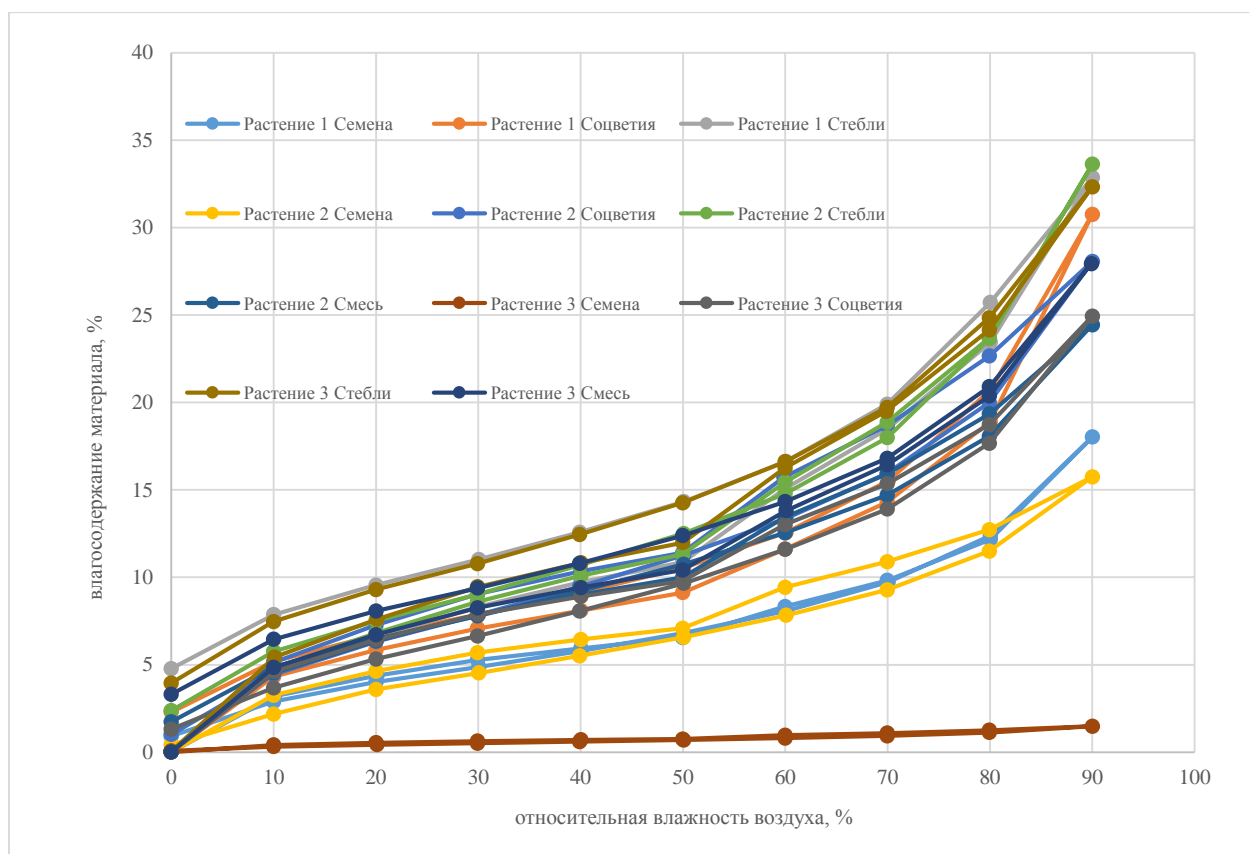


Рис. 1. Изотермы сорбции/десорбции образцов растений 1-3.

Поскольку взаимодействие материала с водой имеет сложный характер, для описания изотерм сорбции мы использовали полиномиальную зависимость. Обработанный результат экспериментов показал, что полученные данные с достаточной степенью точности описываются полиномами различных степеней, где пятая степень полинома была максимальной, а третья минимальная. Общий вид уравнения полинома пятой степени:

$$W_p = a_0 + a_1 \cdot \varphi + a_2 \cdot \varphi^2 + a_3 \cdot \varphi^3 + a_4 \cdot \varphi^4 + a_5 \cdot \varphi^5 \quad (1)$$

где W_p – равновесное влагосодержание материала, %;

φ – относительная влажность воздуха;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коэффициенты уравнения, зависящие от материала и температуры.

Значения коэффициентов уравнения для 11 образцов приведены в табл. 1.

Полученные полиномиальные зависимости позволяют при любой относительной влажности вычислить равновесное влагосодержание. При этом для растений из разных морфологических групп она имеет сходную форму.

Таблица 1. Значения коэффициентов уравнения равновесного влагосодержания для исследуемых материалов

Исследуемый материал	Коэффициент уравнения					
	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Растение 1						
Семена	-0,0203	0,5153	-0,0243	0,0006	-7·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁸
Стебли	0,2226	0,5008	-0,0102	1·10 ⁻⁴	0	0
Соцветия	-0,0189	0,7195	-0,0363	0,001	-1·10 ⁻⁵	6·10 ⁻⁸
Растение 2						
Семена	-0,0172	0,4938	-0,0201	0,0004	-4·10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁸
Стебли	0,2492	0,4734	-0,0095	9·10 ⁻⁵	0	0
Соцветия	0,0989	0,6421	-0,0187	0,0003	-1·10 ⁻⁶	0
Смесь	0,1199	0,5455	-0,0151	0,0002	-8·10 ⁻⁷	0
Растение 3						
Семена	0,0193	0,0498	-0,0015	2·10 ⁻⁵	-1·10 ⁻⁷	0
Стебли	0,0193	0,8103	-0,0334	0,0008	-8·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁸
Соцветия	0,3821	0,4337	-0,0082	7·10 ⁻⁵	0	0
Смесь	0,3341	0,4765	-0,0095	8·10 ⁻⁵	0	0

На рис. 2 показано сравнение изотерм сорбции для исследуемых растений по смесям и семенам соответственно. Проанализированы размеры исследованных семян и их принадлежность к разным группам по морфологическим признакам. Выявлены зависимости достижения равновесного влагосодержания от состава образца.

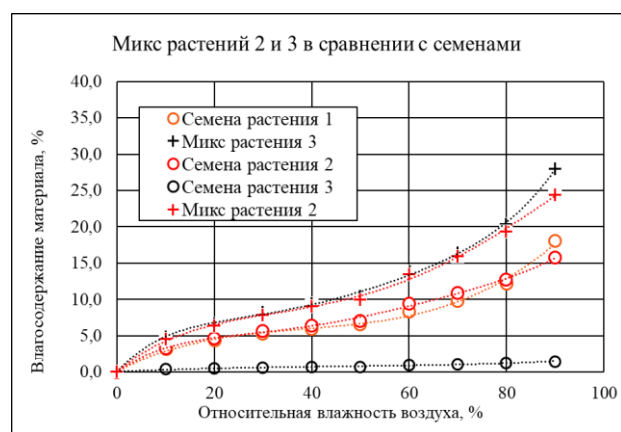


Рис.2. Изменение равновесного влагосодержания образцов в зависимости от относительной влажности воздуха для смесей двух растений с семенами при температуре 20 °С.

На основании приведенной на рисунке 2 зависимости можно сделать вывод о том, что равновесное влагосодержание семян достигается при более низких значениях относительной влажности по сравнению со смесью.

Также кривые сорбции для семян растения 1 и 2 близки по своим значениям, а кривые смеси компонентов растения 2 и растения 3 находятся в одной области, тогда как область значений кривой сорбции семян растения 3 расположена значительно ниже, несмотря на схожие морфологические признаки растений.

Эти данные необходимо учитывать при разработке режимов работы установки и технологических карт для сушки семян совместно с остальными компонентами растения.

2.3. Определение параметров капиллярно-пористой структуры объекта сушки

Используя изотермы сорбции, можно оценивать состояние влаги в материале и форму влаги, которую необходимо удалить в процессе сушки для достижения требуемой конечной влажности. Значение изотерм сорбции важно также с точки зрения технологии, выбора режима сушки и хранения высушенного материала. Существующая теория явлений сорбции и десорбции не имеет строгого аналитического описания изотерм и общих уравнений для них, что обусловлено прежде всего различными формами влаги с материалом [7].

В регулировании водного обмена растений значительную роль играют водоудерживающие силы, обусловленные в основном содержанием в клетках осмотических активных веществ и соотношения в объекте сушки макро- и микрокапилляров. Водоудерживающая способность клеток зависит от

условий выращивания растений. Большое влияние при этом оказывают условия минерального питания растений. При оптимальных условиях водоудерживающая способность возрастает, водоотдача за 30 минут составляет лишь 4-6 % от исходной величины. Для расчета удельной поверхности сорбентов, для которых характерны S-образные изотермы сорбции, использовано уравнение БЭТ [8]:

$$\frac{\varphi}{x \cdot (1-\varphi)} = \frac{1}{x_m \cdot C} + \frac{C-1}{x_m \cdot C} \cdot \varphi \quad (2),$$

где φ – относительная влажность воздуха, %;

x – количество сорбированного вещества, г/г;

x_m – количества вещества в сплошном мономолекулярном слое, г/г;

C – постоянная, представляющая отношение времени жизни молекул в первом слое и жидкости соответственно;

$$A_m = 1,091 \cdot \left(\frac{M}{\rho \cdot N_A}\right)^2 \cdot 10^{16} \quad (3),$$

$$W_0 = \frac{x_{max}}{\rho} \quad (4),$$

$$S_{уд} = \frac{x_m}{M} \cdot N_A \cdot A_m \cdot 10^{-20} \quad (5),$$

где A_m – площадь поперечного сечения молекул адсорбата, площадь которую адсорбированная молекула занимает на поверхности твердого тела в заполненном монослое;

W_0 – суммарный объём пор, см³/г;

$S_{уд}$ – удельная поверхность твердого вещества, м²/г.

Полученные результаты сведены в таблицу 2. При этом семена растения 1 из группы II характеризуются разнообразной дисковидной симметричной или асимметричной формой. Ширина таких семян обычно как минимум в два раза больше толщины (1,2–1,6 мм длиной, 1–1,4 мм шириной, 0,3–0,4 мм толщиной).

Семена растения 2 (кипрейные) и растения 3 (губоцветные) относятся группе VII A (ребристые семена). Неправильная форма семян этой группы отличается обязательным наличием углов и ребер. Они имеют очень сложную структуру, могут иметь всевозможные шипы, зубчики, щетинки, волоски, как отдельно, так и в виде клубка, поверхность семян напоминает бумагу или мягкую кожу. Количество семян в соцветиях часто очень большое и семена соответственно маленькие и благодаря взаимному давлению они неправильно гранистые. Но каждое из рассмотренных растений одной группы при этом имеет свои отличительные особенности. Семена группы растений кипрейные (0,3–5 мм длиной, 0,2–1,5 мм шириной и толщиной) имеют утолщение и в поперечном разрезе образуют квадрат или треугольник. Семена группы губоцветные (1,5–2,4 мм длиной, 0,9–1,4 мм шириной, 0,7–1 мм толщиной) характеризуются высоким содержанием эфирных масел. Полученные значения для риса определены на основании изотерм сорбции [3].

Таблица 2. Параметры капиллярно-пористой структуры растений 1,2,3

Название	$S_{уд}$, м ² /г	W_0 , см ³ /г
Растение 1		
Семена	144,6	0,180
Стебли	193,0	0,308
Соцветия	242,1	0,329
Растение 2		
Семена	160,7	0,157
Стебли	256,4	0,281
Соцветия	246,9	0,336
Смесь	221,7	0,224
Растение 3		
Семена	16,8	0,015
Стебли	220,5	0,249
Соцветия	266,6	0,323
Смесь	229,9	0,279
Рис [3]	192,46	0,227
Пустырник [4]	131	0,082
Мать и мачеха [4]	95,5	0,276

2.4 Варианты схемных решений установок для сушки дикорастущей травы

Увеличение производства семян дикорастущей травы – сложная задача, т.к. приходится высушивать семена совместно с соцветиями и стеблями. Для получения семян необходимо подсушить семенную коробку, а при получении продукта на поле отделение ее от растения невозможно. В устройствах по подготовке семян дикорастущих трав необходимо предусматривать как устройства по предупреждению уноса семян, так и не допускать их переувлажнения в нижних слоях конструкции.

Анализ существующих решений сушильных установок показал, что ни одна из них не удовлетворяет требованиям.

При выборе и создании сушильной установки важно учитывать ряд факторов:

- тепловая нагрузка аппарата;
- температурные условия процесса;
- условия сушки;
- физико-механические параметры рабочих сред;
- характер гидравлических соединений;
- вид материала и его коррозионную стойкость;
- компактность и простоту устройства;
- расположение аппарата;
- взаимное направление движения рабочих сред;
- возможность очистки поверхности от загрязнений;

- расход металла на единицу переданной теплоты;

- другие технико-экономические показатели;

При использовании аналогичных установок для заготовления сельскохозяйственного корма используют системы активного вентилирования, работающие на подогретом воздухе.

Необходимость снижения расхода энергии связана с разработкой рекомендаций по оптимальным термовлажностным параметрам воздуха, выбору способов подогрева воздуха в калорифере, снижению расхода сушильного агента.

Для сушки травы больше всего подходят камеры конвективного типа, использующие в качестве теплоносителя нагретый воздух, изменяя температуру которого можно значительно увеличить производительность.

В основу проектирования конструкции конвективной сушильной установки была положена передвижная сушилка Alvan Blanch, которая предназначена для зерна, и модель сушилки, изображенной на Рис.3.

Процесс сушки происходит следующим образом: сверху в загрузочный бункер засыпается влажная трава, заслонки распределяют ее по ширине сита равномерным слоем, его толщина регулируется в зависимости от влажности зерна. Нагретый воздух поступает в сушильную камеру, обдувая продукт со всех сторон. В процессе сушки под действием вибраций при передвижении сушилки по полю, семена сквозь сито падают на поддон, расположенный под ним.

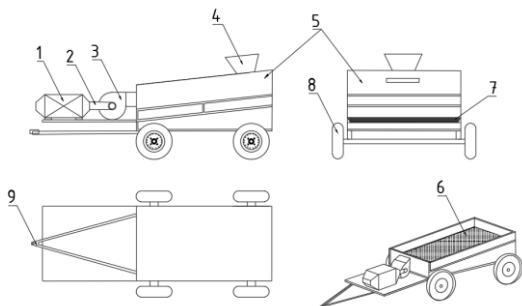


Рис.3. Конструкция передвижной конвективной сушильной установки. 1 – калорифер; 2 – газоход; 3 – центробежный вентилятор; 4 – загрузочный бункер; 5 – металлическая крышка; 6 – сито; 7 – поддон для семян; 8 – опорные колеса; 9 – тягово-сцепное устройство.

Благодаря наличию колес у сушильной установки процесс сушки начинается сразу после сбора травы, непосредственно на сельскохозяйственном поле. Теплота уходящих газов автомобиля используется для подогрева воздуха, который идет в сушильную камеру, если погода в дни сбора семенной травы характеризуется высокой влажностью и низкой температурой. Но при работе в помещении сушильная камера использует воздух, нагреваемый в калорифере.

В качестве стационарного решения оптимальным вариантом для решения этой задачи можно предложить бункерную сушильную установку активного вентилирования.

Данная установка обеспечивает мягкий тепловой режим сушки, сохранение биологической жизнеспособности зерна, поточную обработку материалов за один проход до кондиции, независимо от исходной влажности материала. Сущность конструкции (Рис. 4) состоит в следующем: бункер состоит из металлического корпуса цилиндрической формы, металлической конусообразной съемной крышки, которая крепится при помощи болтового соединения, открывающегося люка для загрузки травы. Система подвода агента сушки состоит из теплообменного аппарата для нагрева воздуха, нагнетателя, в качестве которого выбран вентилятор для подачи воздуха в воздуховод, элементы которого соединены фланцевыми соединениями. По воздуховодам воздух направляется в перфорированную трубу, которая распределяет воздух по всему бункеру. В нижней части цилиндрической конструкции установлена решетка, которая задерживает продукт сушки, не позволяя траве высыпаться в поддон для сбора семян. Проходя сквозь решетку, семена падают в сито, что позволяет нам отделить продукт сушки от нежелательной травы малых размеров. Пройдя сквозь отверстия в сито, семена высыпаются в бак для сбора готового высушенного материала.

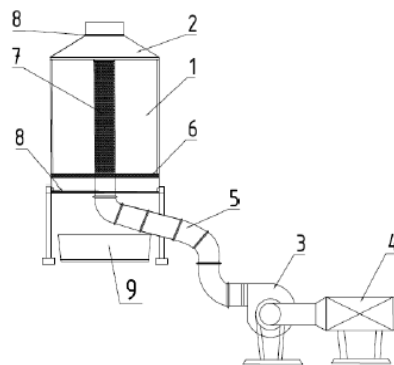


Рис.4. Конструкция камерной конвективной сушильной установки периодического действия. 1 – цилиндрический корпус; 2 – съемная крышка; 3 – вентилятор; 4 – калорифер; 5 – воздуховод; 6 – решетка; 7 – перфорированная труба; 8 – сито; 9 – поддон для сбора семян.

Свежесобранная трава загружается в съемную крышу, далее заполняет полностью цилиндрический корпус сушильной установки, опускаясь до решетки, диаметр которой совпадает с диаметром цилиндрического корпуса. После заполнения бункера надевается крыша и плотно прикручивается болтами к корпусу. Включается нагнетательное и подогревательное оборудование. Теплообменный аппарат подает нагретый воздух в вентилятор, откуда по воздуховодам круглого сечения, элементы которого соединены при помощи фланцевых соединений, воздух направляется вверх до решетки. Пройдя через решетку, воздуховод соединяется с перфорированной трубой, которая расположена по всей высоте цилиндрического корпуса. Нагретый воздух заполняет все пространство трубы, просачиваясь сквозь отверстия, он заполняет весь объем бункера. Это необходимо для того, чтобы обеспе-

чить наибольшую равномерность распределения воздуха по всему объему корпуса цилиндрического корпуса сушильной установки. Высохшая трава задерживается на решетке, а семена опадая с травы и проходя сквозь отверстия в сито, расположенном в основании цилиндрического корпуса, падают в бак для приема семян. После сушки, теплообменный аппарат и вентилятор выключаются, и обработанная трава выгружается из сушилки, посредством сема решетки и сита через нижнее днище.

3.ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены опытные зависимости изотерм равновесного сорбционного влагосодержания трех видов растений дикорастущей травы при 20 °С.

Для относительной влажности воздуха 50% значения равновесного влагосодержания семян растений 1, 3 по отношению к растению 2 меньше на 3% и 88% соответственно, для 90 % влажности воздуха на 14% и 90,6%. Равновесное влагосодержание смесей растения 3 при 50% и при 90% влажности воздуха больше на 3% и 14 % относительно растения 2. Определены параметры капиллярно-пористой структуры объекта сушки с помощью уравнения БЭТ. Для смесей растений 2 и 3 суммарный объем пор и удельная поверхность твердого вещества отличаются на 3,7% и 2,5% по отношению к растению 2 соответственно. Для семян растений 1, 3 по отношению к растению 2 суммарный объем пор отличается на 10% и 89%, удельная поверхность твердого вещества отличается на 14,6% и 90% соответственно.

Исходя из обработанных данных сделаны выводы о необходимости учета данных, полученных при обработке изотерм сорбции при увеличении объемов производства семян. Проанализированы размеры исследованных семян и их принадлежность к разным группам по морфологическим признакам. Анализ капиллярно-пористой структуры и сорбционных свойств исследованных растений позволяет сделать вывод, что на продолжительность процесса сушки оказывает влияние не столько размеры семян и принадлежность растения к разным группам по морфологическим признакам, сколько содержание внутри объектов сушки сходных питательных веществ и эфирных масел.

Выявлены зависимости достижения равновесной влажности от состава образца. На основании технической информации из открытых источников о конструкциях конвективных сушильных установок были предложены новые схемные решения сушильных устройств, которые обеспечивают равномерное просушивание материала и сохранение биологических свойств продукта при относительной простоте устройства для индивидуальных хозяйств. На основании фактических параметров воздуха с 9.07.2020-15.07.2020 в г. Котбус произведен расчет конвективной сушильной установки, определены параметры состояния газозадушной смеси. Составлены материальный и тепловой балансы конвективной

сушильной камеры, при сушке материала от начальной влажности 60% до конечной влажности 10 % определен расход сушильного агента. Значения варьируются от 108,69 кг/ч при относительной влажности воздуха 35% и температуре воздуха 24⁰С до 235 кг/ч при относительной влажности воздуха 66%, температуре воздуха 17%. Уменьшение начальной влажности материала, при неизменных значениях параметров воздуха, приводит к снижению расхода сушильного агента на 35 %.

Увеличение температуры наружного воздуха, при неизменном значении влажности материала, поступающего на сушку, приводит к уменьшению расхода сушильного агента на 27 %.

Уменьшение относительной влажности наружного воздуха, при неизменном значении влажности материала, поступающего на сушку, приводит к уменьшению расхода сушильного агента на 23 %.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

W_p – равновесное влагосодержание материала, %;
 ϕ – относительная влажность воздуха, %;
 a_0, a_2, a_3, a_4, a_5 – коэффициенты уравнения, зависящие от материала и температуры;
 x – количество сорбированного вещества, г/г;
 x_m – количества вещества в сплошном моно молекулярном слое, г/г;
 C – постоянная, представляющая отношение времени жизни молекул в первом слое и жидкости соответственно;
 M – молекулярная масса адсорбата, г/моль;
 N_A – число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$ моль⁻¹);
 A_m – площадь поперечного сечения молекул адсорбата, площадь которую адсорбированная молекула занимает на поверхности твердого тела в заполненном монослое, м²;
 W_0 – суммарный объем пор, см³/г;
 $S_{уд}$ – удельная поверхность твердого вещества, м²/г

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анисимова Л.В.** Анализ изотерм сорбции паров воды зерном гречихи и проса // Известия вузов/. Пищевая технология. 1997. №. 6. С. 49-51.
2. **Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Зуев Н.А.** Гигроскопические свойства семян // Химия и химическая технология. 2015.Т. 58, № 1.,С. 68-71.
3. **Tog̃rul H.; Arslan N.** Moisture Sorption Behaviour and Thermodynamic Characteristics of Rice stored in a Chamber under Controlled Humidity // Biosystems Engineering, 2006.Vol. 95, №. 2,P. 181–195.
4. **Назаров Г., Сафаров Ж.Э., Дадаев Г.Т.** Изучение капиллярно-пористой структуры лекарственных растений. // Тр. XXVI - научно- техн. конф. молодых ученых, магистрантов и студентов бакалавриата. Ташкент. 2017. С. 471-472.
5. **Soysal Y., Oztekin S.** Comparison of Seven Equilibrium Moisture Content Equations for some Medicinal and Aromatic Plants // Postharvest Technology, Vol. 78, № 1, 2000. P. 57-63.
6. **Броувер В., Штелин А.** Справочник по семеноведению сельскохозяйственных, лесных и декоративных культур с ключом для определения важнейших семян // Пер с нем. Москва: : Товарищество научных изданий КМК, 2010.С. 694.

А.А. Арбатский¹, В.С. Глазов², С.И. Поляков²

¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

²Лабораторный комплекс «Siber Cool»
ТПХ «Русклимат», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ УТИЛИЗАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию процесса тепловой утилизации для систем с промежуточным теплоносителем. Подобные системы актуальны для утилизации различных высоко- и низко-температурных тепловых выбросов на больших расстояниях от того места, куда требуется передать тепло, а также при недопустимости контакта горячего и холодного теплоносителей. Ранее были обозначены основные проблемы для подобных систем при утилизации теплоты влажного воздуха, а именно:

1) Потери при передаче тепла с помощью промежуточного теплоносителя;

2) Оптимизация температурного графика промежуточного теплоносителя, выполняется по выравниванию параметров рядности теплообменников на притоке и на вытяжке, что в большинстве случаев, приводит к отрицательным температурам промежуточного теплоносителя и как следствие периодического обмерзания теплообменника находящегося на вытяжке (особенно при высокой влажности вытяжного воздуха);

3) Эффективность всей системы зависит от эффективности калорифера как на приточной, так и на вытяжной системах.

В рамках данного исследования построена экспериментальная установка для исследования процесса обледенения теплообменников систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем. Произведен пробный запуск и определены тарифовочные характеристики данной установки. Произведен анализ требуемых параметров, при достижении которых будет достигнута максимальная эффективность системы.

Проведен ряд экспериментов которые позволили определить общую картину обледенения и понять распределение температур по поверхности теплообменника.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] была обозначена актуальность исследования процесса обледенения теплообменников, для систем тепловой утилизации. Были обозначены следующие основные задачи:

- Изучить механизм возникновения ледяной шубы на поверхностях теплообмена при взаимодействии с влажным воздухом;

- Определить инженерные методы борьбы с обмерзанием, для каждого типа теплообменного аппарата и проверить эффективность их работы;

- Разработать математическую модель роста ледяной шубы на поверхностях теплообмена, которая позволит варьировать ключевые параметры (геометрические и алгоритмические), определенных ранее, инженерных средств борьбы с обмерзанием;

Также обозначена основная цель исследования:

Разработка эффективной системы борьбы с обмерзанием, для теплообменников влажного воздуха, и повышения эффективности систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем.

В рамках решения поставленных задач ранее было сделано:

- Построена и опробована экспериментальная установка;

- Проведено расчетное исследование для определения оптимальных параметров теплоносителя для системы тепловой утилизации [2];

В рамках данной работы проведен ряд экспериментов по визуализации картины обледенения.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЛЕДЕНЕНИЯ

2.1. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Внешний вид установки представлен на рис. 2

Установка включает в состав все необходимые элементы, для создания температуры и влажности воздуха в диапазоне значений: 10-25 С, 30 – 70%, соответственно. Данный диапазон является характерным рабочим диапазоном температур и влажно-

стей, для вытяжной вентиляции большей части зданий и помещений [3].

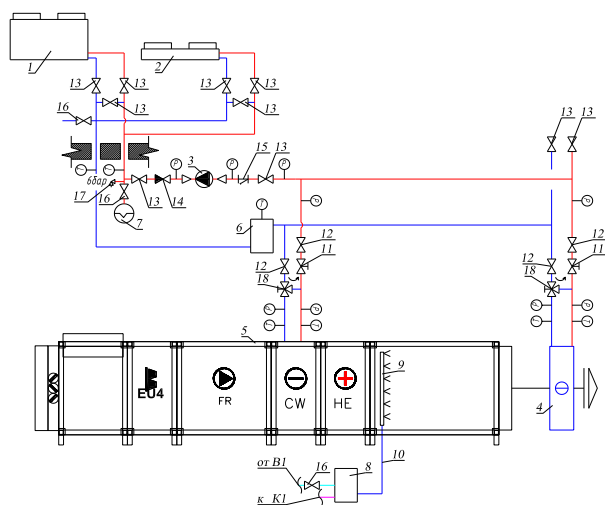


Рис. 1 Принципиальная схема экспериментальной установки. 1 – низкотемпературная холодильная машина; 2 – сухая градирня; 3 – насос; 4 – испытываемый образец; 5 – вентиляционная установка в составе: секция смешения; фильтр, вентилятор; водяной охладитель; электрический нагреватель; паровой увлажнитель; 6 – бак аккумулятор 4000 л.; 7 – расширительный бак; 8, 9 – паровой увлажнитель; 10 – 17 – запорно-регулирующая арматура; 18 – трехходовые вентили.



(а)



(б)

Рис. 2 Внешний вид испытательного стенда: а) – вентиляционная установка, б) – холодильная система.

Был произведен ряд пробных запусков установки, в результате которых были установлены настроечные характеристики 3-х ходовых регулирующих клапанов (поз. 18 на рис.1) и определены точные расходы теплоносителя на каждый теплообменник (в т.ч. и тестируемый образец).

В результате тарировки стенда получены значения расходов жидкости в зависимости от положения трехходового вентиля и балансировочного клапана, а также мощности теплообменников.

Таким образом на данном стенде могут быть испытаны образцы теплообменников размером до 1000x500, с максимальной мощностью до 15 кВт и расходом воздуха до 6000 м³/ч.

В дальнейшем планируется отработка алгоритмов управления системой защиты от замораживания теплообменников на вытяжной части одновременно с исследованием механизма образования наледи.

2.2. Качественная оценка

Для укрупненной, качественной оценки механизма возникновения ледяной «шубы» на поверхности теплообменника, использована классическая модель обтекания труб воздухом [3] (рис. 3).

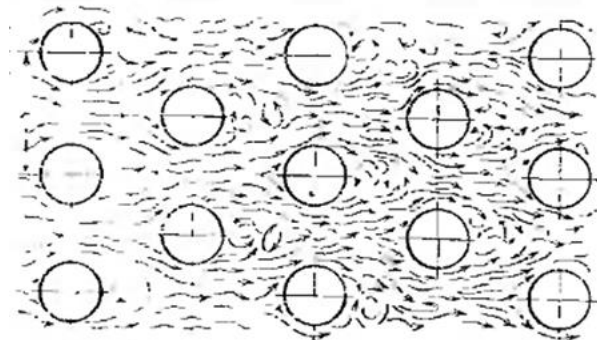


Рис. 3 Принципиальная визуализация обтекания шахматного пучка труб потоком воздуха согласно [4].

Предполагаем, что обледенение в первую очередь будет происходить на участках:

- С наибольшим расходом выпадающего конденсата;
- С наименьшей температурой теплоносителя;
- С наименьшей скоростью воздуха;

Таким образом, легко предположить, что рост ледяной «шубы» будет происходить на «задней» части трубок калорифера (так как за трубками образуются турбулентные вихри существенно снижающие скорость потока воздуха), в участках обозначенных на рис.4 (в подавляющем большинстве случаев используется противоточная схема движения теплоносителя).

Данный механизм впоследствии будет проверен экспериментально.

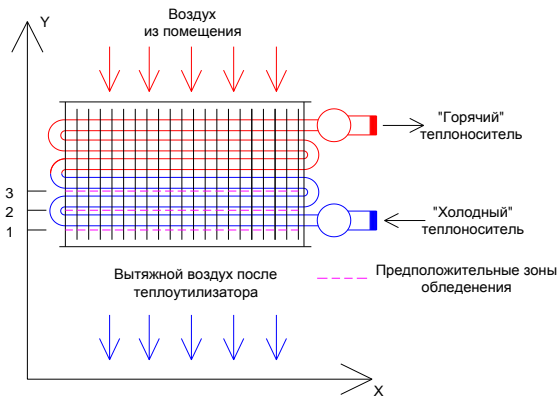


Рис. 4 Предположительные зоны роста обледенения.

2.3. Визуализация обледенения

В результате испытаний была получена следующая картина роста обледенения:



Рис. 5 Картина обледенения теплообменника при работе в течении 250 мин. (обледенение затронуло 80% поверхности).

Данная картина была получена при следующих параметрах воздуха и теплоносителя:

Таблица 1. Параметры воздуха и теплоносителя при обледенении 80% поверхности теплообменника (рис. 5)

Пар.	Наименование параметра	Разм.	Знач.
t_1'	Темп. воздуха на вх. в калорифер	°C	15,1
φ_1'	Отн. влажность возд. на вх. в калорифер	%	56,3
t_2''	Темп. воздуха на вых. из калорифера	°C	8,5
φ_2''	Отн. влажность воздуха на выходе из калорифера	%	67,5
t_2'	Темп. охлаждающей жидкости на входе в теплообменник	°C	-3,5
t_2''	Тем. охлаждающей жидкости на выходе из теплообменника	°C	-2,5
t_k	Темп. конденсата	°C	7,3

В качестве охлаждающей жидкости использовался 30% раствор пропилен-гликоля.

Обледенение происходило с краев теплообменника, в зонах с более низкой скоростью течения теплоносителя. При этом в зонах, где происходил полный отрыв капель конденсата образовывался «снег» (обледенение имело пористую структуру в виде отдельных образований см. рис.6), а в зонах, куда обильно стекал конденсат, образовывалась сплошная прозрачная наледь, что видно в нижней части теплообменника на рис. 5.



Рис. 6 Форма наледи в зоне отрыва капель.

После незначительного уменьшения подачи холодного теплоносителя (на 20%), обледенение начало существенно уменьшаться и полностью исчезло в течении 60 мин. При этом установились следующие параметры воздуха и охлаждающей жидкости:

Таблица 2. Параметры воздуха и теплоносителя после снятия обледенения

Пар.	Наименование параметра	Разм.	Знач.
t_1'	Температура воздуха на входе в калорифер	°C	13,6
φ_1'	Отн. влажность воздуха на вх. в калорифер	%	71,6
t_2''	Температура воздуха на выходе из калорифера	°C	7,0
φ_2''	Отн. влажность возд. на вых. из калорифера	%	79,5
t_2'	Темп. охл. жидкости на входе в теплообменник	°C	-3,0
t_2''	Температура охлаждающей жидкости на выходе из теплообменника	°C	-0,8
t_k	Температура конденсата	°C	6,9

Также из таблицы 2 можно заметить, что увеличилась температура конденсата (не смотря на незначительное уменьшение температуры входящего воздуха и уменьшение общего расхода конденсата). Это связано с прекращением обледенения (весь конденсат стал доходить до дренажного поддона).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены предварительные эксперименты, которые показали качественную картину обледенения, а также время обледенения и оттаивания при рассчитываемых, из экспериментальных данных, энергетических параметрах;

2. Получено предварительное подтверждение качественных предположений сделанных в работе [1], о времени роста обледенения исходя из анализа общего энергетического баланса;

3. Получено представление о структуре обледенения теплообменника в зависимости от характера выпадения конденсата и скорости течения теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.А. Арбатский, В.С. Глазов Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). II том Теплоэнергетика – Иваново ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» 2017. Том 2. – С. 320-326

2. Andrew Arbatskiy, Andrew Garyaev and Vasilii Glasov "Icing control model and algorithm for wasteheat exchangers of ventilation systems" MATEC Web of Conferences 194, 01004 (2018). Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Techno-logical Energy Equipment (HMTTSC-2018).

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401004>,
eISSN: 2261-236X

3. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика/Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. Н. Шиллера М.: Стройиздат, 1992.

4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1975 г.

А.А. Арбатский¹, А.В. Ладовский², С.И. Поляков²

¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

²Лабораторный комплекс «Siber Cool»
ТПХ «Русклимат», Россия

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена разработке универсального критерия оценки качества работы систем отопления. На данный момент системы отопления оценивают в основном по энергетической эффективности не уделяя, при этом, достаточно внимания качеству их работы в части обеспечения комфорта пользователя.

Речь идет о ряде факторов, по которым можно было бы оценить качество работы системы отопления и сведения их в единый коэффициент качества работы системы отопления.

В результате исследования разработана обобщающая математическая модель, которая позволяет оценить качество работы системы отопления.

1. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существуют уже устоявшиеся инженерные методы расчета различных систем отопления приведенные в [1], [2] и других источниках.

Последовательность расчета представляет из себя следующий набор действий:

- Расчет тепловых потерь по помещениям исходя из [3];
- Подбор отопительных приборов;
- Расстановка отопительных приборов исходя из требований [4];

Далее в зависимости от типа системы отопления (водяная или электрическая), идет расчет водяной или электрической сети питания отопительных приборов.

Однако в современных инженерных методиках совершенно не уделяется внимание качеству работы системы отопления, в части восприятия пользователем системы.

Задачей работы как раз была разработка универсального критерия качества работы отопительной системы для его дальнейшего апробирования на

различных системах отопления, для различных зданий.

2. РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Качество работы системы отопления предлагается определять исходя из следующих параметров:

Энергетическая эффективность согласно формуле:

$$E = \frac{E_{\text{сумм}}}{E_p} \quad (1)$$

Где:

E – коэффициент энергетической эффективности от 0 до 1;

E_p – реальные затраты энергии, за расчетный промежуток времени, для каждой системы отопления с учетом всех добавочных потерь энергии, Дж;

$E_{\text{сумм}}$ – расчетные затраты энергии на отопление за расчетный промежуток времени без учета дополнительных потерь при работе системы отопления, Дж.

Качество работы системы отопления можно определить следующими критериями, которые в большей или меньшей степени важны для всех пользователей:

- Равномерность распределения температуры по помещению;
- Время прогрева помещения (чем быстрее тем лучше для пользователя);
- Скорость реакции системы на регулирующее воздействие (чем быстрее тем лучше для пользователя);
- Разница между температурой отопительного прибора и температурой в помещении (чем меньше, тем комфортнее для пользователя);
- Соотношение лучистой и конвективной составляющих теплоотдачи отопительных приборов (чем больше конвективная составляющая по сравнению с лучистой, тем более качественно работает система отопления – передача теплоты излучением в большинстве случаев менее комфортна для потре-

бителя, за исключением специальных задач по целенаправленному нагреву поверхностей).

Таким образом качество работы системы отопления можно определить по формуле:

$$KO = k \frac{k_p}{\theta_{пр} * \theta_{изм} * \theta_{рег}} + n \frac{t_{пом}}{t_{макс.п}} + m \frac{Q_{сумм}}{Q_{изл}} \quad (2)$$

Где:

KO – коэффициент качества работы системы отопления (чем больше значение, тем лучше система с точки зрения пользователя);

k_p - коэффициент равномерности распределения температуры в помещении вычисляемый по формуле (7);

$\theta_{пр}$ - безразмерное время прогрева помещения от температуры на улице, до температуры в помещении после запуска системы;

$\theta_{изм}$ - безразмерная скорость колебания температуры при поддержании постоянной температуры;

$\theta_{рег}$ - безразмерное время выхода на рабочие параметры при ручном изменении температуры в помещении.

$t_{пом}$ - средняя температура поддерживаемая в помещении, С;

$t_{макс.п}$ - максимальная температура поверхности нагревательного прибора, С

$Q_{сумм}$ - суммарное количество теплоты передаваемое прибором, Вт;

$Q_{изл}$ - количество теплоты передаваемое излучением, Вт;

k, n, m – коэффициенты пропорциональности зависящие от типа и назначения помещения, размещения рабочей зоны помещения, геометрии помещения. Данные коэффициенты масштабируются по результатам исследований каждого помещения.

$$\theta_{пр} = \frac{\tau_{пр}}{\tau_{пр.и}}$$

$$\theta_{изм} = \frac{\tau_{изм}}{\tau_{изм.и}} \quad (3)$$

$$\theta_{рег} = \frac{\tau_{рег}}{\tau_{рег.и}}$$

Где:

$\tau_{пр}$ – реальное время прогрева помещения от температуры на улице, до температуры в помещении после запуска системы, с учетом инерционности самой системы отопления и строительных конструкций сек;

$\tau_{пр.и}$ – идеальное время прогрева помещения от температуры на улице, до температуры в помещении после запуска системы, без учета инерционности самой системы отопления и строительных конструкций сек;

$\tau_{изм}$ – реальная скорость колебания температуры при поддержании постоянной температуры, с поправкой на инерционность системы, град/сек;

$\tau_{изм.и}$ – условная идеальная скорость колебания температуры при поддержании постоянной температуры, град/сек;

$\tau_{рег}$ – реальная скорость колебания температуры при поддержании постоянной температуры, с поправкой на инерционность системы, град/сек;

$\tau_{рег.и}$ – условное идеальное время выхода на рабочие параметры при ручном изменении температуры в помещении, сек.

Идеальные величины находятся для конкретных помещений и систем на основании уравнений изменений параметров помещений и систем, в идеальных условиях:

$$\tau_{пр.и} = \frac{V_v * c_p * \rho * (t_p - t_0)}{(Q_{max} - Q_0)} \quad (4)$$

Где:

Q_{max} – максимально-возможная мощность отопительной системы, Вт;

Q_0 – расчетные тепловые потери, Вт;

V_v – общий объем всех нагреваемых помещений, м³;

c_p – удельная теплоемкость воздуха по средней температуре, Дж/(кгК);

ρ – плотность воздуха по средней температуре, кг/м³;

t_p – расчетная температура воздуха в помещениях, С;

t_0 – температура от которой начинается прогрев (уличная температура или температура поддерживаемая дежурным отоплением), С;

$$\tau_{изм.и} = \frac{\Delta Q_A}{V_v * c_p * \rho} \quad (5)$$

Где:

ΔQ_A – желательный шаг автоматической регулировки отопительной мощности, определяемый по таблице 1 (шаг автоматического подрегулирования обеспечивающий максимальную точность работы системы), Вт;

$$\tau_{рег.и} = \frac{V_v * c_p * \rho}{\Delta Q_p} \quad (6)$$

Где:

ΔQ_p - шаг ручной регулировки ручной мощности, определяемый по таблице 2 (отсутствие в формуле разницы температур в числителе объясняется тем, что изменение температуры принимается равным 1С для расчета идеальной величины), Вт.

Данные в таблицах 1 и 2 выведены из результатов натурных наблюдений за работой систем.

Таблица 1. Желательный шаг автоматической регулировки тепловой мощности

Тип системы	Желательный шаг автоматической регулировки мощности
Водяные радиаторы	$\Delta Q_A = 0,1 V_v c_{pв} \rho_{в} / n$
Электрические конвекторы	

Где:

V_v – объем воздуха в помещении, м³;

$c_{pв}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кгК);

n – количество отопительных приборов.

Фактически желательный шаг автоматической регулировки для любой системы обозначает мощность, необходимую для нагрева объема воздуха, обслуживаемого одним отопительным прибором на 0,1 С за 1 сек.

Таблица 2. Шаг ручной регулировки тепловой мощности

Тип системы	Компоновка системы	Шаг ручной регулировки мощности
Водяная система отопления с электрическим котлом	- Электрический котел со ступенчатой регулировкой	Мощность одной ступени электрического котла
	- Электрический котел со ступенчатой регулировкой - Термоголовки радиаторов	Половина мощности самого большого радиатора
Система на базе электрических конвекторов	- Конвекторы без регулировки мощности	Мощность самого маленького конвектора
	- Конвекторы со ступенчатым переключением мощностей	Одна ступень мощности одного конвектора минимальной мощности
	- Конвекторы с плавным управлением переключением ступеней мощности	Одна ступень мощности одного конвектора минимальной мощности

$$k_p = \frac{(t_{cp.o} - t_{min})}{(t_{max} - t_{cp.o})} \quad (7)$$

Где:

$t_{cp.o}$ – среднеобъемная температура в помещении, С;
 t_{max} – максимальная температура воздуха в помещении, С;

t_{min} – минимальная температура воздуха в помещении, С.

$$t_{cp.o} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (8)$$

Где:

t_i – средняя температура i -го объема помещения, С;
 V_i – величина объема, где производится измерение конкретной средней температуры, м³.

Таким образом, формула 2 является обобщающей математической моделью, с помощью которой можно объективно оценить качество той или иной системы отопления.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана обобщающая математическая модель оценки качества работы отопительных систем. Все параметры примененные в математической модели являются теоретически-рассчитываемыми, что позволяет применять эту модель при инженерном проектировании. Однако необходимы дальнейшие исследования с целью взаимного масштабирования слагаемых предложенной математической модели, и разработки алгоритмов расчета всех параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внутренние санитарно-технические устройства: Справочник проектировщика/Под ред. Н. Н. Павлова, Ю. Н. Шиллера М.: Стройиздат, 1992.
2. В.М. Свистунов, Н.К. Пушняков. «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства», 2-е издание, Санкт-Петербург, 2007 г.
3. СП 131.13330.2018 «Строительная климатология», 2018 г.
4. СП 60.13330.2016 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», 2016 г.

Д.В. Бекназарян¹, Г.Е. Каневец², К.В. Строгонов³

¹ГК «Вокэнергомаш», г. Нижний Новгород, Россия

²Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина

³Национальный исследовательский университет
«МЭИ», г. Москва, Россия

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

АННОТАЦИЯ

При сооружении современных ванн пламенных стекловаренных печей применяют стеклостойкие огнеупорные материалы высокого качества и разнообразные теплоизоляционные материалы, которые komponуют в многослойные теплоизоляционные панели, снижая тепловые потери. Однако повышение температуры стеновых брусьев при наложении тепловой изоляции резко снижает срок их службы из-за высокотемпературной физико-химической коррозии. Такое противоречие и широкая номенклатура теплоизоляционных изделий, а так же различные режимы варки стекломассы и интенсивности принудительного охлаждения наружной боковой поверхности печи требует выбора оптимального набора теплоизоляционных материалов при выбранных условиях работы печи для обеспечения максимальной длительности работы агрегата с максимальным коэффициентом полезного действия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс изготовления стекломассы является сложным физико-химическим процессом, в реализации которого задействовано большое количество сложного, дорогостоящего теплообменного, динамического, энергетического оборудования. Главной энерготехнологической установкой в подавляющем большинстве случаев, благодаря высокой производительности (до 400 тонн стекломассы в сутки), является ванная пламенная стекловаренная печь. Данный агрегат обладает достаточно низким коэффициентом полезного действия (лучшие показатели находятся на уровне 60 %), что увеличивает требования к эффективности протекания технологического процесса. Наиболее очевидным способом уменьшения затратной части теплового баланса существующих печей, является снижение тепловых потерь. Из-за большой площади контакта с окружающей средой разогретых в процессе работы огнеупорных материалов ограждения печи (дно, стены, свод), теряется значительное количество тепла (с каждого квадратного метра от 1,3 до 5,6кВт) [1]. Меньшие значения соответствуют своду и дну печи, большие продольным стенам варочного бассейна. Воздействие высоких температур в зоне варки разрушительно влияет на стеновые огнеупорные

брусья (в области пламенного пространства порядка 1580-1600°C, в зоне расплава стекломассы 1480-1520°C), кроме того брусья подвержены абразивному износу шихтовыми материалами в зоне загрузки. Перечисленные факторы зачастую определяют срок работы огнеупорных материалов стен бассейна.

2. АКТУАЛЬНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В качестве объекта исследования выбрана ванная стекловаренная печь непрерывного действия по конструкции аналогичная [2, 3] В таблице 1 приведены основные геометрические параметры рассматриваемого агрегата.

В ряду статей потерь тепловой энергии в процессе эксплуатации стекловаренной печи, потери через боковые ограждения занимают третью позицию по величине после потерь тепла с уходящими газами и вырабатываемой стекломассой, что вызывает необходимость искать пути сокращения данной статьи потерь при сохранении качества технологического процесса, ориентируясь на максимальное продление срока службы печи до холодного ремонта. Снижение теплоты с вырабатываемой стекломассой не возможно, а снижение теплоты через ограждение приведёт к снижению тепловых потерь с уходящими газами. Обширные экспериментальные данные, посвящённые вопросам стойкости огнеупорных брусьев и теплообмену в системе расплав стекломассы–огнеупорный брус–внешняя среда приведены ещё в середине прошлого столетия в работах Захарикова Н.А. [4, 5]. Однако в современных печах, по сравнению с указанными работами, широко применяется тепловая изоляция бокового ограждения из-за появления огнеупорных материалов, более стойких к воздействию расплава стекломассы.

В таблице 1 приведены основные технологические параметры печи и статьи теплового баланса печи. Методика расчёта статей прихода и расхода тепла в тепловом балансе стекловаренной печи приведена в работах [6, 7].

Таблица 1. Геометрические и основные технологические параметры печи

№ п.п	Наименование	Значения, мм
1	Высота от уровня пода до пятового кирпича	2550
2	Длина варочного бассейна	13750
3	Ширина варочного бассейна	8600
4	Толщина огнеупорного бруса – зона варки – зона пламенного пространства	250 200
5	Минимальная остаточная толщина огнеупорного бруса в момент останова печи	40
6	Высота зоны обдува	400
7	Высота расположения соплового аппарата	1350
8	Толщина пристенногозаохлажденногослоя расплава стекломассы (температура которого несколько ниже температуры расплава вдали от ограждения бассейна)	50
9	Секундный расход топлива, мЗ/с	0,366
10	Расход воздуха на горение, мЗ/мЗ	9,27
11	Коэффициент избытка воздуха	1,1
12	Производительность печи, кг/с	3,241

Уравнение теплового баланса в общем случае технологического продукта (кДж/кг или кВт), оно удобнее составлять в килоджоулях на килограмм имеет вид [8]:

$$Q_{х.т} + Q_{ф.т} + Q_{ок} + Q_{т.м} = Q_{т.п} + Q_{о.г} + Q_{н.г} + Q_{о.с} + Q_{неучт}$$

Таблица 2. Статьи теплового баланса исследуемой ванной стекловаренной печи

Название статьи прихода	кВт	%	Название статьи расхода	кВт	%
Химическая энергия топлива, $Q_{х.т}$	12888,29	64,01	Теплота технологического продукта, $Q_{т.п}$	7376,83	36,63
Теплота топлива, $Q_{ф.т}$	12,09	0,06	Теплота отходящих газов, $Q_{о.г}$	9973,70	49,53
Теплота окислителя, $Q_{ок}$	7097,05	35,24	Потери теплоты от неполноты сгорания, $Q_{н.г}$: химический недожог, $Q_{х.н}$ механический недожог, $Q_{ф.н}$	257,77 257,77 0	1,28
Теплота исходных технологических материалов, $Q_{т.м}$	139,83	0,69	Потери теплоты в окружающую среду, $Q_{о.с}$: теплопроводностью через обмуровку, $Q_{о.с}^т$ излучением через отверстия, окна, $Q_{о.с}^л$ Неучтённые потери $Q_{неучт}$	1524,7 1042,72 481,98 1004,26	7,57 4,99
Итого	20137,26	100	Итого	20137,26	100

Коррозия огнеупорных брусьев продольных стен в зонах загрузки и варки в значительной степени увеличивают величину тепловых потерь через ограждения печи, вследствие уменьшения толщины огнеупорных брусьев до минимальных значений, при которых возможна безаварийная эксплуатация объекта (остаточная толщина брусьев составляет порядка 40 мм). Следовательно, расчёт скорости коррозии огнеупорного бруса высокотемпературным расплавом стекломассы, и как следствие расчёт динамики увеличения тепловых потерь являются важными компонентами при составлении теплового баланса агрегата. Расчёт скорости коррозии огнеупорных брусьев бокового ограждения печи выполнялся в соответствии с методикой, изложенной в работе [9].

Важным составляющим ограждения печи, является высокоэффективная тепловая изоляция [10], а так же способ охлаждения наружной поверхности

бассейна [11-13] для предотвращения преждевременного коррозионного износа огнеупорных брусьев, которые контактируют с расплавом стекломассы.

Имея в наличии совокупность данных о геометрических параметрах, режимах работы печи, скорости коррозии огнеупорных брусьев высокотемпературным расплавом стекломассы, представляется возможным выполнять оптимизацию многослойной теплоизоляционной конструкции стекловаренной печи (ТКСП), что позволит минимизировать тепловые потери в окружающую среду через такие ограждения при максимальной длительности кампании (продолжительности работы) печи.

Оптимизация является одним из основных инструментов повышения эффективности энерготехнологических установок и оборудования [14].

На рис. 1 показаны этапы жизненного цикла оборудования [15].

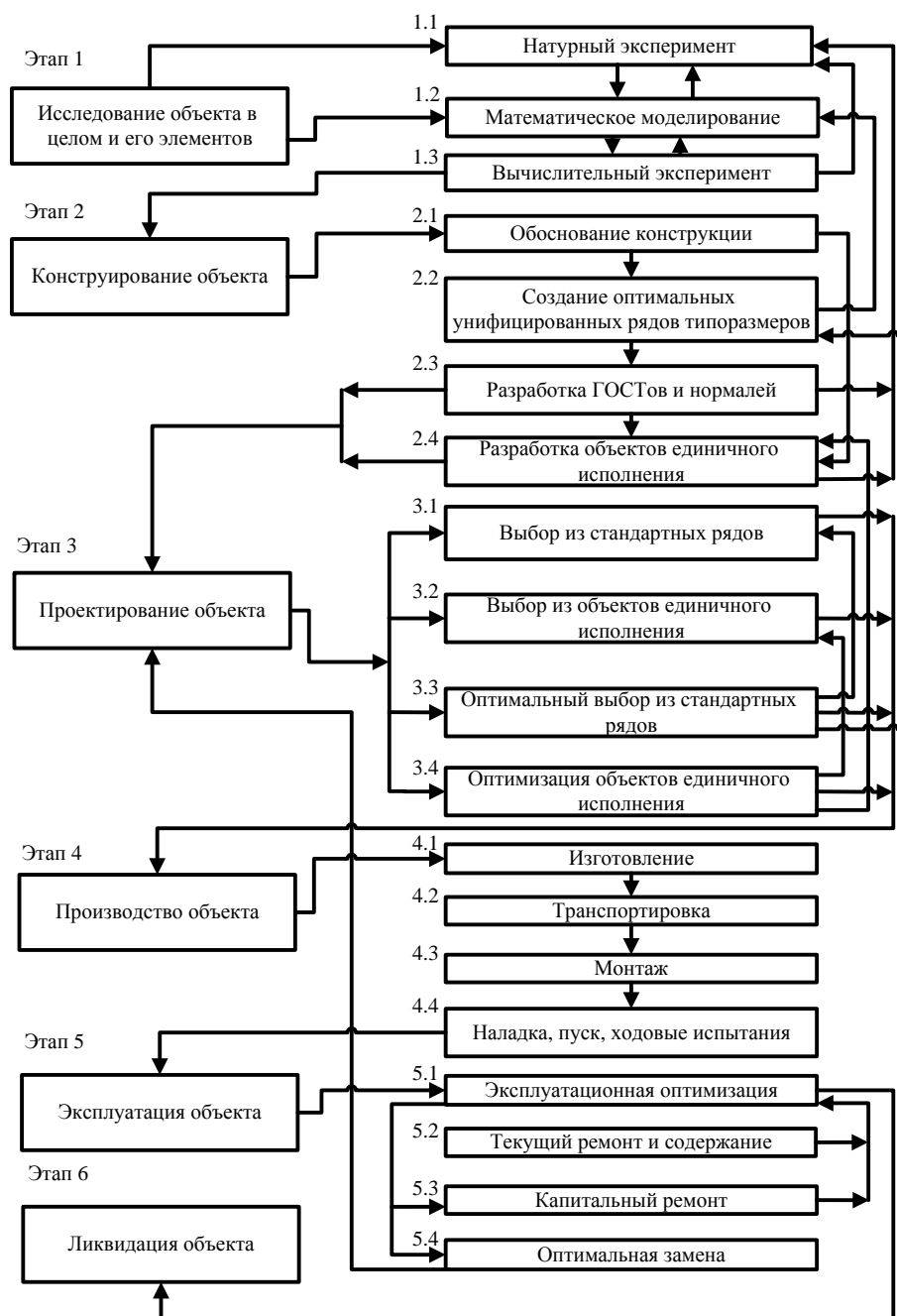


Рис.1 Основные этапы «жизненного» цикла систем (установок) и их элементов (оборудования).

Оптимизация элементов теплоизоляционных конструкций стекловаренных печей, которые представляют собой элемент ограждения, применяется на двух основных этапах жизненного цикла ТКСП:

1) при проектной оптимизации новых ТКСП (этап 3);

2) при оптимальной замене изношенных ТКСП (этап 5.4) в процессе их эксплуатации.

Согласно рис. 1, при проведении этих видов оптимизации при формировании критерия эффективности, по которому проводится оценка оптимума ТКСП, должны учитываться все экономические затраты на основных этапах жизненного цикла, а именно: исследование (этап 1), конструирование (этап 2), проектирование (этап 3), производство

(этап 4), эксплуатация (этап 5) и ликвидация (этап 6) ТКСП.

Факты, характеризующие актуальность оптимизации ТКСП, изложены далее.

3. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В области химических технологий и энерготехнологий интерес к вычислительному эксперименту проявлялся уже в последней трети XX века [15, 16, 19–21, 24]. Однако в то время его реализация существенно ограничивалась возможностями вычислительной техники.

В настоящее время вычислительный эксперимент широко применяется в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также в проектировании производственных объектов, в том числе энерготехнологических [14, 17, 18, 22, 24, 25].

Вычислительный эксперимент в более *широком*, производственном *смысле* – новая технология комплекса работ по созданию и функционированию объекта на всех или основных этапах его жизненного цикла.

Вычислительный эксперимент в *узком смысле* – создание математических моделей исследуемого объекта и последующее изучение этого объекта с помощью средств вычислительной техники. Его основой является триада «математическая модель объекта – моделирующий алгоритм – программа расчёта на ЭВМ».

Примером его является оптимизационный вычислительный эксперимент (ОВЭ), который эффективно применяют в процессе создания и развития более эффективных сложных систем различной природы (технических, экономических, социальных, политических и других систем).

Особенности ОВЭ.

1. Главной особенностью ОВЭ является использование фундаментальных, системных математических моделей, в основу которых положены результаты многочисленных и разносторонних натуральных экспериментов и теоретических исследований из разных областей знаний (например, техники, математики, физики, химии, экономики и др.). Это позволяет рассчитывать множество значащих, в том числе комплексных, характеристик сложных объектов, прогнозировать их многофакторное поведение и, соответственно, выбирать наилучший вариант объектов из множества возможных.

2. Вычислительный эксперимент позволяет выявить степень влияния погрешности исходных данных и элементов математической модели объекта на погрешность нахождения исследуемых характеристик объекта. Это позволяет более точно конкретизировать требования к постановке новых натуральных экспериментов и к корректировке, развитию фундаментальных, системных математических моделей.

3. При проведении ОВЭ резко снижается стоимость разработок и существенно экономится время. Это обеспечивается

- многовариантностью расчётов,
- возможностью более точной технико-экономической либо другой оценки этих вариантов и выбора лучшего из них,
- простотой модификации математических моделей для других объектов исследования и условий их функционирования,
- упрощением и автоматизацией разработки математических моделей объектов на базе обобщённого структурно-модульного подхода.

4. Вычислительный эксперимент может проводиться тогда, когда натуральный эксперимент либо невозможен, либо дорогостоящий. Он применяется, например

- при создании таких крупных технических систем, как магистральные газопроводы, ГЭС;
- при прогнозировании последствий таких нежелательных явлений, как взрыв атомного реактора или атомной бомбы;
- при прогнозировании последствий смены в стране социально-экономической формации и многих других случаях.

В [14] выделено шесть основных этапов, шесть составных частей ОВЭ:

1. Выбор либо разработка критерия эффективности объекта.
2. Формирование либо создание математической модели объекта.
3. Выбор либо разработка метода поиска экстремума критерия эффективности.
4. Выбор, разработка или синтез алгоритма и программы оптимизации объекта.
5. Проведение первой части оптимизационного вычислительного эксперимента: оптимизирующие компьютерные расчёты.
6. Проведение второй части оптимизационного вычислительного эксперимента: обработка результатов оптимизации, их анализ и формирование выводов.

4. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Инструментом оптимизации теплоизоляционных конструкций стекловаренных печей является ОВЭ.

Применительно к нашей задаче для проведения ОВЭ требуется разработать и реализовать следующее:

1. Критерии эффективности ТКСП.
2. Математические модели ТКСП.
3. Методы поиска экстремума при оптимизации ТКСП.
4. Алгоритм проектной оптимизации ТКСП (алгоритм ПО-ТКСП).
5. Программу проектной оптимизации ТКСП (программу ПО-ТКСП).
6. Методические основы вычислительного эксперимента при проектной оптимизации нового и оптимальной замене изношенных ТКСП.
7. Проведение ОВЭ с целью прогнозирования развития ТКСП на основе оптимизационного вычислительного эксперимента в ближайшей и дальней перспективе.

Особенностью реализации математической модели ТКСП является большое время счёта любого одного варианта ТКСП, необходимое для обеспечения требуемой точности расчёта, а также большая

размерность оптимизационной задачи. При этом применение известных прямых и декомпозиционных методов, а также методов оптимизации многофакторных задач становится затруднительным или даже невозможным.

В этой ситуации, по нашему мнению, возникшие проблемы могут быть решены при применении нового феноменологического эвристико-эволюционного подхода (ФЭЭП) Каневца Г.Е. [14, 17 – 19, 22, 23] при оптимизации сложных систем, относящегося к классу эволюционных методов оптимизации.

Идеология феноменологического эвристико-эволюционного подхода сформулирована в 70-тых годах XX века академиком Каневцом Г.Е. и впервые реализована им, его учеником профессором Берлиным М.А. и их сотрудниками во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте ВНИПИГазпереработка при создании и функционировании отраслевой системы автоматизированного проектирования оптимальных газоперерабатывающих (газобензиновых) заводов. Такие оптимальные заводы спроектированы, построены и работают в Тюменском регионе, Поволжье и других районах России, а также в странах Ближнего Востока. В дальнейшем феноменологический подход использовался в различных отраслях производства.

Нами обобщённая схема реализации ФЭЭП была трансформирована с учётом особенностей решаемой у нас задачи.

В этом методе применяются следующие основные эвристико-эволюционные процедуры:

1. Выбираются некоторый исходный режим работы рассматриваемой системы, исходя из опыта и интуиции расчётчика.

2. С помощью алгоритма синтеза топологии сложных схем формируется матрица смежности топологии ЭТС с проверкой её реальности.

3. Производится расчет теплового состояния ТКСП.

4. При этих режимных параметрах оптимизируются элементы системы. В простых случаях используются прямые методы поиска экстремума, при большой сложности и размере оптимизационной задачи – поэлементные эвристико-эволюционные процедуры.

5. Проводится технико-экономический анализ системы. Устанавливаются элементы, вносящие наиболее весомый вклад в критерий эффективности системы.

6. Для уменьшения «веса» этих элементов в критерии эффективности системы используются режимные и конструктивные технико-экономические и другие эвристики, с помощью которых изменяется режим работы и характеристики ТКСП с целью улучшения её критерия эффективности.

Таким образом, обеспечивается эволюция, режимов и оборудования к оптимуму.

7. Расчет повторяется с пункта 3.

Таким образом, при реализации феноменологического эвристико-эволюционного подхода разрабатываются четыре подсистемы составляющих процесса оптимизации ТКСП:

1. Подсистема формирования режимов (ПФР).

2. Подсистема эвристико-эволюционной оптимизации объекта (ПЭЭО).

3. Подсистема сервиса (ПС).

4. Подсистема информационного обеспечения (ПИО) включающая в себя базы данных.

Подсистемы ПФР, ПЭЭО, ПС, ПИО в принципе инвариантны относительно метода поиска экстремума (метода оптимизации) и поэтому могут применяться при использовании других методов оптимизации сложных ЭТС.

При этом подсистема ПЭЭО служит лишь для ограничения области поиска технико-экономического оптимума и поэтому может отсутствовать.

Обобщенная функциональная схема сохраняет свою целостность и лишь изменяет качество.

Для формирования структуры методического, информационного и программного обеспечения комплексной оптимизации [14] ограждения стекловаренной печи (объекта) необходимо реализовать следующие 19 этапов работ (рис. 2): 1. Создать системные классификации объектов расчета и оптимизации (схем ЭТС, режимных параметров, основных видов оборудования, объектов рутинного проектирования).

2. Создать системные классификации видов расчета объектов с установлением иерархии этих расчетов.

3. Создать идеологию комплексной оптимизации объекта (КОО).

4. Разработать обобщенные структуры формирования режимов.

5. Сформировать базу данных о теплофизических свойствах веществ.

6. Разработать общие (унифицированные) и специфические модули расчета процессов массопереноса, теплопередачи, теплоотдачи, гидромеханики, конструкторских, экономических, сервисных расчетов, как элементы обобщенных структур расчета основных видов оборудования. 7. Установить иерархию всего комплекса обобщенных структур, расчетных модулей и алгоритмов.

8. Разработать алгоритмы генерации режимов. Сформировать базу данных о режимах.

9. Разработать алгоритмы расчета и технико-экономической оптимизации основных видов оборудования. Сформировать базы данных об оборудовании и экономических показателях.

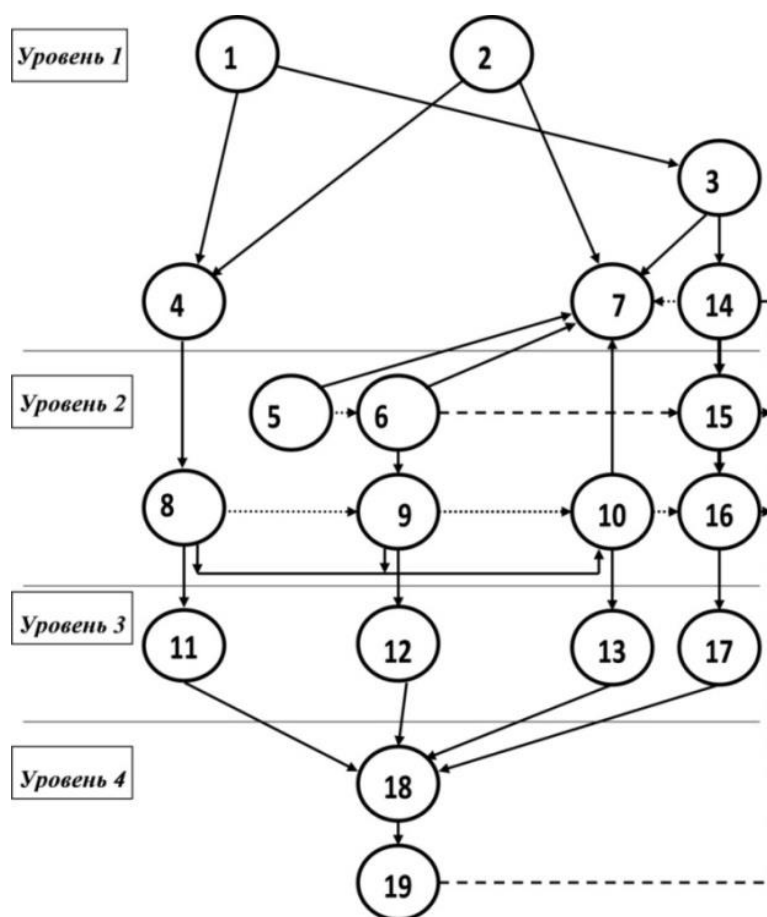


Рис. 2. Структура синтеза методического, информационного и программного обеспечения комплексной оптимизации режимов сложных технических систем при фиксации их топологии.

Уровень 1 – системный анализ; Уровень 2 – математическое моделирование; Уровень 3 – программирование; Уровень 4 – расчётно-теоретический анализ.

10. Разработать методы и алгоритмы уточненной, технико-экономической оптимизации на всех уровнях

11–13. Провести программирование алгоритмов, перечисленных в пунктах 8–10.

14–17. Разработать комплексное обеспечение для эквивалентирования математических моделей и алгоритмов: обобщенные алгоритмы и программы эквивалентирования (14); эквивалентированные модели и расчетные модули (15); эквивалентированные алгоритмы КОО (16); программы соответственно эквивалентированным алгоритмам (17).

18. Провести комплекс оптимизирующих расчетов на ЭВМ.

19. Провести расчётно-теоретический анализ результатов расчетов и разработать рекомендации по развитию методической основы комплексной оптимизации энергетической системы КОЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные понятия и принципы оптимизации. Приведено обоснование применения оптимизационного вычислительного эксперимента и феноменологического эвристико-эволюционного подхода при оптимизации теплоизоляционных конструкций высокопроизводительных ванн пламенных стекловаренных печей. Составлен тепловой

баланс стекловаренной печи в случае применения оптимального варианта ТКСП. Применение указанного метода для оптимизации ТКСП стекловаренных печей позволяет продлить срок работы бокового ограждения печи, при минимальных тепловых потерях в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзюзер, В.Я. Проектирование энергоэффективных стеклотарных печей / В.Я. Дзюзер / Стекло и керамика.– 2008.– №9. – С. 5–9.
2. Будов, В.М. Исследование работы крупногабаритной стекловаренной печи для выработки листового стекла / В.М. Будов // Стекло и керамика.–1970.– №1. – С. 7–10.
3. Будов, В.М. Стекловаренная печь для выработки листового стекла /В.М. Будов, Ю.В. Сескутов/ Стекло и керамика.–1965.– №1. – С. 3-7.
4. Захариков, Н.А. Теплопередача через стены бассейна стекловаренной печи /Н.А. Захариков, А.И. Рожанский//Стекло и керамика.–1965.– №3. – С. 1–9.
5. Захариков, Н.А. Теплообменные процессы в стекловаренных печах [Текст]. - Киев: ГостехиздатУССР, 1962. - 247 с.
6. Дзюзер, В.Я. Совершенствование методики расчёта теплового баланса регенеративной стекловаренной печи /В.Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – №4. – С. 22–27.
7. Дзюзер, В.Я. О граничных условиях внешней задачи теплообмена в стекловаренных печах /В.Я. Дзюзер, В.С.

- Швыдкий, Т.Е. Брылина, С.Е. Собянин// Вестник УГ-ТУ-УПИ. Строительство и образование: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УКТУ-УПИ, – 2007.– № 10. –С. 112–116.
8. **Перелётов, И.И.** Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: Учеб.для вузов/И.И. Перелётов, Л.А. Бровкин, Ю.И. Розенгарт и др.: Под редакцией А.Д. Ключникова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.: ил.
9. **Бекназарян, Д.В.** Алгоритм расчёта и исследование коррозионного износа боковых ограждений ванной стекловаренной печи / Д.В. Бекназарян, В.М. Кошельник, А.А. Ларин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2014.–№3/8.– С. 27 – 33.
10. **Дзюзер, В.Я.** Энергоэффективная структура тепловой изоляции стекловаренных печей /В.Я. Дзюзер, Е.А. Никифоров/ Огнеупоры и техническая керамика. – 2012. – №1-2. – С. 33–36.
11. **Шляховецкий, В.М.** Исследование факторов, определяющих эффективную работу воздушно-водоиспарительного охлаждения стекловаренных печей / В.М. Шляховецкий // Стекло и керамика. – 1984. – № 3. – С. 5–8.
12. **Минько, Н.И.** Испарительное охлаждение стекловаренных печей /Н.И. Минько, Ю.С. Зайцев, Н.Н. Зайцева, Р.Л. Билинский, Ю.М. Шаршнев// Стекло и керамика.– 2000.– №6. – С. 3–5.
13. **Дзюзер, В.Я.** Охлаждение окружки варочного бассейна стекловаренной печи/В.Я. Дзюзер// Стекло и керамика.–2009.– №8. – С. 13–16.
14. **Клименко А.П., Каневец Г.Е.** Расчёт теплообменных аппаратов на электронных вычислительных машинах.М.; Л.: Энергия, 1966. 272с.
15. **Каневец Г.Е.** Обобщенные методы расчета теплообменников. Киев: Наукова думка, 1979. 352 с.
16. **Kanewez G.** Berechnung von Wärmeübertragern. Berlin: Akademie-Ferlag, 1982. 328 p.
17. **Каневец Г.Е.** Теплообменники и теплообменные системы. Киев: Наукова думка, 1981. 272 с.
18. **Каневец Г.Е.,** Зайцев И.Д., Головач И.И. Введение в автоматизированное проектирование теплообменного оборудования. Киев: Наукова думка.– 1985. –232 с.
19. **Каневец Г.Е.,** Питерцев А.Г., Хуснуллин М.Х. Комплексная оптимизация теплообменных аппаратов. Киев: Ин-т кибернетики АН УССР, – 1972. – 260 с.
20. **Исаченко В.П.,** Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.;Л.: Энергия, – 1965. – 424 с.
21. **Кутателадзе С.С.,** Боршанский В.М. Справочник по теплопередаче. Л.; М.: Госэнергоиздат. 1959. 414 с.
22. **Левин Б.И.,** Шубин Е.П. Теплообменные аппараты систем теплоснабжения. М.; Л.: Энергия. 1965. 256 с.
23. **Якоб М.** Вопросы теплопередачи. Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы, –1960. –518 с.
24. **Кичигин М.В.,** Костенко Г.Н. Теплообменные аппараты и выпарные установки. М.; Л.: Госэнергоиздат. 1955. 392 с.
25. **Плановский А.Н.,** Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Гостоптехиздат, 1960. 552 с.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ РАЗВИВАЮЩЕМСЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ

АННОТАЦИЯ

Задача о теплообмене при пульсирующем квазистационарном течении в канале решена с использованием результатов расчета для стационарного течения. Данный метод применим при невысокой относительной частоте колебаний (для чисел Вомерсли меньше единицы). Решение системы стационарных уравнений движения, неразрывности и энергии на начальном участке плоского канала проведено методом конечных разностей с помощью итерационной неявной безусловно устойчивой схемы. Исследованы гидродинамические и тепловые характеристики развивающегося пульсирующего ламинарного течения в плоском канале. Представлены результаты расчетов продольной составляющей скорости, чисел Пуазейля, чисел Нуссельта, теплового потока, температуры жидкости в зависимости от относительной амплитуды колебания средней по сечению скорости A и безразмерной длины канала. Получено, что при значениях A , превышающих единицу, осредненные по периоду коэффициенты гидравлического сопротивления и сопротивления трения вблизи входа в канал значительно выше, чем эти величины при стационарном течении. Показано, что отношение среднего по периоду колебаний числа Нуссельта к его стационарному значению вблизи входа в канал $\overline{Nu} / Nu_s(X) \approx 1.15$ при $A = 5$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов гидродинамики и теплообмена при пульсирующем течении в каналах является важной теоретической и прикладной задачей. Например, применение пульсационного движения теплоносителя может быть способом повышения эффективности теплообменных аппаратов. С середины прошлого века оставался открытым вопрос о влиянии на теплоотдачу наложения пульсаций расхода; эта проблема изучалась как экспериментально, так и расчетно–теоретическим путем. Сведения о противоречивом характере указанного влияния получили объяснение лишь сравнительно недавно. Оказалось, что среднее по периоду колебаний число Нуссельта \overline{Nu} только для небольших относительных амплитуд колебаний расхода $A < 1$ практически не меняется по сравнению с его значением Nu_s при стационарном течении и может даже уменьшаться. Вблизи входа в обогреваемый участок канала наблюдается незначительный, до нескольких процентов, максимум отношения \overline{Nu} / Nu_s . Однако

этот максимум заметно возрастает с увеличением амплитуды колебаний $A > 1$.

Результаты, упомянутые выше, получены для гидродинамически стабилизированного течения. Представляет интерес провести подобные расчеты на начальном гидродинамическом участке. В [1], [2] предложен метод решения гидродинамической задачи, основанной на использовании результатов расчета для стационарного течения. В данной работе, кроме того, рассматривается и тепловые характеристики пульсирующего течения. Рассмотрен случай граничного условия первого рода $T_c = \text{const}$.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1. Основные уравнения

Значения гидродинамических величин для квазистационарного течения получены по данным для стационарного течения. Эти данные находятся в результате решения системы уравнений движения, неразрывности и энергии, записанных в приближении узкого канала:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \text{Po} + 4 \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2},$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0,$$

$$U \frac{\partial \vartheta}{\partial X} + V \frac{\partial \vartheta}{\partial Y} = \frac{4}{\text{Pr}} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial Y^2}.$$

Граничные условия имеют следующий вид. На входе задаются равномерные профили продольной скорости и температуры – $X = 0$: $U = \vartheta = 1$, $V = 0$. На стенке задается условие прилипания и непроницаемости, а также тепловое граничное условие первого рода $T_c = \text{const}$ – $Y = 0$: $U = V = \vartheta = 0$. На оси канала выполняется условие симметрии – $Y = 1$: $\partial U / \partial Y = \partial \vartheta / \partial Y = 0$.

При расчетах с амплитудами колебаний, превышающими единицу, в некоторой части периода возникает обратное течение. Полагается, что канал является достаточно длинным, чтобы на расчетном участке, прилегающем ко входу в канал, течение и теплообмен были стабилизированными.

Расчеты проведены методом конечных разностей. В результате расчета получены зависимости для ста-

ционарного течения $U_s(X, Y)$, $Ro_s(X)$, $Ro_{\tau_s}(X)$, $Nu_s(X)$, $Q_{cs}(X)$, $\Delta\vartheta_s(X)$. Для нахождения безразмерных касательного напряжения и плотности теплового потока на стенке использованы найденные в расчете профили скорости и температуры.

При получении значений гидродинамических величин для квазистационарного течения по данным для стационарного течения используется понятие квазистационарного режима. В этом режиме характеристики течения в каждый момент времени соответствуют значению числа Рейнольдса в этот момент. Для пульсирующего течения число Рейнольдса и средняя по сечению скорость меняются во времени по гармоническому закону

$$Re = \overline{Re}(1 + A \cos \omega t), \quad \langle U \rangle = 1 + A \cos \omega t.$$

В квазистационарном режиме справедливы следующие соотношения:

$$\frac{u}{\langle u \rangle(\omega t)} = U_s[X \langle U \rangle(\omega t), Y],$$

$$\vartheta = \frac{(T_c - T)}{(T_c - T_0)} = \vartheta_s[X \langle U \rangle(\omega t), Y].$$

Поэтому:

$$U(X, Y, \omega t) = \frac{u}{\langle u \rangle} =$$

$$= U_s[X \langle U \rangle(\omega t), Y] \langle U \rangle(\omega t),$$

$$Po_{\tau}(X, \omega t) = Po_{\tau_s}[X \langle U \rangle(\omega t)] \langle U \rangle(\omega t),$$

$$Po(X, \omega t) = Po_s[X \langle U \rangle(\omega t)] \langle U \rangle(\omega t),$$

$$Q_c(X, \omega t) = \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \frac{h}{(T_c - T_0)} = Q_{cs}[X \langle U \rangle(\omega t)],$$

$$\Delta\vartheta(X, \omega t) = \frac{T_c - T_{ж}}{T_c - T_0} = \Delta\vartheta_s[X \langle U \rangle(\omega t)],$$

$$Nu(X, \omega t) = \frac{Q_c}{\Delta\vartheta} = Nu_s[X \langle U \rangle(\omega t)].$$

Заметим, что безразмерный перепад температур стенки и жидкости $\Delta\vartheta$ является фактически безразмерной среднemasсовой температурой жидкости.

В приведенные выше соотношения входят числа Пуазейля Po_{τ} и Po , которые являются коэффициентами пропорциональности в зависимости от числа Рейнольдса коэффициентов сопротивления трения ξ^{τ} и гидравлического сопротивления ξ^p . Числа Po и Po_{τ} , также как и коэффициенты сопротивления, являются безразмерными градиентом давления и касательным напряжением на стенке

$$Po = - \frac{h^2}{\mu \langle u \rangle} \frac{dp}{dx}, \quad Po_{\tau} = \frac{4\tau_w h}{\mu \langle u \rangle}.$$

Для ламинарного течения $\xi^{\tau} = Po_{\tau} / Re$, $\xi^p = Po / Re$; значения Po_{τ} и Po определяются формой канала. Для стационарного развитого течения в плоском канале $Po_{\infty} = Po_{\infty} = 24$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 1 показано изменение во времени профиля продольной скорости для двух сечений: вблизи входа и на участке стабилизации. Представлены расчеты для двух амплитуд колебаний средней по сечению скорости – относительно малой и значительно превышающей единицу. Для обеих амплитуд вдали от входа за пределами участка гидродинамической стабилизации колебания являются гармоническими и соответствуют колебаниям средней по сечению скорости. Осредненный по периоду колебаний профиль скорости $\bar{U}(Y)$ совпадает с профилем скорости при стационарном течении $U_s(Y) = 1.5Y(2 - Y)$.

Вблизи входа колебания не являются гармоническими, но при малых A это практически незаметно. При $A < 1$ значение средней по периоду колебаний скорости около стенки незначительно отличается от значений при стационарном течении, а при $A > 1$ указанное отличие становится более заметным. В этом случае на малых расстояниях от входа развивающееся течение существует лишь в начальной фазе колебаний.

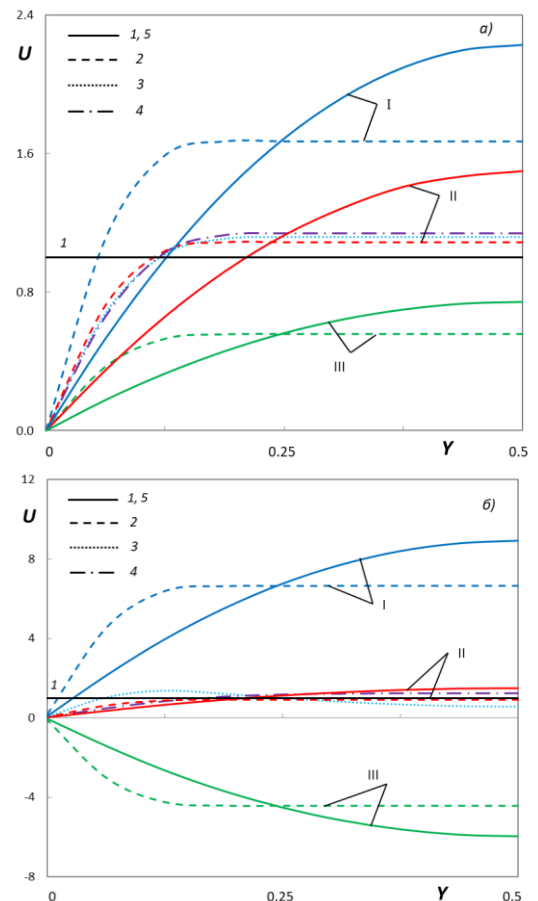


Рис. 1. Профили скорости. а) – $A=0.5$, б) – 5 . I – $X=0$ для $\langle \bar{u} \rangle \gg 0$; $X=0.00145$ (а), $X=0.00526$ (б): 2 – $U(\omega t)$, 3 – \bar{U} , 4 – U_s ; $X=0.075$ (а), $X=0.3$ (б): 5 – $U(\omega t)$; I – $\omega t = 0$, II – $\omega t = \pi/2$, III – $\omega t = \pi$.

На рис. 2 показано распределение числа Пуазейля Po_{τ} по длине канала. Максимальное значение

$Po_{\tau}(x)$ достигается в фазе максимума средней по сечению скорости (при $\omega t = 0$), а минимальное – в фазе минимума $\langle U \rangle$ (при $\omega t = \pi$). Среднее по периоду колебаний значение числа Пуазейля \overline{Po}_{τ} при $A < 1$ мало отличается от его значения при стационарном течении $Po_{\tau s}$. При $A > 1$ \overline{Po}_{τ} заметно выше $Po_{\tau s}$: приблизительно в два раза для $A = 5$. Число Пуазейля в фазе $\omega t = \pi/2$ близко к этому числу при стационарном течении (кривые 2 и 5 практически совпадают).

Расчеты показали, что изменение числа Пуазейля для давления и касательного напряжения качественно подобны, но для развивающегося течения значение $Po > Po_{\tau}$ благодаря вкладу в градиент давления конвективных членов уравнения движения. Для $A = 5$ вблизи входа в канал отношение $\overline{Po}/Po_s \approx 3.5$.

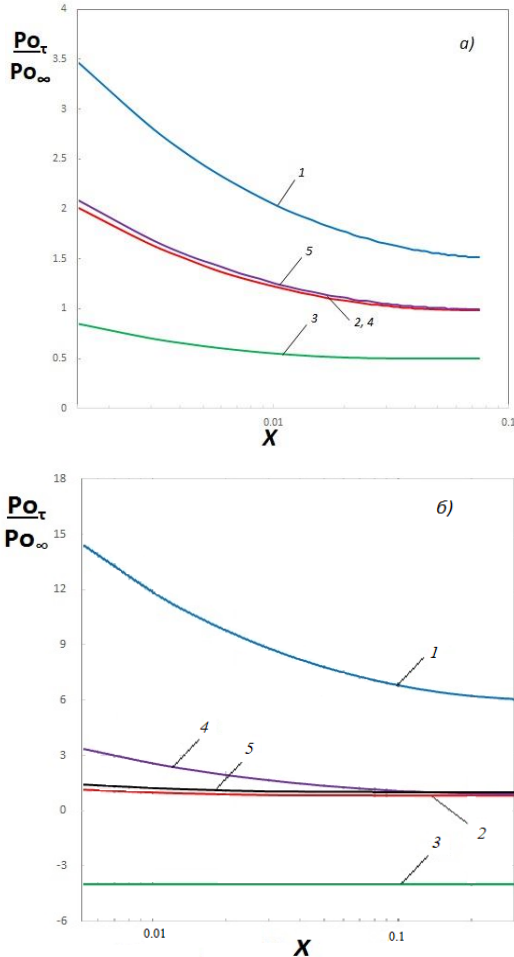


Рис. 2. Изменение безразмерного касательного напряжения на стенке по длине канала. а) – $A = 0.5$, б) – $A = 5$. 1 – $\omega t = 0$, 2 – $\omega t = \pi/2$, 3 – $\omega t = \pi$, 4 – $\overline{Po}_{\tau}/Po_{\infty}$, 5 – $Po_{\tau s}/Po_{\infty}$.

На рис. 3 показано изменение вдоль трубы числа Пуазейля Po при $A = 5$ для прямого Po_d и обратного Po_r течения. В моменты времени, когда существует прямое течение ($0 \leq \omega t < \omega t_0$), $Po_r = 0$. В моменты времени, когда существует обратное течение ($\omega t_0 < \omega t \leq \pi$), $Po_d = 0$. Безразмерная длина канала в данном расчете выбрана достаточной для того, чтобы в центре канала течение стабилизировалось. Изменение числа Пуазейля Po аналогично изменению Po_{τ} . Однако в отличие от Po_{τ} , среднее по периоду колебаний число Пуазейля Po_d на участке стабилизации заметно превышает Po_s .

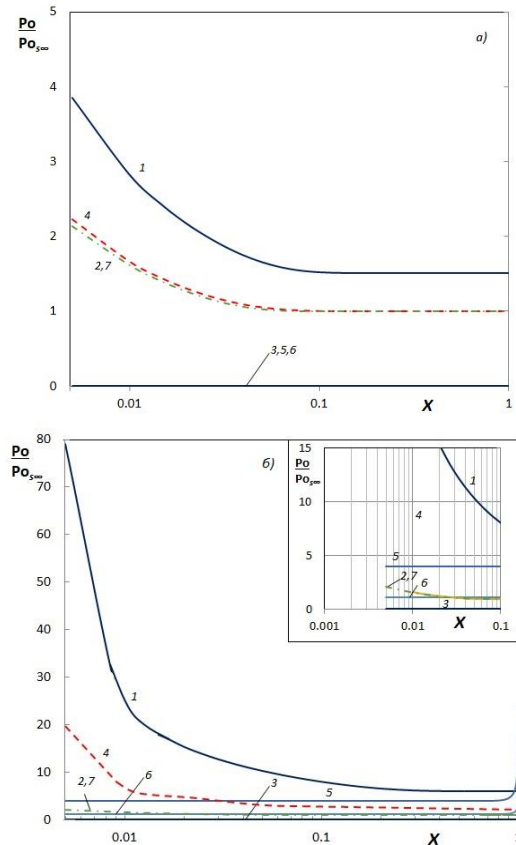


Рис. 3. Изменение числа Пуазейля вдоль канала а) – $A = 0.5$, б) – $A = 5$. 1 – $Po_d/Po_{\infty}(\omega t = 0)$, 2 – $Po_d/Po_{\infty}(\omega t = \pi/2)$, 3 – $Po_d/Po_{\infty}(\omega t = \omega t_0 \div \pi)$, $Po_r/Po_{\infty}(\omega t = 0 \div \omega t_0)$, 4 – $\overline{Po}_d/Po_{\infty}$, 5 – $Po_r/Po_{\infty}(\omega t = \pi)$, 6 – $\overline{Po}_r/Po_{\infty}$, 7 – Po_s/Po_{∞} .

Аналогичные зависимости, полученные для числа Нуссельта, показаны на рис. 4. На зависимости $\overline{Nu}/Nu_s(X)$ для $A = 5$ наблюдается максимум, приблизительно равный 1.17.

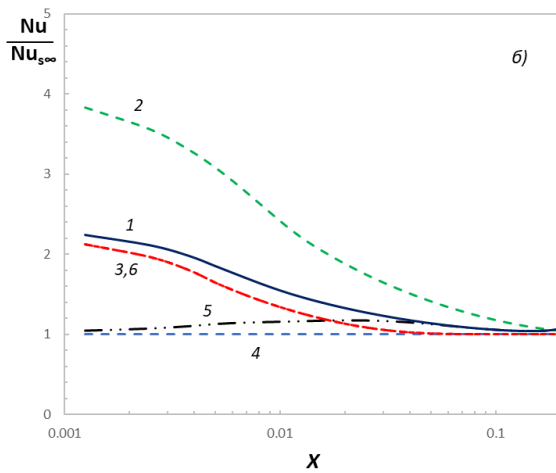
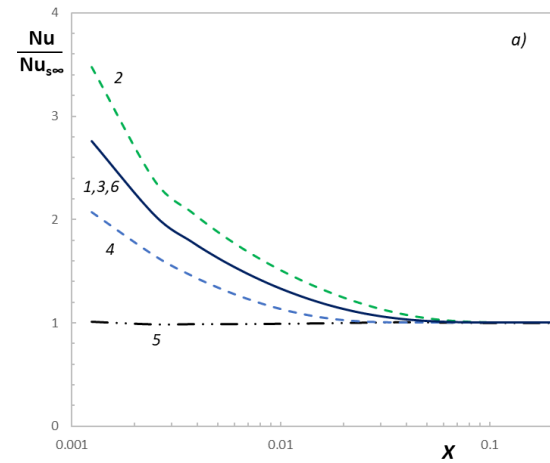


Рис. 4. Изменение числа Нуссельта по длине канала. а) – $A=0.5$, б) – $A=5$. 1 – $\overline{Nu} / Nu_{s\infty}$, 2 – Nu / Nu_s : $\omega t = 0$, 3 – $\omega t = \pi/2$, 4 – $\omega t = \pi$, 5 – \overline{Nu} / Nu_s , 6 – $Nu_s / Nu_{s\infty}$.

Представленные на рисунках средние по периоду колебаний числа Нуссельта вычислены по отношению

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} Q_c(X, \omega t) / \Delta \vartheta(X, \omega t) d(\omega t).$$

Следует отметить, что существует и другой, более отвечающий потребностям практики, способ осреднения по времени:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{Q_c}}{\overline{\Delta \vartheta}} = \frac{\int_0^{\pi} Q_c(X, \omega t) d(\omega t)}{\int_0^{\pi} \Delta \vartheta(X, \omega t) d(\omega t)}.$$

Предварительные расчеты показали, что значения этого числа Нуссельта могут заметно превышать значения, представленные на рис. 4.

Составляющие приведенного выше выражения представлены на рис. 5, 6. Для $A=0.5$ средние по периоду тепловой поток на стенке $\overline{Q_c}$ и перепад температур стенки и жидкости $\overline{\Delta \vartheta}$ не отличаются от их стационарных значений. Для больших амплитуд колебаний отношения $\overline{Q_c} / Q_{cs} \approx \overline{\Delta \vartheta} / \Delta \vartheta_s \approx 3$ на конце расчетного участка канала ($X=0.2$). Примечательно, что при $X=0$ для $A=5$ отношение $\overline{\Delta \vartheta} / \Delta \vartheta_s$ заметно меньше единицы. Это обусловлено наличием обратного течения, при котором теплообмен является стабилизированным в области $X=0$, и в этом случае значения $\overline{\Delta \vartheta}$ являются достаточно малыми.

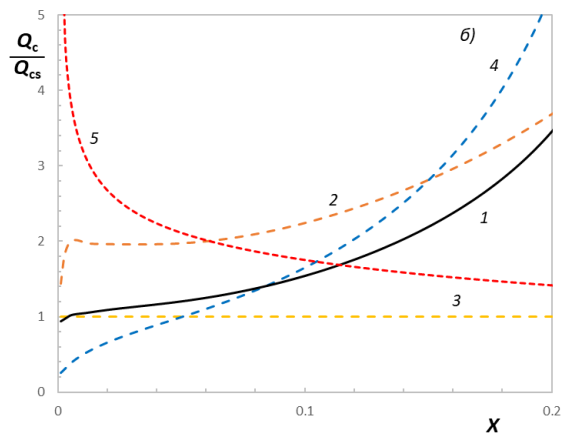
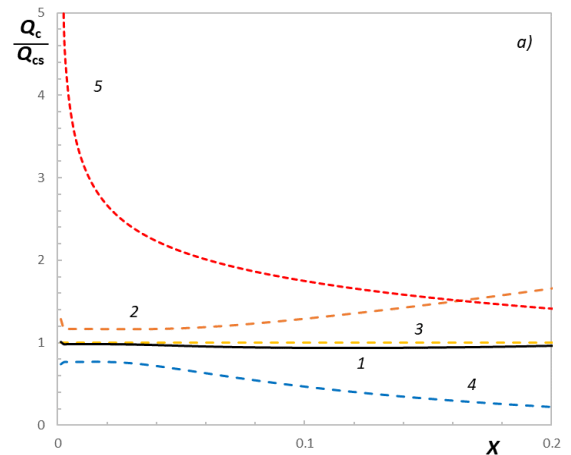


Рис. 5. Изменение безразмерного теплового потока по длине канала. а) – $A=0.5$, б) – $A=5$. 1 – $\overline{Q_c} / Q_{cs}$, Q_c / Q_{cs} : 2 – $\omega t = 0$, 3 – $\omega t = \pi/2$, 4 – $\omega t = \pi$, 5 – Q_{cs} .

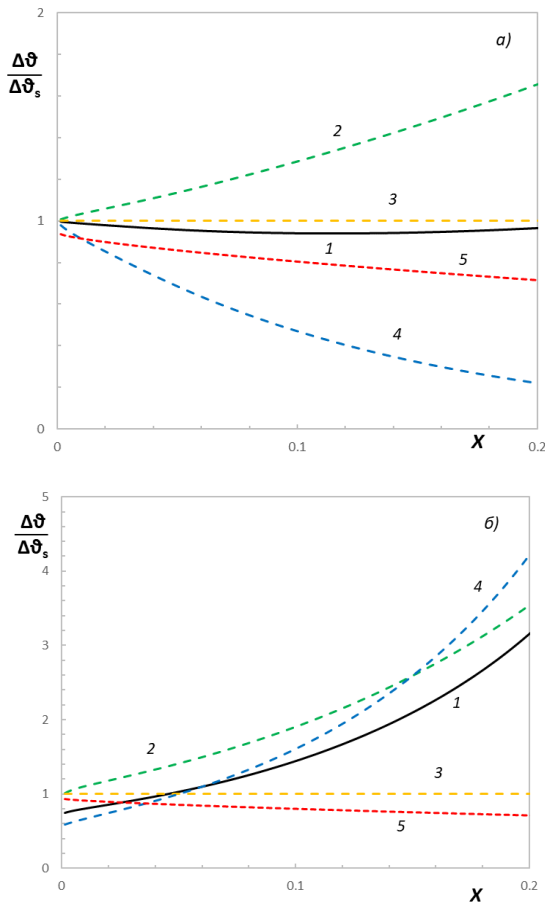


Рис. 6. Изменение безразмерного температурного напора по длине канала. а) – $A = 0.5$, б) – $A = 5$. 1 – $\Delta\theta / \Delta\theta_s$, $\Delta g / \Delta g_s$; 2 – $\omega t = 0$, 3 – $\omega t = \pi / 2$, 4 – $\omega t = \pi$, 5 – Δg_s .

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ расчета теплообмена при квазистационарном пульсирующем течении, основанный на использовании данных для стационарного течения. Расчеты проведены, в частности, для амплитуд колебаний средней по сечению скорости A , превышающих единицу. В результате расчета получены новые данные по профилям скорости, коэффициентам сопротивления трения и гидравлического сопротивления, числам Нуссельта, тепловому потоку и температуре жидкости. Показано, что для развивающегося пульсирующего течения сопротивление трения и гидравлическое сопротивление существенно выше, чем при стационарном течении. Также показано существование максимума для отношения средне-

го по периоду числа Нуссельта к его стационарному значению.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

A – амплитуда колебаний;

h – ширина канала;

$Nu = \frac{Q_c}{\Delta g}$ – число Нуссельта;

$Q_c = \frac{\partial g}{\partial Y}$ – тепловой поток;

$Re = \langle \bar{u} \rangle h / \nu$ – число Рейнольдса;

$T_{ж} = \int_0^h \frac{u}{\langle u \rangle} T(Y) dY$ – среднemasовая температура

жидкости;

$U = u / \langle \bar{u} \rangle$; u – продольная составляющая скорости;

$\langle \bar{u} \rangle = \frac{1}{\pi h} \int_0^{2\pi} \int_0^{h/2} u(y) dy d(\omega t)$ – средняя по сечению и

времени скорость;

t – время;

$V = 2 Re \nu / \langle \bar{u} \rangle$; ν – поперечная составляющая скорости;

$X = x / h Re$, $Y = 2y / h$; x и y – продольная и поперечная координаты;

$\xi^\tau = \frac{4\tau_w}{\rho \langle u \rangle^2}$ – коэффициент сопротивления трения;

ния;

$\xi^p = -\frac{dp}{dx} \frac{2h}{\rho \langle u \rangle^2}$ – коэффициент гидравлического со-

противления;

$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}$ – касательное напряжение на

стенке;

ω – круговая частота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валуева Е.П.**, Зюкин В.С. Длина участка гидродинамической стабилизации при пульсирующем ламинарном течении в каналах в квазистационарной области. Труды школы-семинара под рук. акад. А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплопереноса в тепловых установках». ISBN 978-5-6042605-6-2 2019. С. 66-69
2. **Валуева Е.П.**, Зюкин В.С. Гидродинамика развивающегося пульсирующего ламинарного течения в плоском канале в квазистационарной области // Матер. конф. «Семинар вузов по теплофизике и энергетике» Санкт Петербург. 2019. С. 76–77.

Д.А. Долинин¹, Ву Си Ки², Давлатов Р.К.²

¹Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия

²Национальный исследовательский университет, «МЭИ», Москва, Россия

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

АННОТАЦИЯ

В работе представлены два метода по определению теплофизических свойств теплозащитных ограждений, отличающихся по диапазону рабочих температур и объекту, составной частью которого они являются. Первый метод основан на неразрушающем подходе определения термического сопротивления наружного ограждения зданий, обеспечивающего комфортные условия для проживания. Второй метод основан на учете объемного поглощения излучения пористыми материалами, используемыми в высокотемпературных установках, и квазистационарном режиме нагрева. Наличие этих двух факторов позволяет определить показатель поглощения материала, находящегося в поле высокотемпературного излучения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что существующие теплозащитные ограждения подвергаются нестационарному воздействию внешней среды, как это происходит со зданиями различного назначения, либо интенсивному тепловому излучению в высокотемпературных и теплотехнологических установках (ВТУ и ТТУ). Поэтому в процессе эксплуатации они теряют свои теплозащитные свойства. Чтобы определить величину этих потерь, необходимы методы, которые, во-первых, не разрушают конструкцию ограждения здания и, во-вторых, учитывают объемный характер поглощения излучения в ограждениях указанных установок. Полученная при этом информация может быть полезна при проведении энергосберегающих мероприятий с целью повышения энергетической эффективности теплотехнологического процесса.

2. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАРУЖНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ

2.1. Необходимость разработки данного метода

Задача определения теплофизических свойств (ТФС) наружных ограждений зданий особенно актуальна в ЖСК, поскольку свойства стройматериалов зависят от условий их эксплуатации и влияют на

работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования. Ясно, что правильно подобранные свойства материала обеспечивают многолетнее сохранение конструкции и сбережение тепловой энергии за счёт снижения потерь теплоты в окружающую среду. Однако надо учитывать, что здания, построенные в разные годы и по разным строительным нормам и правилам (СНиП), эксплуатировались в разных временных и погодных условиях. Поэтому стены существующих зданий по разному утратили свои теплозащитные свойства, т.к. неодинаково подвергались периодическому увлажнению и осушению. Из-за снижения или утраты первоначальных теплозащитных свойств наружными ограждениями приходится увеличивать тепловую нагрузку на систему отопления здания, чтобы поддерживать комфортные условия в его помещениях. Из этого следует, что, во-первых, действительные значения ТФС наружных стен зданий могут отличаться от значений, рассчитанных по СНиП. Во-вторых, необходим метод, который позволяет, не разрушая стен здания, определить их реальное термическое сопротивление, и в-третьих, на основании полученных данных осуществить правильный подбор энергосберегающих мероприятий, устраняющих снижение теплозащитных свойств наружных ограждений вследствие их износа.

2.2. Основы метода и его описание

Метод базируется на методике расчета термического сопротивления теплопередачи стенки в условиях стационарной одномерной теплопроводности, суть которой изложена в [1], и двух литературных источниках [2] и [3]. Первый источник посвящен определению в наружном ограждении здания зон с одномерным температурным полем, а второй - экспериментальному определению тепловых потерь через наружное ограждение помещения А231, расположенного в здании НИУ «МЭИ».

Для успешной реализации данного метода необходимо сформировать исходные данные, используя работу [3] и представленный ниже алгоритм.

- По аналогии с рис. 1 определить в исследуе-

мом наружном ограждении область с одномерным температурным полем;

- С помощью датчиков теплового потока и температуры установить в области с одномерным температурным полем значения этих величин, как на внутренней, так и на внешней поверхности наружного ограждения (см. рис. 2-4).

- Рассчитать термическое сопротивление стенки по формуле $R = \Delta t / q$, где Δt – разность температур на внутренней и наружной поверхности стенки.

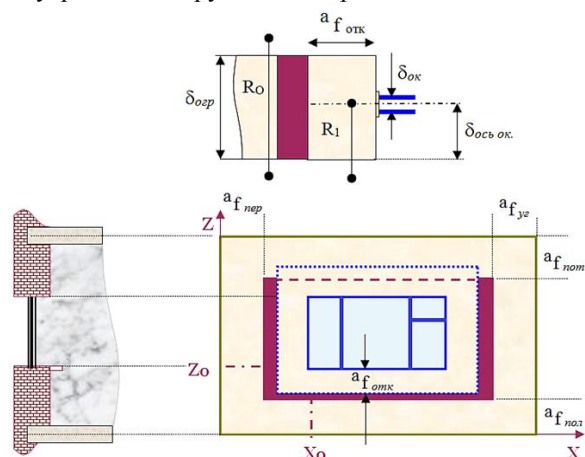


Рис. 2.1. Однооконное наружное ограждение. Темным цветом выделена область с одномерным температурным полем [2]



Рис.2.2. Изменение температуры внутренних поверхностей элементов наружного ограждения и отопительного прибора во времени



Рис. 2.3. Изменение локальных значений температуры на внешних поверхностях элементов наружного ограждения во времени

Если инструментально определить величину удельного теплового потока по каким-то причинам не возможно, то рекомендуется воспользоваться эмпирической формулой для определения коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности стенки в условиях свободной конвекции. При известной высоте помещения и знании коэффициента

теплоотдачи величина удельного теплового потока определится из закона Ньютона-Рихмана.

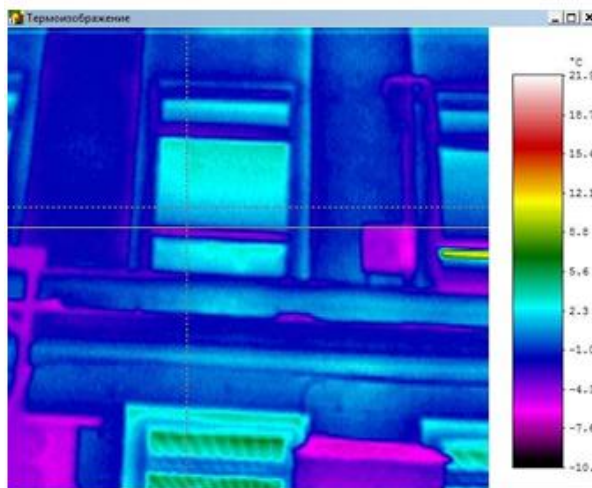
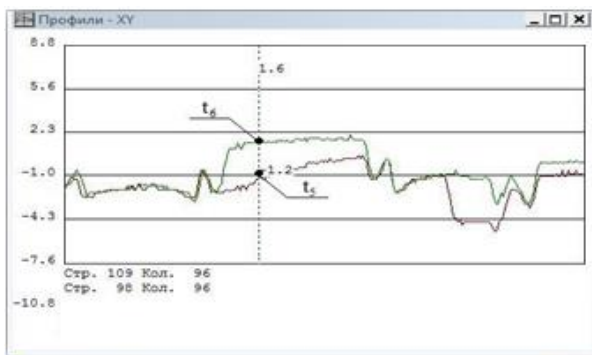


Рис. 2.4. Термограммы внешней поверхности здания [2]



Рис. 2.5. Помещение A231. Место замера температуры отмечено карандашом. Толщина наружной стены справа от окна 0,72 м, а слева – 0,84 м, в нише – 0,42 м.

Таблица 1. Параметры помещения А231 здания МЭИ

Параметр, м	Помещение	Окно	Ниша	Центральная балка	Боковая балка
Глубина	6,48	0,12	0,18	6,48	6,48
Высота	4,18	3,80	0,85	0,42	0,42
Ширина	3,61	2,00	1,18	0,31	0,10

2.3. Сравнение значений термического сопротивления наружного ограждения, полученных разными способами

• Требуемое сопротивление теплопередачи наружной стены, соответствующее санитарно-гигиеническим комфортным условиям:

$$R_{tr.min}(n, t_{in}, t_{out}, \Delta t_n, \alpha_{in}) = \frac{n(t_{in} - t_{out})}{\Delta t_n \alpha_{in}} \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow R_{tr.min}(1,25, -30,4,8.7) = 1.58 \quad (2.2)$$

• Термическое сопротивление R наружной стены (по предполагаемому составу) и сопротивление теплопередачи R₀:

$$R = \frac{0.64}{0.81} + \frac{0.03}{0.93} + \frac{0.05}{0.07} = 1.537 \quad (2.3)$$

$$\Rightarrow R_0 = R + 1/8.7 + 1/23 = 1.695 \quad (2.4)$$

В уравнении (2.4) первое слагаемое – термическое сопротивление кирпичной кладки, второе – суммарное термическое сопротивление внешней и внутренней штукатурки, третье – термическое сопротивление утеплителя. R₀ > R_{tr.min}.

• Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности наружной стены помещения (в нотации программы Mathcad):

$$\alpha(t_{in}, t_{in.w}, H) := \begin{cases} \Delta t \leftarrow t_{in} - t_{in.w} \\ Gr \leftarrow \frac{9.807 \cdot H^3 \cdot \Delta t \cdot \beta_{air}(t_{in})}{\nu_{air}(t_{in})^2} \\ Ra \leftarrow Gr \cdot Pr_{air}(t_{in}) \\ \text{if } Ra < 1 \cdot 10^9 \\ \quad \left| \begin{array}{l} C \leftarrow 0.76 \\ n \leftarrow 0.25 \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{if } Ra \geq 10^9 \\ \quad \left| \begin{array}{l} C \leftarrow 0.15 \\ n \leftarrow 0.33 \end{array} \right. \\ \text{exit} \leftarrow "?" \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \text{exit} \leftarrow C \cdot Ra^n \cdot \left(\frac{Pr_{air}(t_{in})}{Pr_{air}(t_{in.w})} \right)^{0.25} \cdot \frac{\lambda_{air}(t_{in})}{H} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \alpha(25, 20, 4.18) = 2.845$$

Рис. 2.5. Листинг функции, разработанной в среде Mathcad, для расчета коэффициента теплоотдачи в условиях свободной конвекции.

• Плотность теплового потока на внутренней поверхности наружной стены помещения:

$$q(t_{in}, t_{in.w}, H) = \alpha(t_{in}, t_{in.w}, H)(t_{in} - t_{in.w}) \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow q(25, 20, 4.18) = 14.223$$

• Термическое сопротивление наружной стены помещения:

$$R_w(t_{in}, t_{in.w}, t_{out.w}) = \frac{t_{in.w} - t_{out.w}}{q(t_{in}, t_{in.w}, H)} \Rightarrow R_w(25, 20, -2, 4.18) = 1.547 \quad (2.7)$$

Видно, что значения R_w, полученные в (2.3) и (2.7), очень близки.

Вывод по 2-му разделу: Разработан неразрушающий метод определения фактического термического сопротивления наружного ограждения и установлено, что термическое сопротивление наружной стены в корпусе А «НИУ «МЭИ», полученное расчетным путем по предложенному методу, совпало со значениями выявленными по методикам устаревшего СНиП-3-79. Это означает, что, во-первых, в процессе эксплуатации здания термическое сопротивление его стен не ухудшилось. Во-вторых, методика получила своё экспериментальное подтверждение. В-третьих, установлено, что стены здания МЭИ не соответствуют современным требованиям по сопротивлению теплопередачи.

3. ОСНОВЫ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВТУ

3.1. Математическая модель температурного поля пористой пластины, нагреваемой излучением

Уравнение теплопроводности, учитывающее наличие источника теплоты, обусловленного объемным поглощением падающего на него излучения, имеет следующий вид:

$$eq0 = \frac{d}{dFo} \theta(X, Fo) = \frac{d^2}{dX^2} \theta(X, Fo) + kA(1 - R) e^{(-BuX - \frac{fo}{Fo})} \quad (3.1)$$

В качестве начальных и граничных условий используем уравнения (3.2)-(3.4):

$$eq1 = \theta(X, Fo) = 1 \quad (3.2)$$

$$eq2 = \frac{d}{dX} \theta(X, Fo) \Big|_{X=0} = 0 \quad (3.3)$$

$$eq3 = \frac{d}{dX} \theta(X, Fo) \Big|_{X=1} = 0 \quad (3.4)$$

В уравнениях задействуются следующие безразмерные комплексы и симплексы: X = x/δ – комплекс по пространству; Fo = at²/δ – комплекс по времени или число Фурье; Bu = kδ – оптическая плотность пористой пластины; fo = D a/δ² – характерное время; θ = t/t₀ – температурный симплекс; q_{пад} = Ae^(-D/τ) – падающий поток излучения

ния, меняющийся во времени; $q_V = kq_{\text{пад}}(1 - R)\exp(-kx)$ – источник теплоты, обусловленный объемным поглощением падающего излучения;

Размерные величины, входящие в безразмерные комплексы и симплексы: R – коэффициент отражения излучения, k – показатель поглощения (экстинкция), B в формулах T (тау большое) это fo , t_0 – начальная температура пористой пластины. Полупрозрачность пластины обусловлена её пористой структурой. Ослабление излучения в пластине происходит по закону Бугера. Конвективным теплообменом в плоскости $x=0$ пренебрегаем из-за его малости по сравнению с излучением от внешнего источника. В плоскости $X=\delta$ – адиабатные условия.

Теплоперенос посредством собственного излучения и теплопроводности внутри пластины учитывается эффективными ТФС, определяемые экспериментально.

3.2. Аналитическое решение

Система уравнений (3.1) – (3.4) может быть решена аналитически с помощью программ Matlab, Mathematica или Maple. Ниже представлена процедура решения в нотации программы Maple.

- Используем функцию $\text{dsolve}(\{\dots\}, \dots)$ для поиска решения системы дифференциальных уравнений (2.1) – (2.4):

$$\text{sol} = \text{dsolve}(\{eq0, eq1, eq2, eq3\}, \theta(X, F_0)) \quad (3.5)$$

- Решение имеет вид:

$$\theta(X, F_0, R, A, Bu, fo, m) := 1 + \int_0^{F_0} \frac{\Phi \cdot Bu - A \cdot Bu \cdot (R - 1) \cdot \left(\exp\left(\frac{-fo}{\tau}\right) - \exp\left(\frac{-Bu \cdot \tau - fo}{\tau}\right) \right)}{Bu} d\tau \quad (3.6)$$

$$\Phi = \sum_{n=1}^m \frac{2 \cdot (R - 1) \cdot A \cdot Bu^2 \cdot \exp\left[\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \tau^2 - (F_0 \cdot \pi^2 n^2 + Bu) \cdot \tau - fo}{\tau}\right] \cdot [-\exp(Bu) + (-1)^n] \cdot \cos(n \cdot \pi \cdot X)}{\pi^2 \cdot n^2 + Bu^2}$$

С помощью функции $\text{unapply}(\dots)$ задаемся видом функции, которая будет описывать температурное поле по пространственной и временной координатам:

$$\theta = \text{unapply} \left(1 + \int_0^{F_0} \frac{1}{Bu} \left(\left(\sum_{n=1}^m \frac{1}{\pi^2 n^2 + Bu^2} \left(2(R - 1) A k B u e^{\frac{\pi^2 n^2 \tau^2 + (-F_0 \pi^2 n^2 - Bu) \tau - T}{\tau}} (-e^{bu} + (-1)^n) \cos(n \pi X) \right) \right) Bu - A k (R - 1) \left(e^{-\frac{T}{\tau}} - e^{-\frac{Bu \tau - T}{\tau}} \right) \right) d(\tau, X, F_0, R, A, k, Bu, T, m) \right) \quad (3.7)$$

- Визуализация решения с помощью функции $\text{plot}(\dots, \dots)$ при следующих исходных данных:

$$\text{plot}(\{\theta(0, F_0, R, A, k, Bu, T, m), \theta(0.5, F_0, R, A, k, Bu, T, m), \theta(1, F_0, R, A, k, Bu, T, m)\}, F_0 = 0..0.5) \quad (3.8)$$

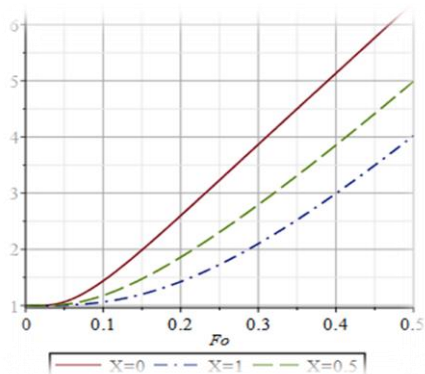
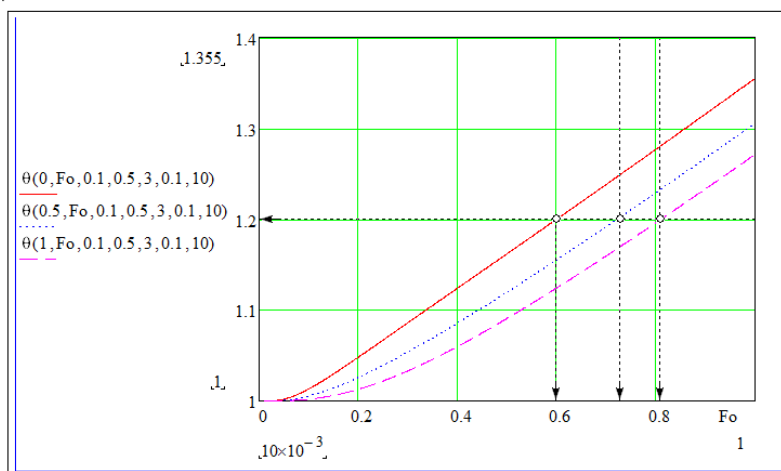


Рис. 3.1. Локальное изменение температуры в разных точках пористой пластины при $R=0,1$; $A=0,5$; $k=100$; $Bu=3$; $fo=0,1$; $m=10$.



$\delta := 0.065$, $\theta(X, Fo, R, A, Bu, fo, m)$, $Bu := 1$ - задание приближенного значения

Блок Given-Find

Given

$$\theta(0, 0.59905, 0.1, 0.5, Bu, 0.1, 10) = \theta(1, 0.80992, 0.1, 0.5, Bu, 0.1, 10)$$

$$Bu := \text{Find}(Bu) = 3.002 \Rightarrow k := \frac{Bu}{\delta} = 46.179$$

Рис. 3.2. Пример определения показателя поглощения на этапе квазистационарного режима нагрева.

Вывод по 3-му разделу:

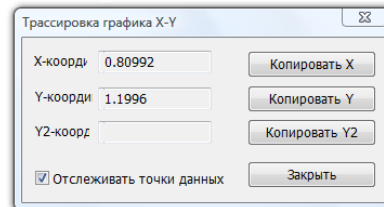
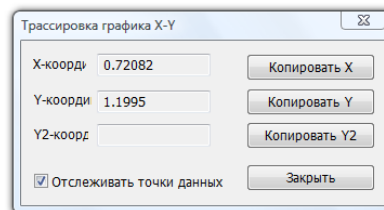
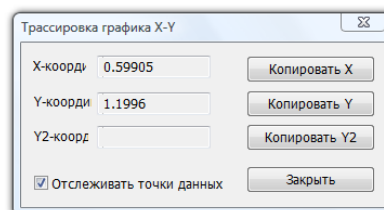
1. Разработана математическая модель температурного поля пористой пластины, нагреваемой меняющимся во времени лучистым потоком с учетом объемного механизма его поглощения.

2. Чтобы определить адекватность разработанной модели реальному процессу необходимо провести эксперимент и сравнить его результаты с расчетными модельными данными.

3. Полагаем, что благодаря грамотному подбору коэффициентов A и D (которые по сути своей являются адаптационными коэффициентами, входящими в состав формулы изменяющегося во времени лучистого потока) и коэффициентам переноса (отвечающим за теплофизические свойства материала) можно будет оценить достоверность результатов моделирования.

3.3. Анализ результатов и выводы

Из рис. 3.1 следует, что при $Fo > 0.4$ наступает квазистационарный режим нагрева. В этом случае скорость нагрева во всех точках пластины одинакова. Данный факт можно использовать для экспериментального определения теплофизических свойств пористого материала. На рис. 3.2 показано, как это можно сделать в программе Mathcad



4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА, НАГРЕВАЕМОГО ПЕРЕМЕННЫМ ЛУЧИСТЫМ ПОТОКОМ

4.1. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования проводились на установке, представленной на рис. 4.1.

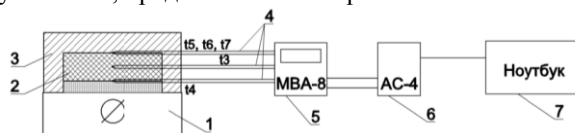


Рис. 4.1. Экспериментальная установка. 1- Электрическая плитка ENDEVER EP-20W. Мощность 1000 Вт; 2-Кирпич шамотный легковесный общего назначения ШЛ-0,4 №8; 3- Асбокартон 6 мм; 4-Термопары ДТПЛ021-0,5/5: «хромель-копель», модель 021 с изоляцией – трубка МКРц, диаметром термоэлектрода 0,5 мм, длиной термопары 5 м, диапазон измерения: -40...+600°C; 5-Аналоговый модуль ввода MBA-8; 6- Преобразователь интерфейсов RS-485 << = >> USB AC4; 7-ноутбук.

Исследуемый образец размещается над источником излучения, расстояние между панелью излучения и шамотным кирпичом составляет порядка сантиметра. При помощи специальных приспособлений, поддерживающие объект исследования на данном расстоянии от излучающей поверхности нагрева, обеспечивается возможность существования воздушной прослойки, которая в свою очередь, предназначена для снижения влияния теплопроводности и конвективного теплообмена на общий тепловой поток, исходящий от поверхности излучения. Предварительно в исследуемый образец устанавливаются пять термопар, размещенные в следующем образом:

- Три на поверхности, приближенной к источнику излучения (вход 5-7);
- Одна в середине исследуемого образца (вход 3);
- Одна на тыльной (дальней) поверхности образца по отношению к источнику излучения (вход 4);

Для того, чтобы создать одномерное распределение температуры в образце, нагреваемого излучением, боковые поверхности образца экранированы асбокартоном - теплоизоляционным материалом - толщиной в 6 мм. Термопары модели ДТПЛО21-0.7/1.5 подключены к аналоговому модулю МВА-8, который в свою очередь посредством USB переходника подсоединён к преобразователю АС4 с интерфейсом RS-485. После аналогового модуля значения измеряемых величин, которые фиксируются с интервалом в 10 секунд, отображаются на мониторе ноутбука.

Установка запускается только после проверки правильности выполненных соединений и начинается с включением ноутбука и источника теплового излучения. Поток излучения, нагревающий исследуемый материал, описывается функцией:

$$q = Be^{-D/\tau}$$

Эксперимент продолжается до тех пор, пока система не выйдет на уровень, близкий к стационару, то есть до незначительных изменений температуры во времени. Результаты эксперимента заносятся в таблицу, в которой фиксируются время и значения температуры от каждой термопары. Поскольку поверхность кирпича, воспринимающая тепловой поток излучения от плиты, обращена вниз, то, согласно работе [4], её теплоотдача конвекцией меньше, чем у вертикальной поверхности на 30% и на 60% по сравнению с горизонтальной поверхностью, отдающей тепло вверх. Из этого следует:

- конвективную составляющую теплового потока можно оценить по формулам, представленным в параграфе 10-2 [4];
- поскольку $PrGr < 1000$, значит, доля конвективной составляющей в общем тепловом потоке мала и нагрев образца в основном осуществляется излучением и теплопроводностью;
- величина первой (лучистой) составляющей теплового потока на несколько порядков превышает величину второй (кондуктивной) составляющей теплового потока.

Таким образом, нагрев исследуемого образца осуществляется в основном излучением.

4.2. Результаты и их анализ

На рис. 4.2 – 4.3 представлены результаты двух экспериментов

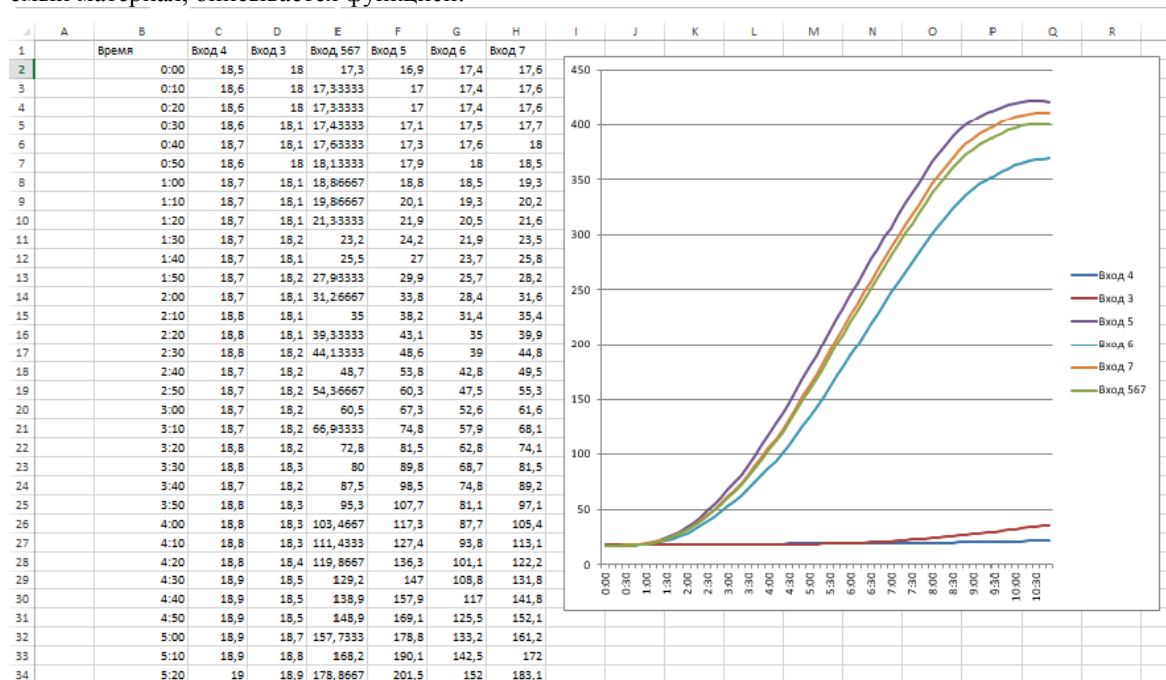


Рис. 4.2 – Фрагмент результатов 1-го эксперимента, представленных в табулированном и графическом виде в формате Excel документа.

Сравнение температурных кривых 1-го и 2-го экспериментов во фронтальной (t_{1s} и t_{2s}) и центральной (t_{13} и t_{23}) плоскостях исследуемого объекта показало незначительное 5% отличие. Температурная

кривая $t_0 + B1 \exp(-D1/\tau1)$ получена аналитически и соответствует начальному этапу нагрева кирпича в его центре.

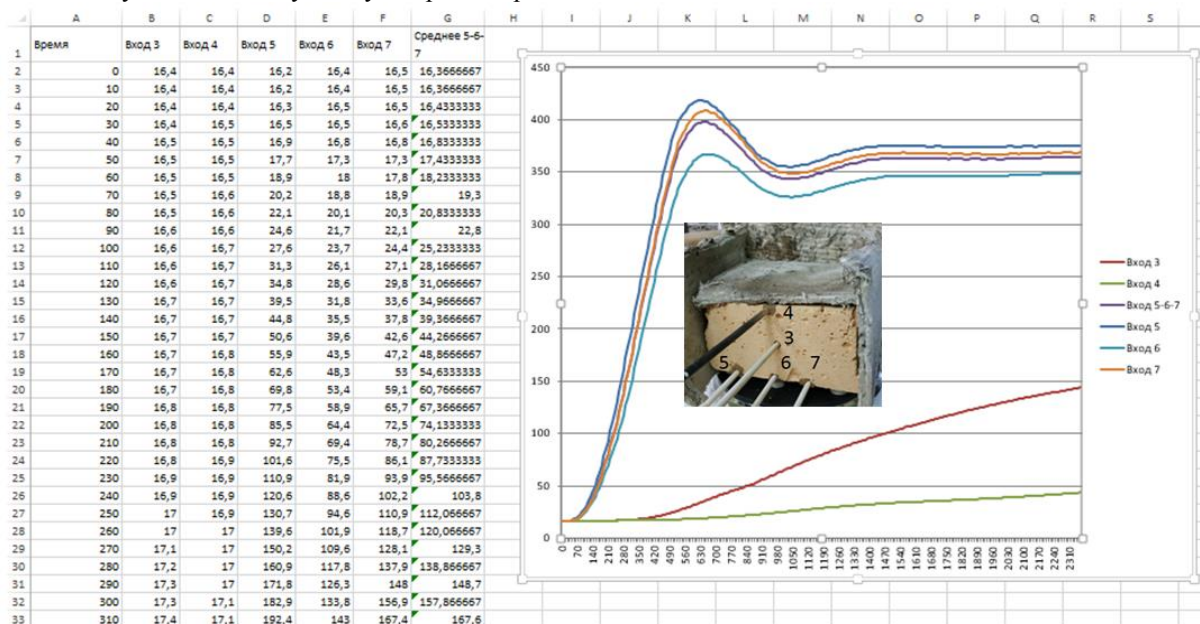


Рис. 4.3. Фрагмент результатов 2-го эксперимента, представленных в табулированном и графическом виде в формате Excel.

К сожалению, выход на участок, связанный с квазистационарным режимом нагрева не удалось достичь по причине срабатывания автоматического отключения нагревателя по достижению критической температуры. Из-за этой особенности полностью проверить предлагаемый метод не удалось. Можно увидеть только начальный этап нагрева, совпадающий с аналитическим решением.

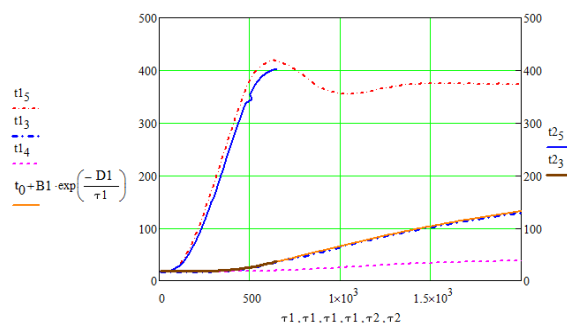


Рис. 4.4. Верификация данных результатов математического моделирования по данным эксперимента

Выводы по 4-му разделу

1. Получены экспериментальные данные температурного поля, формируемого в пористой пластине при нагреве её излучением.
2. Положительные результаты верификации данных по физическому и математическому моделированию получены только для начального этапа нагрева пористого материала излучением.
3. Наличие критической температуры в нагревателе приводит к необходимости пере формулировки граничных условий во фронтальной плоскости образца, т.е. к замене граничных условий 2-го рода на граничные условия 1-го рода. Такое изменение в условии задачи будет использовано в следующем

сообщении, т.к. требует разработки специальной функции, описывающей особенность изменения температуры во времени на поверхности исследуемого материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы:

- Неразрушающий метод определения термического сопротивления наружной стены здания.
- Модель температурного поля, учитывающая объемный характер поглощения излучения материалом при нагреве переменным потоком.
- Квазистационарный метод определения показателя поглощения пористого материала.
- Результаты верификации данных, полученных при математическом и физическом моделировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНИП П-3-79* «Строительная теплотехника» / Минстрой России, Москва, 1995.
2. Фактор формы в теплотехническом расчете однооконного наружных ограждений / Глазов В.С., Колибаба О.Б., Насонова Е.Н." // Информационная среда ВУЗа: Сборник статей к IX Международной научно - технической конференции/ Иванов. гос. архит.-строит. акад. Иваново, 2002. Вып. 9. С. 98 –105..
3. Определение тепловых потерь через светопрозрачные ограждения зданий с применением тепловизионных измерений / М.В. Горелов, В.С. Глазов, И.В. Яковлев / / Энергосбережение – теория и практика: Труды V Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов.- М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С.47-50.
4. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – Государственное энергетическое издательство, Ленинград - Москва, 1958, - 416 с.

А.И. Егорова¹, Г.П. Власенко¹, Н.С. Нечепуренко¹, А.В. Антипов², Д.Е. Попов¹

¹ Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

² Московский государственный университет технологий и управления им. К. Г. Разумовского, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ И АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В этой статье приводятся результаты экспериментальных исследований и экономического анализа в области атмосферной сублимационной сушки (АСС), анализируются особенности процессов сублимации полидисперсных материалов животного и растительного происхождения. Использование результатов работы позволит снизить энергоемкость и повысить эффективность сублимационных технологий при промышленном производстве. Экономический анализ возможности реализации технологии атмосферной сублимационной сушки выполнен по дисконтированным показателям. Получены значения сроков реализации проекта и даны практические рекомендации по режимам и параметрам сушки.

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества производимой продукции – стратегическая задача как отдельных компаний, так и многих стран. Итоговым результатом производственной деятельности, например, сельскохозяйственных предприятий является объем производимых пищевых продуктов растительного и животного происхождения. Но обеспечить развитие сельского хозяйства в рыночных условиях только за счет роста объемов производства невозможно, так как данный показатель не отражает качества и конкурентоспособности производимых товаров. Совершенствование теплотехнологических установок производственного цикла – одно из основных первоочередных мероприятий, направленных на повышение конкурентоспособности продукции и развитие сельскохозяйственных товаропроизводителей.

В последние годы наблюдается тенденция распространения сублимационных сушильных установок вакуумного типа во многих отраслях, где действуют стандарты управления контролем качества на всех стадиях продвижения продовольствия к потребителю – от производства сырья, его переработки, транспортировки, хранения до реализации населению в виде готового продукта [1].

Повышению качества сельскохозяйственных материалов и, как следствие, повышению её конкурен-

тоспособности способствует применение гармонизированных стандартов. Уже сейчас можно констатировать, что с момента принятия в 2001 году гармонизированных стандартов, производители сельскохозяйственной продукции нарабатывали определенный опыт в производстве сырьевых товаров, отвечающих требованиям стандартов стран – членов Евросоюза. Сохранение высоких биологических свойств продуктов растительного и животного происхождения на протяжении всего года невозможно без специального оборудования [2].

2. СУБЛИМАЦИОННАЯ СУШКА ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Одним из наиболее эффективных и перспективных способов термообработки полидисперсных материалов является сублимационная сушка, которая позволяет получить продукт высокого качества, удобный при хранении и транспортировке [3-4]. Сушка сублимацией является прогрессивной технологией, в ряде случаев не имеющей альтернативы. Это одно из наиболее приоритетных направлений в разных отраслях промышленности. Такая сушка позволяет сушить большое количество полидисперсных материалов до заданной влажности, и при этом, сохраняет максимальное количество полезных веществ в высушенном продукте [5].

Технологические сублимационные линии необходимы во многих отраслях. К ним можно отнести агропромышленный комплекс: переработка продукции плодоовощной, мясокомбинатов, молокозаводов, рыбокомбинатов, консервирование семенного фонда, сушка биологически ценных отходов спиртзаводов, применение в биотехнологических процессах, в фармацевтической промышленности, в металлургии, в химической промышленности, военной, оборонной и космической отраслях. Во многих производствах предпочтительно при получении порошковых материалов использование технологии сублимационного обезвоживания [6].

Например, процедура получения природных красителей состоит из нескольких основных этапов: экстракция, фильтрация, концентрирование и лиофилизация. Сублимационная сушка является одним из методов, который позволяет получить продукт хорошего качества из целых или частичных растений, в том числе без добавления стабилизаторов цвета. Некоторые интересные будущие методы могут быть связаны с использованием промышленных отходов, плодовой кожуры или лепестков различных цветов при производстве натуральных пигментов. Техника сублимационной сушки может быть идеальной для функциональных добавок, которые сочетают в себе несколько функций (цвет, клетчатка, минералы и витамины). Определение антисептических свойств природных красителей, полученных сушкой вымораживанием, также является ценным [7].

Также, в статье [8] проводится эксперимент на примере хурмы сорта «Rojo Brillante» путем сорбции воды и стеклования сублимированных ломтиков.

Известен способ предварительной обработки в циклах замораживания-оттаивания перед вакуумной лиофилизацией ломтиков чеснока с целью улучшения процесса сушки и качества конечного продукта. Результаты проведенного исследования [9] показали, что предварительная обработка сократила время сушки (22,22–33,33%) и потребление энергии (14,25–15,50%) из-за потери воды, увеличения количества свободной воды и образования пористых структур. Предварительная обработка улучшила термостабильность, вкус и химический состав сухих продуктов. Антиоксидантная активность полисахаридов, экстрагированных из предварительно обработанных высушенных продуктов, была выше, чем у необработанного высушенного продукта из-за снижения молекулярной массы полисахарида [9].

К достоинствам сублимационных процессов можно отнести: сравнительно высокий равновесный коэффициент разделения; возможность в случае использования газовых смесей исключить испарение растворителей (в отличие от абсорбции и ректификации); меньшая рабочая температура (чем при дистилляции); возможность получать целевые продукты сразу в товарной форме [10].

Сублимационная сушка происходит в условиях фазового перехода во всем диапазоне температур и давлений, при которых существуют твердая и газообразная фазы [11-12]. Лед переходит в газообразное состояние, минуя жидкую фазу до тех пор, пока концентрация паров не достигнет максимального значения при данной температуре [13-15].

3. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ПРОДУКТОВ МЕТОДОМ СУБЛИМАЦИИ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Для изучения процесса сублимационной сушки при атмосферном давлении и исследования теплофизических свойств влажных материалов путем охлаждения, замораживания, сублимации и высушивания создана установка в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» на кафедре теплообменных процессов и установок (рис. 1).

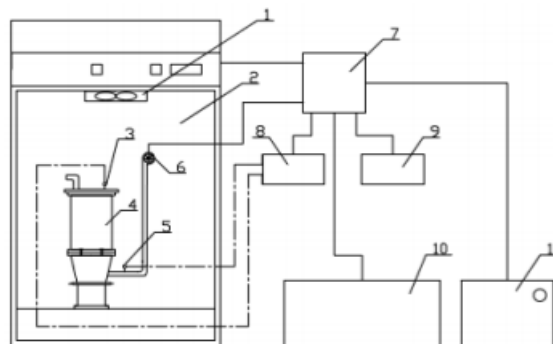


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 - вентилятор низкотемпературной камеры; 2 - низкотемпературная камера; 3 - датчик влажности и температуры на входе; 4 - сублимационный бункер; 5 - датчик влажности и температуры на выходе; 6 - вентилятор; 7 - электрический щит; 8 - измеритель влажности и температуры; 9 - анализатор влажности весовой; 10 - морозильный ларь; 11 - инфракрасная сушильная камера.

Технологический процесс состоит из: подготовки продукта, замораживания, сублимационной сушки, кратковременного удаления оставшейся части влаги в терморadiационной сушильной камере, упаковки продукта для последующего длительного хранения [16].

Подготовленные к сушке продукты представлены на рис. 2.



Рис. 2. Подготовленные продукты: 1 – свиная корейка; 2 – семена Veronica Spicata; 3 – банан.

Результаты сублимационной сушки при атмосферном давлении полидисперсных материалов представлены на рисунке 3: свиная корейка (эксперимент 1 и 2), банан (эксперимент 3 и 4), семена *Veronica Spicata* (эксперимент 5 и 6) [17].

На рис. 3 представлены результаты проведения эксперимента.

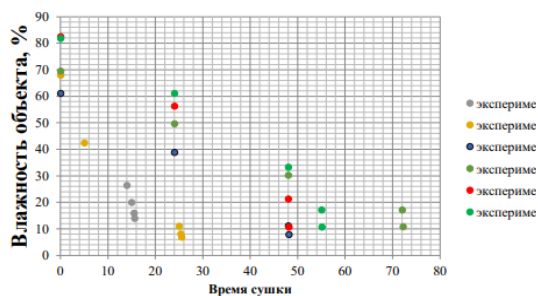


Рис. 3. Зависимость влажности образцов от времени сушки.

Поскольку сублимационная и инфракрасная сушильные камеры для работы потребляют электрическую энергию, то для расчета суммарных затрат энергии на удаление влаги определено потребление электроэнергии за весь период сушки образцов. Вопросы энергетической эффективности процесса дегидратации уделяется пристальное внимание специалистов, это показывают и результаты исследования сушки клюквенного сока с использованием осмотической дистилляции (ОД) в сочетании с лиофилизацией [18].

На рис. 4 представлены результаты расчета затрат энергии.

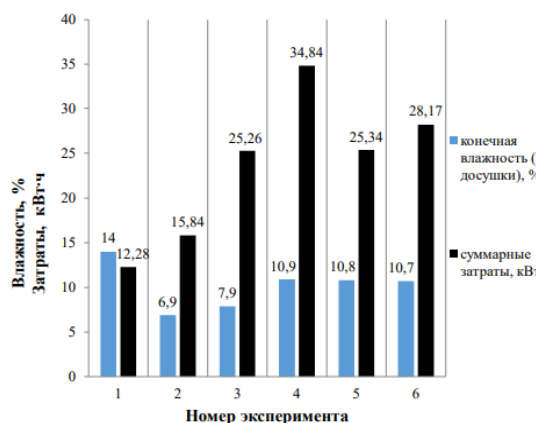


Рис. 4. Сопоставление результатов экспериментов (влажность и затраты).

По данным, полученным в ходе расчета (табл. 1), можно увидеть, что наиболее эффективной для белковой продукции является сушка, проводимая с параметрами эксперимента №1, поскольку конечная влажность, а также затраты энергии на удаление влаги являются наиболее оптимальными. Для растительной - применимы параметры эксперимента №3. Однако для сушки семян следует использовать параметры эксперимента №5. Значения относительной погрешности для каждого эксперимента не превышает 10%, следовательно, можно говорить о достижимой точности проведения эксперимента.

Таблица 1. Расчет удельных затрат на испарение влаги всех экспериментов.

№ опыта	Масса испаренной влаги, кг	Удельные затраты на испарение 1 кг влаги, кДж/кг
1	0,059	79,32
2	0,067	85,87
3	0,104	92,36
4	0,101	130,7
5	0,096	105,2
6	0,096	111,74

4. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УСТАНОВКИ НА РЫНКЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Норма дисконта (E) является основным экономическим нормативом, используемым при оценке эффективности инвестиционного проекта. Исходя из того, что мы производим оценку коммерческой эффективности проекта, то будем использовать коммерческую норму дисконта.

Проект направлен на вывод новой продукции на потребительский рынок и носит коммерческий характер, следовательно, срок реализации проекта составит 20 лет, что эквивалентно сроку службы основного оборудования (атмосферной сублимационной сушильной установки), другими словами, срок реализации проекта, в данном случае, определяется сроком нормативной службы АСС. После этого предполагается, что установка АСС придет в нерабочее состояние и её потребуется заменить. Точка отсчета - вложение денежных инвестиций, т.е. перевод денежных средств производителю. Катастрофическим условием прекращения проекта будет являться поломка АСС установки или морозильной камеры, преждевременная выработка рабочего ресурса. Шаг инвестиционного проекта составляет один год.

Определим норму дисконта на основании ориентировочной величины рискованной премии в зависимости от вида риска: 1) поскольку необходимо проведение НИОКР продолжительностью менее 1 года, то прирост премии за риск составит 6%; 2) сам проект использует новые, требующие применения ресурсов, имеющихся на свободном рынке технологии, поэтому прирост премии за риск составит 3%; 4) проект имеет слабую определенность в объеме спроса и цен, поэтому прирост премии за риск составит 3%; 5) объем спроса на продукцию не меняется в зависимости от сезона, поэтому прирост премии за риск составит 0%; 6) внешняя среда при ре-

лизации проекта (горно-геологические, климатические и иные природные условия, агрессивность внешней среды и т.п.) оказывает незначительное влияния на риск, поэтому прирост премии за риск составит 2%.

Принимая во внимание всё выше сказанное, можно сделать заключение, что проект несет в себе высокий риск (14%).

Ставка рефинансирования (r) составляет 5,50%, темп инфляции (j) – 4%. Тогда норма дисконта по уравнению (1) без поправки на риск составит 1,4%.

$$E_0 = ((1 + r/100)/(1 + j/100)) - 1 \quad (1)$$

Так как мы собираемся выпускать сравнительно новый продукт, то величина поправки составит 14%. Тогда, норма дисконта составит $E = 15,4\%$.

Расчет чистого дохода с учётом фактора времени представлен в таблице 2.

Результаты оценки: 1) по данным таблицы 1 ЧДД = 277 тыс. руб. > 0; 2) рассчитаем индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД) по уравнению 2 [19].

$$\text{ИДД} = 1/K \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t^{\text{тек}})/(1 + E)^t \quad (2)$$

В результате, ИДД > 1.

Рассчитаем внутреннюю норму доходности или рентабельность (ВНД) по уравнению 3.

$$\sum_{t=0}^T \frac{(P_t - Z_t^{\text{тек}})}{(1 + E)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E_{\text{ВНД}})^t}$$

(3)

Тогда, внутренняя норма доходности данного проекта составит 19,7 %.

Определение срока окупаемости (рис. 5) производится последовательным суммированием чистой прибыли по годам расчетного периода, пока полученная сумма не сравняется с суммой капиталовложений.

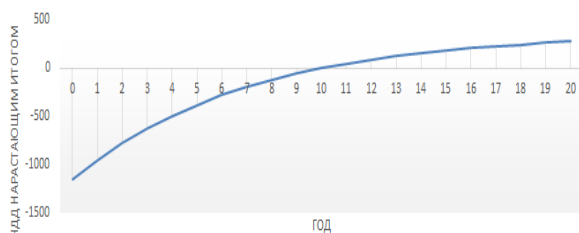


Рис. 5. Дисконтированный срок окупаемости АСС для мясной продукции.

Таким образом, срок окупаемости для свиной корейки составляет 9 лет и 11 месяцев, а для семян «Veronica Spicata» – 7 лет и 6 месяцев.

5. ВЫВОДЫ

Полученные результаты по изменению параметров в процессе сублимационной сушки могут быть использованы для снижения энергоемкости и повышения эффективности сушильных технологий при промышленном производстве. Установлено, что сушка белковой продукции с параметрами эксперимента №1 до влажности 20,1% с последующей об-

работкой в инфракрасной сушильной установке до 14% требует меньших затрат электроэнергии и, следовательно, дает лучший результат. В этом случае затраты энергии составляют 12,28 кВт·ч (79,32 кДж/кг считая по испаренной влаге), время на удаление влаги составляет 16 часов 15 минут. Такое сочетание позволяет значительно сократить потребление электроэнергии и повысить эффективность процесса. Сушка растительной продукции с параметрами эксперимента №3 до влажности 11,2% с последующей обработкой в инфракрасной сушильной установке до 7,9% требует меньших затрат электроэнергии при сопоставимых условиях, повышая эффективность процесса по сравнению с экспериментом №4. В этом случае затраты энергии составляют 25,26 кВт·ч (92,36 кДж/кг считая по испаренной влаге), время на удаление влаги составляет 48 часов 28 минут.

Применение атмосферной сублимационной сушки особенно выгодно в условиях Крайнего Севера. В большинстве областей нашей страны семь месяцев в году среднесуточная температура отрицательная. Исходя из этого возможно использование естественного холода для осуществления процесса, что снижает до минимума потребление электрической энергии.

В ходе проведения экономического анализа был получен чистый дисконтированный доход (для мясной продукции – 277 тыс. руб., для семян – 488,13 тыс. руб.), дисконтированный индекс доходности (для мясной продукции – 1,24, для семян – 1,42), дисконтированный срок окупаемости (для мясной продукции – 9 лет и 11 месяцев, для семян – 7 лет и 6 месяцев), внутренняя норма доходности (для мясной продукции – 19,7%, для семян – 22,9%).

По результатам экспериментального исследования можно сделать вывод, что проект по использованию атмосферной сублимационной сушильной установки для обработки сырья растительного и животного происхождения экономически целесообразен и рекомендован для практической реализации.

Анализируя технико-экономические показатели, можно дать следующие рекомендации: 1) использование АСС для производства сублимированной продукции является затратным, но приемлемым проектом, поскольку имеет хорошие показатели эффективности; 2) проект применим для промышленного выпуска продуктов, чем выше будет выпуск, тем выше будут показатели эффективности.

Анализ коммерческой жизнеспособности конструкции атмосферной сублимационной сушильной установки для производства товаров растительного и животного происхождения подтвердил возможность реализации подобной техники в сегменте теплотехнологического оборудования.

Таблица 2. Оценка экономической эффективности проекта по выпуску мясной сублимированной продукции

Шаг (год)	0	1	...	20
Длительность шага, мес.	12	12	...	12
Капитальные затраты (К), тыс. руб	1155	0	...	0
Выручка (Р), тыс. руб	0	960	...	960
Текущие затраты (Зтек), тыс. руб	0	667	...	667
Прибыль до налогообложения (Р-Зтек), тыс. руб	0	293	...	293
Налог на прибыль	0	58,60	...	58,60
Чистая прибыль	0	234,40	...	234,40
Денежный поток (Р-(Зтек+К)), тыс. руб	-1155	234,40	...	234,40
1+E	1,154	1,154	...	1,154
$\alpha = 1/(1 + E)^t$	1	0,866	...	0,057
Дисконтированный денежный поток, тыс. руб	-1155	203,04	...	13,26
Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб	-1155	-951,96	...	277

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булкин М. С. Сублимационная сушка сырья биологического происхождения с учетом флуктуаций в промышленных технологиях. Москва, 2010. 26 с.
2. Байбуз В. Н. Исследование процесса сублимационной сушки гранулированных продуктов с непрерывным отделением высохших слоев //Холодильная техника. 1981.№10. С. 36-38.
3. Семёнов Г. В., Касьянов Г. И. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко. Ростов – н/Д. Издательство: «МарТ», 2002. 112 с.
4. Агафоновичев В.П., Гасанов Г.И., Латышев В.П. Оптимизация режимов работы сублимационной установки //Холодильная техника. 1982, № 1.С. 26- 30.
5. Камовников Б. П., Антипов А. В.,Семенов Г. В, Бабаев И. А. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов. М: Колос, 1994. 255 с.
6. Колтынюк Б.А. Инвестиции. Учебник. СПб.: Изд-во Михайлова В.А. 2003. 848 с.
7. Różyło R. Recent trends in methods used to obtain natural food colorants by freeze-drying. Trends in Food Science & Technology, Vol.102, 2020, P. 39-50.
8. González C, Llorca E, Quiles A, Hernando I and Moraga G. Water sorption and glass transition in freeze-dried persimmon slices. Effect on physical properties and bioactive compounds, LWT, Vol 130, 2020, 109633.
9. Yabin Feng , Chin Ping Tan, Cunshan Zhou, Abu El-Gasim A. Yagoub, Baoguo Xu, Yanhui Sun, Haile Ma, Xin Xu and Xiaojie Yu. Effect of freeze-thaw cycles pretreatment on the vacuum freeze-drying process and physicochemical properties of the dried garlic slices, Food Chemistry, Vol 324, 2020, 126883.
10. Горелик А. Г. Сублимация// Химическая энциклопедия. Большая Российская энциклопедия, 1995. Т. 4. С. 449—451.
11. Кондратьев К. П., Лузан В. Н. Расчет продолжительности замораживания пищевых продуктов. Улан – Удэ, 2000. 5 с.
12. Головкин Н. А., Чижов Г. Б. Холодильная технология пищевых продуктов. Москва. Издательство: «Торговая литература», 1984. 240 с.
13. Лыков А. В. Теория сушки. М: Энергия, 1968. 472 с.
14. Камовников Б. П., Антипов А. В., Семенов Г. В, Бабаев И. А. Атмосферная сублимационная сушка пищевых продуктов. М: Колос, 1994. 255 с.
15. Бражников С. М., Вольнец А. З., Гулевич В. И., Кирюшин Н. В. Вакуум сублимационная сушилка: Пат.2032132. Россия, МКИ (> F 26 В 5/06. Московск. ин-т химич. машиностр, №4838823/06. Заяв. 13.06.90: Оpubл. 27.03.95, Бюл. №9.
16. Бондарь А. Г., Статюха Г. А., Потяженко И. А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. Киев: Вища школа, 1980. 263 с.
17. Бражников А. М. Теория термической обработки мясopодуKтов. М: Агрoпрoмиздaт, 1987. 271 с.
18. Plaza A., Cabezas R., Merlet G., Zurob E., Concha-Meyer A., Reyes A. and Romero J. Dehydrated cranberry juice powder obtained by osmotic distillation combined with freeze-drying: Process intensification and energy reduction, Chemical Engineering Research and Design, Vol 160, 2020, P. 233-239.
19. Роголёв Н. Д., Зубкова А. Г., Мастерова И. В. Экономика энергетики: учеб, пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2005. 288 с.

А.В. Катасонов, Е.В. Цепляева, М.В. Горелов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АККУМУЛЯЦИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПУТЁМ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ АККУМУЛЯТОРА

АННОТАЦИЯ

В статье проводится технико-экономический анализ систем аккумуляции энергии сжатого воздуха (САЭСВ), способных хранить большие количества внепиковой электрической энергии в виде воздуха высокого давления, в качестве энергетического запаса, который позволяет производить высокодоходную электроэнергию на пике спроса. Проводятся исследования как базовых, так и инновационных адиабатических концепций с целью выявления, и улучшения параметров, которые в наибольшей степени влияют на производительность установки. Результаты этих исследований подтверждают, с технической и экономической точки зрения, причины растущего интереса к САЭСВ, как реальному решению для оптимизации колебаний нагрузки в сетях. В частности, они подчеркивают, что традиционная технология САЭСВ является перспективной для России.

1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием возобновляемых источников энергии появился большой спрос на системы аккумуляции энергии. Одним из перспективных способов её хранения являются системы аккумуляции энергии сжатого воздуха (САЭСВ), так как позволяют сохранять и быстро подавать в сеть большие объёмы электроэнергии. В настоящее время существуют только две действующие станции САЭСВ. Также существует идея адиабатических систем хранения, которые являются полностью экологичными и имеют высокий КПД, так как минимизируются тепловые потери, поэтому возникает потребность создания цифровой модели для анализа.

2. ХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Нестабильность выработки энергии, представленные солнечной, ветровой, приливной энергетикой, поступающей в сеть, а также нестабильный спрос на электроэнергию потребителем, дают понимание в необходимости хранения большого количества энергии. Основная цель заключается в хранении больших количеств дешевой внепиковой электроэнергии, вырабатываемой любыми возобновляемыми источниками энергии, а также любыми другими источниками электроэнергии, например, ядерной энергетикой, и ее продаже в периоды пиковой потребности в энергии. Система аккумулирования энергии сжатого воздуха (САЭСВ) является недорогой технологией, способной обеспечить это, накапливая большие количества внепиковой электрической энергии в виде воздуха высокого давления и

вырабатывая при необходимости пиковую электроэнергию. В настоящее время доступно несколько технологий хранения энергии, но для большинства из них способность обеспечивать энергией снижается за короткий промежуток времени [1]. САЭСВ и гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) являются единственными, пригодными для использования в течение длительного времени, а также способными за короткое время покрыть пиковые нагрузки при относительно небольших затратах. В отличие от САЭСВ, ГАЭС не требует сжигания топлива, но экономически выгоден только на участках, где имеются или могут быть построены резервуары с дифференциальными высотами. В отличие от этого, САЭСВ может использовать различные типы резервуаров для хранения воздуха и занимает меньшую площадь, что обеспечивает большую гибкость для выбора местоположения, по сравнению с ГАЭС [2]. Воздух высокого давления может храниться в резервуарах или трубах, но, если необходимо масштабное применение, подземные геологические образования, такие как солевые и твердые породы, солевые водоносные горизонты и пористые породы, обычно являются более эффективными с точки зрения затрат [3].

Во время работы в режиме сжатия для приведения в действие цепи компрессоров, которые подают воздух в резервуар для хранения сжатого воздуха, используют непииковое дешевое электричество (рисунки 1). Воздух хранится при температуре пласта и при определенном давлении, где максимальное рабочее значение определяется конкретной выбранной подземной каверной. Чтобы повысить эффективность ступени сжатия и свести к минимуму тепловые нагрузки на стенки накопительного объема, используются промежуточные охладители между компрессорами и доохладитель перед подачей в каверну. Во время режима расширения для выработки электроэнергии с максимальной стоимостью воздух отводится из хранилища и некоторое количество топлива (обычно природного газа) сжигается. Сгорание позволяет избежать риска обледенения лопаток на выходе турбины, так как материалы турбины и уплотнения могут стать хрупкими. Кроме того, в отсутствие сгорания топлива потребуется большее количество воздуха на турбину при температуре хранения для выработки того же количества электроэнергии, а также замедлит скорость подачи энергии [1].

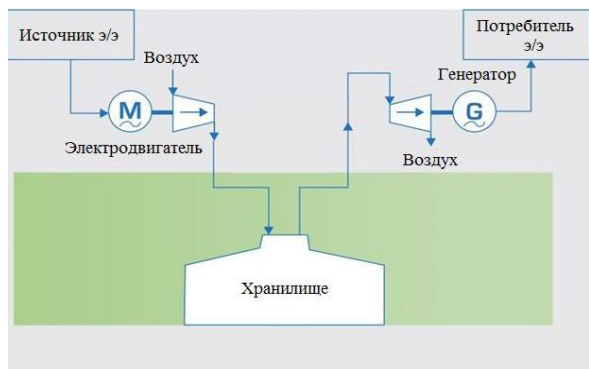


Рис. 1. САЭСВ.

В отличие от обычного газотурбинного цикла, где сжатие и расширение происходит одновременно и две трети (55-70%) выходной мощности от ступени расширения используется для работы компрессора, в системах САЭСВ они происходят независимо и в разное время. Это означает, что полная мощность турбин может быть использована для производства электроэнергии во время расширения, в то время как система компрессоров может иметь размеры, соответствующие источникам электрической энергии (атомные электростанции или ВИЭ) и максимизировать производительность САЭСВ. Что касается турбин, то, будучи независимыми от компрессорных линий, они имеют очень высокую пусковую скорость, таким образом, система может быть запущена в работу очень быстро, реагируя на изменения в системе. Так как установка управляется переменным расходом воздуха, поддерживая рабочую температуру значительно ниже, чем температура на входе стандартных газотурбинных машин, следствием этого является высокая надежность САЭСВ [4]. САЭСВ также позволяет эксплуатировать тепловые электрические и атомные станции на полную мощность, а не сокращать или останавливать их в периоды отключения электроэнергии, что дает экономическую выгоду (снижаются эксплуатационные расходы энергоблоков) и повышает надежность и эффективность работы [5].

Технологической концепции САЭСВ более 40 лет, и в 1970-х годах началось первое исследование их осуществимости как средства обеспечения энергией в период пикового спроса. На сегодняшний день в мире присутствуют 2 коммерческие станции САЭСВ: первая в мире станция мощностью 290 МВт, принадлежащая E.N Kraftwerke, Ханторф (Германия), построенная в 1978 году, и станция мощностью 110 МВт АЕС (Alabama Electric Corporation) в Макинтоше, Алабама (США), введенная в эксплуатацию в 1991 году. После этих заводов процесс исследования не прекратился, было построено и будет построено несколько демонстрационных станций, испытывающих различные конфигурации САЭСВ и осуществимость с разными резервуарами. Некоторые экспериментальные установки были построены в Японии, Италии и США. В США активно проводятся исследования САЭСВ и имеются средства для изучения

технико-экономических аспектов и так называемого «Расширенного второго поколения САЭСВ». В Европе идея развития САЭСВ возрастает в связи с увеличением количества возобновляемых источников энергии.

Адиабатическое хранение энергии сжатого воздуха (А-САЭСВ) основано на той же концепции описываемого САЭСВ, но с той разницей, что она не нуждается в сжигании топлива при работе. В А-САЭСВ тепло, вырабатываемое при сжатии, не теряется, а извлекается с помощью теплообменников и хранится внутри так называемого аккумулятора тепловой энергии (АТЭ). Во время фазы расширения, накопленное тепло нагревает сжатый воздух, отбираемый из камерны, избегая использования камер сгорания. Из-за высоких давлений в линии расширения требуется использование паровых турбин. На основе системы, используемой для накопления тепла, можно определить две различные конфигурации А-САЭСВ.

В первом случае тепло, вырабатываемое в процессе сжатия, передается теплообменниками в холодную среду (масло или расплавленная соль) и хранится в горячем резервуаре. Затем, когда требуется пиковая мощность, сжатый воздух внутри пласта выходит и, проходя через теплообменники, приобретает тепло, ранее переданное в горячий резервуар. Воздух расширяется через турбины, вырабатывая электроэнергию. Во время генерации горячая жидкость, вернув тепло обратно в воздух, хранится в холодном резервуаре до следующей фазы сжатия. В этой конфигурации достигаемая температура не является высокой и баки работают с жидкостью, не находящейся под давлением. Недостатками такой конфигурации являются потребность в двух резервуарах, стоимость рабочей жидкости и проблемы с коррозией. Кроме того, расплавленная соль не может изменять фазу, поэтому ее необходимо поддерживать в жидком состоянии с помощью системы отопления, которая потребляет энергию [6].

3. ТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АККУМУЛЯЦИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Цифровая модель, на базе программного продукта компании АО «НБИ», рассматриваемая для технической оценки, использует подземный пласт и самую простую конфигурацию системы аккумуляции сжатого воздуха. Компрессорная линия состоит из двух компрессоров, одного промежуточного охладителя и одного доохладителя, а генераторная линия состоит из двух котлов утилизаторов и двух турбин. Результатом исследования является сбор и сравнение результатов различных моделей для анализа влияния каждого параметра на производительность станций, а также определение того, какие из параметров нуждаются в улучшении. Анализ основан на идее изменения только требуемого параметра, сохраняя неизменными все остальные.

Установки с непрямым теплообменом, снабженные двумя баками, имеют преимущества: горячие и холодные материалы хранятся отдельно, но они представляют собой очень высокую стоимость используемой среды, высокую стоимость теплообменников, а также необходимость иметь два бака вместо одного. Также существует высокий риск затвердевания жидкости для хранения (расплавленная соль), что увеличивает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, так как для поддержания среды в жидкой фазе требуется система подогрева. Другой проблемой может быть утилизация материала. Если его необходимо изменить, и он не является более пригодным для использования из-за ухудшения свойств, могут возникнуть экологические и экономические проблемы.

В другой концепции А-САЭСВ твердая среда в качестве бетона заменяет расплавленную соль или масло. Он выбирается из-за его низкой стоимости, доступности и простоты переработки. Кроме того, бетон является материалом с высокой удельной теплоемкостью, хорошими механическими свойствами, коэффициентом теплового расширения, близким к коэффициенту теплового расширения стали, и высокой механической стойкостью к циклическим тепловым нагрузкам. Однако, дизайн геометрии, диаметр труб и количество труб внутри бетона могут повлиять на стоимость его хранения.

В А-САЭСВ прямым теплообменом тепло, вырабатываемое при сжатии, передается непосредственно в среду хранения, а в процессе генерации холодный воздух из каверны приобретает энергию внутри ТА (теплового аккумулятора), идущую в обратном направлении. Идея заключается в том, чтобы накапливать максимальное количество тепловой энергии при самой высокой температуре, это означает, что температура на выходе из компрессорной установки должна достигать максимально возможного значения, в пределах технологии. Высокая температура снижает количество отбираемого воздуха и позволяет избежать проблем с обледенением. Для достижения этого, компрессорный агрегат оснащен небольшим промежуточным охладителем, для ограничения температуры на выходе агрегата в определенных пределах (около 923 К). Когда воздух выходит из компрессора, он попадает внутрь ТА, и сверху вниз выделяет тепло в среду. Так как внизу температура может быть еще горячей, может потребоваться ее охлаждение перед закачкой в пласт. Позднее холодный воздух из каверны, идущий снизу-вверх, приобретает энергию для выработки электроэнергии через турбины.

Для преодоления вышеуказанных проблем с жидкими средами оцениваются более дешевые галька и горные породы [7]. Хранилища из камня или гальки также могут использоваться при высоких температурах до 1000 °С [8], поэтому никаких температурных проблем не возникает.

На базе созданной цифровой модели системы технический анализ показывает, что необходимо

значительное повышение эффективности компрессоров и турбин, которые должны быть как можно более постоянными и высокими во всем диапазоне рабочего давления каверны. Помимо эффективности компрессора, в компрессорном агрегате САЭСВ, увеличение числа компрессоров и промежуточных охладителей дает улучшение эксплуатационных характеристик за счет снижения потребления энергии на входе и заполнение объема воздухом за меньшее время. Для А-САЭСВ тепловая энергия, вырабатываемая во время сжатия, является ресурсом для производства, поэтому после первых стадий сжатия требуется только небольшой промежуточный охладитель, чтобы поддерживать максимальную температуру на выходе из компрессорной цепи в пределах технических ограничений.

В обеих установках различные характеристики хранения, функция глубины хранения и структура подземного пласта могут влиять на рабочие условия оборудования. Это одна из причин, по которой наблюдается интерес к надземным хранилищам. Однако несмотря на то, что подземное хранилище имеет недостаток, заключающийся в том, что характеристики изменяются на основе имеющихся пластов, надземное хранилище имеет ограниченные размеры (около 11 000 м³), следовательно, генерируется небольшая выходная энергия, что делает это решение неприменимым для управления большими объемами возобновляемой энергии. Кроме того, надземные хранилища работают при более высоком давлении хранения воздуха (до 14 МПа) для хранения большей массы в небольшом объеме. Более высокое давление хранения воздуха может генерировать более высокие выходные мощности, но они имеют слабые стороны, так как больше электроэнергии расходуется на сжатие воздуха. Следует отметить, что, хотя эффективность турбины увеличивает выходную мощность, вырабатываемую без каких-либо приращений топлива, все приращения температуры на входе в турбину имеют недостаток, заключающийся в увеличении требуемого количества топлива.

Турбины должны работать на самых высоких температурах на входе в турбину в широком диапазоне рабочих давлений с максимально возможной эффективностью, сохраняя высокую доступность и надежность линии генерации, необходимых для выработки пиковой энергии. Преимущества в высоких температурах на входе в турбину также видны, когда обычная линия генерации с двумя турбинами модифицирована, добавляя третью турбину. Недостатком опять же является приращение расхода топлива (около 2.2%), что в любом случае не влияет на прибыль.

Даже если завод Ханторф все еще не имеет рекуператора для того, чтобы следовать пикам спроса, технический и экономический анализ подчеркивает необходимость этого компонента для снижения рас-

хода топлива и, следовательно, эксплуатационных расходов.

На основе требуемой энергии на выходе и объема электроэнергии, не требующей регулирования, хранилище может иметь различные размеры, которые определяют общие капитальные затраты, влияние которых может быть значительным, если подземное образование не будет доступно. В адиабатических установках проблема хранения более существенна, так как для получения такого же количества энергии, как и в САЭСВ, требуется большее количество воздуха. В некоторых проведенных расчетах хранилище А-САЭСВ оказалось в три раза больше, чем обычное хранилище, с вытекающими отсюда проблемами поиска экономичного хранилища.

В А-САЭСВ низкие температуры на входе в турбину также создают проблемы на последних ступенях турбины низкого давления, где температуры могут достигать значений значительно ниже 273 К, если используется высокий коэффициент расширения. Зависимость между этой температурой и размерами ТА показывает, что проблема уменьшается, если используется больший ТА. Очевидно, что это решение увеличивает капитальные затраты.

Было проведено исследование ТА с различными средами, такими как галька и горные породы. Технический анализ подчеркивает хорошие результаты для А-САЭСВ с этими средами. Требуемый объем ТА изменяется при изменении характеристик среды с последующим изменением стоимости. Следует избегать ТА со средами с низкой плотностью и низкой теплоемкостью (например, 1870 кг/м³ и 0.750 кДж/кг·К), так как удельные затраты должны быть очень низкими для того, чтобы иметь рентабельность, аналогичную рентабельности бетона.

В то время как в САЭСВ основные риски прерывания работы представлены подземными пластами и окружающей их средой с возможными последствиями деградации колодцев и генерирующих линий, в адиабатических САЭСВ к этому следует добавить риски, связанные с хранением тепловой энергии.

Результаты подтверждают, что А-САЭСВ технически более эффективен, чем САЭСВ, так как работает с эффективностью около 70% против значений около 60%. Несмотря на более низкую эффективность, традиционная характеризуется высоким КПЭ, который в САЭСВ должен быть как можно выше, так как больше энергии может быть продано в сеть, что увеличивает доходы. Более высокие значения КПЭ и более низкие капитальные затраты делают установку САЭСВ намного более прибыльной и менее зависимой от рыночных условий, чем адиабатическую.

Однако адиабатическая имеет отличные экологические качества.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований подтверждают растущий интерес к хранилищам энергии сжатого воздуха, как решениям для управления непиковым приростом электроэнергии, как от возобновляемых источников энергии, так и от электростанций с низкой стоимостью электроэнергии, таких как атомные электростанции. Анализ показывает, что традиционная технология САЭСВ является наиболее перспективной, т.к. удовлетворяет с экономической точки зрения. Гораздо менее интересная, но все же жизнеспособная, "зеленая" технико-эффективная адиабатическая САЭСВ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

САЭСВ — система аккумуляции энергии сжатого воздуха;
ГАЭС — гидроаккумулирующие электростанции;
ВИЭ — возобновляемые источники энергии;
АТЭ — аккумулятор тепловой энергии;
А-САЭСВ — адиабатическая система аккумуляции энергии сжатого воздуха;
ТА — тепловой аккумулятор;
КПЭ — коэффициент преобразования электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдрахманов Р. С., Переведенцев Ю. П.** Возобновляемые источники энергии. - Казань: Изд. Казанского университета, 1992. - 134 с.
2. **Амерханов Р.А.** Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. - М.: Колосс, 2003. - 532 с.
3. **Ахмедов Р. Б.** Актуальные проблемы снижения неравномерности производства и потребления энергии: тез. - докл. на Всесоюз. совещ. «Аккумуляция энергии и пути повышения эффективности работы электростанций и экономии энергии». - М.: 1983. — С. 3–4.
4. **Смирнов А.К.** Подземные хранилища газа в водоносных пластах: [Учеб. пособие для вузов] / А.К. Смирнов. - М.: Компания Спутник+, 2003. - 114 с.: ил.; 21 см.; ISBN 5-93406-392-8: 50
5. «**Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации**». - М.: АНО «Учебный центр НП «Совет рынка», - 368 с.
6. **Бекман Г., Гилли П.** Тепловое аккумулялирование энергии: Пер. с англ. -М.: Мир, 1987. -272 с.
7. **Ольховский, Г. Г.** Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) / Г. Г. Ольховский и соавт. - Ижевск: ИКИ, 2011. - 360 с
8. **Луценко, Н. А.** Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента / Н. А. Луценко // Математическое моделирование. - 2005. - Т. 17. - № 3. - С. 120–128.

О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, Е.В. Гусев, А.А. Малов

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПИРОЛИЗА КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ

АННОТАЦИЯ

Основной тенденцией решения проблемы твердых коммунальных отходов в РФ является переход от полигонного захоронения к их промышленной переработке. Перспективным вариантом является метод пиролиза твердых углеродсодержащих отходов, позволяющий не только значительно уменьшить количество отходов, но и получить альтернативные виды энергоносителей.

Предложено использование продуктов пиролизной переработки твердых коммунальных отходов в технологии производства керамических материалов.

Получен новый керамический материал, в котором в качестве структурофазообразующей добавки использован твердый остаток пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава. Экспериментально определены: химический состав материала, водопоглощение, механическая прочность, плотность, теплопроводность, теплоемкость. Рекомендуется использовать керамический материал в технологии производства строительных изделий различного назначения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Рост потребления, особенно в крупных городах России, приводит к увеличению объемов образования твердых коммунальных отходов (ТКО). По данным Росприроднадзора основной технологией утилизации таких отходов в нашей стране является их захоронение на полигонах и свалках [1]. Такой способ утилизации негативно воздействует 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. Сфера обращения с отходами требует системных преобразований, направленных на уменьшение негативного воздействия на окружающую среду. Экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биоразнообразия и природных ресурсов заявлены приоритетными задачами государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 года [2]. Таким образом, основной тенденцией решения проблемы ТКО в РФ является

переход от полигонного захоронения к их промышленной переработке.

В мировой практике для промышленной утилизации твердых коммунальных отходов используют термические, химические, биологические и физико-химические методы. При содержании в ТКО до 70% органической (горючей) фракции отдают предпочтение переработке термическими методами. В РФ запрещена утилизация ТКО методом прямого сжигания (термического обезвреживания) из-за негативного воздействия на окружающую среду.

Альтернативным вариантом является метод пиролиза (термической деструкции) твердых углеродсодержащих отходов, позволяющий не только значительно уменьшить количество отходов, требующих захоронения, а также получить из них альтернативные виды энергоносителей. Термическая деструкция твердых органических веществ в составе ТКО сопровождается образованием газовой фазы (пиролизный газ) и углеродистого порошкообразного остатка (твердый углеродистый остаток), содержащего органические и неорганические компоненты. Пиролизный газ может быть использован как энергетическое или энерготехнологическое топливо, а твердый углеродистый остаток – в технологии производства строительных изделий различного назначения.

Промышленному применению твердого углеродистого остатка в настоящее время уделяется недостаточно внимания, хотя создание энергоэффективных безотходных технологий на основе его использования имеет большие перспективы. Так, например, в процессах высокотемпературного пиролиза PyroX и TogaX в качестве твердого продукта пиролиза получают стекловидный инертный гранулят, который затем используют в качестве наполнителя для бетона или как изоляционный материал в промышленном, гражданском и дорожном строительстве [3]. Авторами [4] предложено использовать твердый остаток пиролиза в технологии производства пеностекла.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе рассматривается возможность использования продуктов пиролизной переработки твердых коммунальных отходов в технологии

производства керамических материалов. Сырьевым материалом для модифицированной керамики является глина местных месторождений. В качестве структурофазообразующей добавки используется твердый остаток пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава [5].

Получение керамики на основе твердого углеродистого остатка пиролиза ТКО осуществляли следующим образом.

На первом этапе проводили пиролиз при температуре 700°C смеси ТКО следующего морфологического состава: пищевые отходы – 48,6 %; бумага и картон – 41,7 %; текстиль – 6,9 %; дерево – 1,4 %; кожа и резина – 1,4 %. Отметим, что полимерные материалы не включали в смесь ТКО, поскольку предварительные опыты показали полное отсутствие твердого остатка после пиролиза. Полученный углеродистый остаток измельчали до получения тонкодисперсного порошка.

На втором этапе тщательно перемешивали легкоплавкую малопластичную глину с тонкодисперсным порошком в массовой пропорции 80% к 20%, соответственно, с добавлением 12 % воды до получения однородной смеси. Формование образцов из данной смеси осуществляли с помощью ручного пресса. Полученные заготовки высушивали в сушильном шкафу при температуре 110°C в течение 60 мин, после чего производили их нагрев в электропечи при скорости 180 град/мин до температуры 1000°C. Охлаждение изделий осуществлялось вместе с печью.

На третьем этапе полученный дисперсный материал использовали в качестве отощителя для получения керамического пресспорошка следующего состава: глина и отощитель в массовой пропорции 60% к 40 %, соответственно, с формовочной влажностью 12%. Из полученной шихты формировали образцы с помощью гидравлического пресса с выдержкой в 10 с при конечном давлении 25 МПа. Термическая обработка полученных образцов-сырцов производилась сначала в сушильном шкафу при температуре 110°C в течение 60 мин, а затем в электропечи при скорости нагрева 180 град/мин до температуры 1050°C с последующей их изотермической выдержкой при данной температуре в течение 60 мин и охлаждением в печи.

Разработка и создание новых материалов требует проведения экспериментов по определению их структуры, химического состава, теплофизических и механических свойств.

Для решения поставленных задач был применен ряд современных методов исследования, позволяющих определить количественный и качественный состав веществ (рентгенофазовый анализ) и полу-

чить характеристику структуры материала (метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ)).

Сканирующую электронную микроскопию проводили с помощью микроскопа Vega 3SBH (TESCAN, Чехия). Структура материала при различном разрешении представлена на рис. 1.

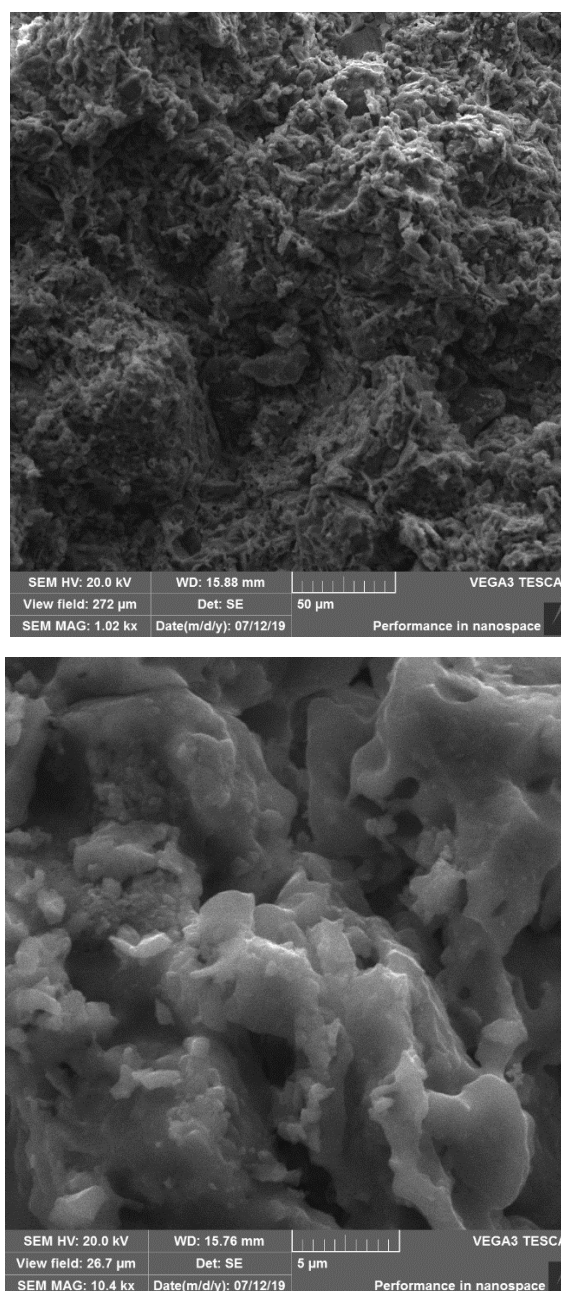
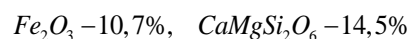
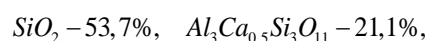


Рис. 1. Результаты СЭМ керамики на основе твердого углеродистого остатка пиролиза ТКО.

Результаты СЭМ показывают, что исследуемый материал представляет собой рыхлую структуру. Частицы между собой достаточно плотно упакованы и оплавлены, поскольку не имеют четких граней. На поверхности крупных частиц размером более 10 мкм находятся более мелкие частицы продолговатой формы размером 100×300 нм.

Метод качественного рентгеновского анализа исследуемых образцов был проведен на дифракто-

метре ДРОН-3М. Дифракционные спектры выводили на сопряженную с дифрактометром ЭВМ и обрабатывали с помощью специально составленных программ. На основе полученных данных определен химический состав керамического материала, основным компонентом которого является кремнезем:



Экспериментальные исследования механической прочности материала проведены при помощи гидравлического пресса. Было выполнено шесть опытов на цилиндрических образцах, результаты которых приведены в табл.1.

Таблица 1. Результаты экспериментов на прочность образцов

Диаметр образца, мм	Площадь поверхности, мм ²	Нагрузка при разрушении, Н	Нагрузка начала образования трещин, Н	Давление при разрушении, МПа	Давление при образовании трещин, МПа
20,06	316,05	8600	7740	27,21	24,49
20,01	314,47	7800	5500	24,80	17,49
20,04	315,42	7400	5200	23,46	16,49
20,07	316,36	8500	7650	26,87	24,18
20,16	319,21	10000	9500	31,33	29,76
20,16	319,21	7900	7110	24,75	22,27

Из анализа экспериментальных данных видно, что средняя нагрузка начала образования трещин составляет 7116,7Н. Разрушение образцов происходит при среднем давлении 26,4МПа. Для сравнения, разрушение аналогичных образцов, полученных без добавления пиролизного остатка, составило 21,8МПа. Таким образом, добавка пиролизного остатка повышает прочность образцов в среднем на 18%.

Важными физическими свойствами материала являются его средняя и истинная плотность, водопоглощение и пористость.

Среднюю плотность исследуемого материала определяли по известной формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где m – масса высушенного образца, полученная взвешиванием, кг;

V – объем воздушно-сухого образца, найденный прямым измерением, кг/м³.

Усредненная по пяти измерениям величина плотности составила 1752,6 кг/м³.

Водопоглощение определяли в соответствии с ГОСТ 7025-91 [6] путем выдерживания предварительно высушенных и взвешенных образцов в воде в течение 48 часов и последующим взвешиванием насыщенных водой образцов. Величина массового водопоглощения определена по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m}{m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где m_1 – масса насыщенного водой образца, кг;

m – масса образца, высушенного до постоянной массы, кг.

Усредненное по шести измерениям значение массового водопоглощения составило 15,3%. Для сравнения, водопоглощение керамического кирпича в соответствии с ГОСТ 530-2012 [7] составляет 6 ÷ 14%.

Объемное водопоглощение – это отношение объема поглощенной материалом воды при стандарт-

ных условиях к объему материала в сухом состоянии в %:

$$B_v = \frac{m_1 - m}{V \cdot \rho_w} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где V – объем воздушно-сухого материала, см³;
 ρ_w – плотность воды, г/см³.

Усредненное по шести измерениям значение объемного водопоглощения составило 25,9%.

Керамические материалы с массовым водопоглощением более 5% относят к категории пористых. От величины пористости и ее характера зависят важнейшие свойства материала: плотность, прочность, теплопроводность и др. Общая пористость складывается из открытой и закрытой. Открытая пористость численно равна объемному водопоглощению материала. Для расчета общей пористости использовали формулу:

$$P_o = P_{отк} + P_{зак} = \frac{V_{пор}}{V} = 1 - \frac{\rho}{\rho_u}, \quad (4)$$

где $P_{отк}$ – открытая пористость материала;

$P_{зак}$ – закрытая пористость материала;

$V_{пор}$ – объем пор в материале, м³;

V – объем воздушно-сухого материала, м³;

ρ – средняя плотность материала, кг/м³;

ρ_u – истинная плотность материала, кг/м³.

Истинную плотность определяли пикнометрическим методом [8]. По результатам пяти опытов усредненное значение истинной плотности равно $\rho_u = 2672,4 \text{ кг/м}^3$. Соответственно, общая пористость исследуемого материала составила $P_o = 34,0\%$, открытая пористость $P_{отк} = 25,9\%$, закрытая пористость $P_{зак} = 8,1\%$.

Для расчета тепловых процессов, протекающих в материале при его промышленном использовании, необходимо знать теплофизические свойства (теплопроводность и теплоемкость).

Для определения теплопроводности керамического материала использовали известный стационарный метод цилиндрического слоя [9]. Схема экс-

периментальной установки для определения коэффициента теплопроводности представлена на рис.2.

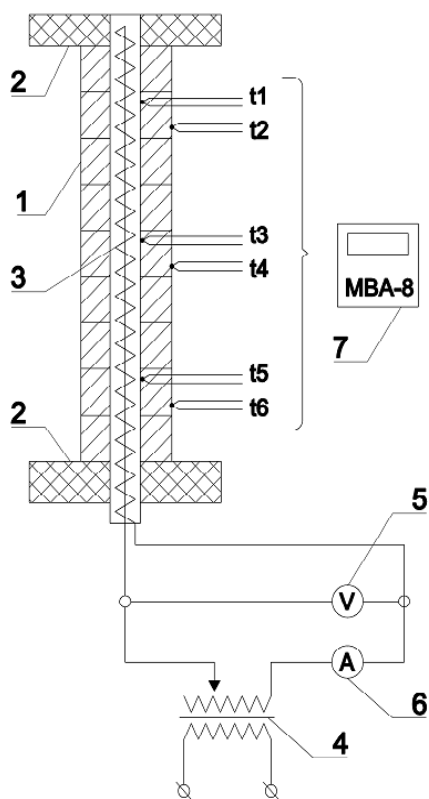


Рис. 2. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности.

Согласно методу, исследуемому материалу придали форму цилиндрической полый трубы, набранной из девяти коротких колец 1, плотно прилегающих друг к другу. Длина рабочего участка образца составила 200 мм. Внутренний диаметр исследуемого образца $d_1 = 15$ мм, а наружный диаметр $d_2 = 45$ мм. Для уменьшения тепловых потерь на торцах нагревателя установили теплоизолирующие втулки 2. Внутри материала разместили патронный электронагреватель (ТЭНП) 3, создающий равномерно распределенный по длине образца тепловой поток. При установившемся состоянии системы все количество теплоты, которое выделяется в электронагревателе, проходит через цилиндрический слой материала.

Электронагреватель питается через автотрансформатор 4 стабилизированным напряжением. Изменение мощности нагревателя производили изменением напряжения в цепи нагревателя. Количество теплоты, выделяемое электронагревателем определяли по закону Джоуля-Ленца, для чего производили измерения напряжения и силы тока посредством вольтметра 5 и амперметра 6.

Температуры исследуемого материала измеряли с помощью шести хромель-алюмелевых (ХА) термометров ДТПК 011-0,7 ($t_1 \dots t_6$), горячие спаи которых заложены на наружной (t_2, t_4, t_6) и на внутренней (t_1, t_3, t_5) поверхностях исследуемого материала.

Фиксацию значений температур производили с помощью аналогового модуля ввода MBA-8 (7). Передача данных на ПК осуществлялась посредством преобразователя AC-4 (RS-485 \leftrightarrow USB). Значения температур фиксировали в специализированной программе с интервалом времени 1 с. Стабилизация температурного режима наступала через 90 мин после включения установки. Температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндра усредняли по показаниям соответствующих термометров. В ходе экспериментов варьировали напряжение в интервале 20÷200 В. При этом мощность нагревателя изменялась в диапазоне 2,4÷310,6 Вт, а средняя температура образца – 30÷515°C. Результаты измерения температуры при мощности нагревателя 36,4 Вт представлены на рис. 3.

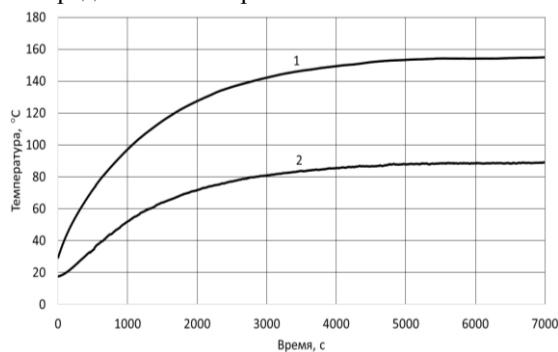


Рис. 3. Температуры образца при мощности нагревателя 36,4 Вт: 1 – внутренняя поверхность; 2 – наружная поверхность.

Используя результаты измерения температур, был рассчитан коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (5)$$

где d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметр испытуемого образца, соответственно, мм;

t_1, t_2 – температура на внутренней и наружной поверхностях образца, °C.

Полученная зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в диапазоне 300÷800 К (30÷515°C) показана на рис.4.

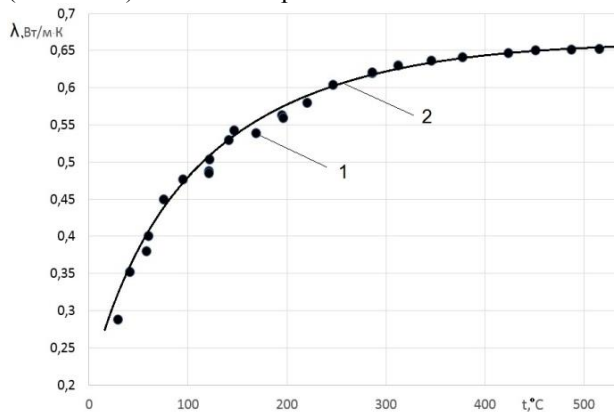


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности керамики от температуры: 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация.

Из анализа рисунка видно, что коэффициент теплопроводности возрастает с увеличением температуры. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида $\lambda = 0,243 + 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot t - 7,012 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,968 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$ с достоверностью $R^2 = 0,984$.

Для экспериментального определения теплоемкости твердых тел известен ряд методов [10]. В наших исследованиях мы использовали калориметрический метод. Установка для определения теплоемкости материала состояла из калориметра 1, нагревательного устройства 2, весов 3 для взвешивания опытных образцов 4, термопары 5 для измерения температуры воды в калориметре в комплекте с аналоговым модулем ввода 6 (рис.5).

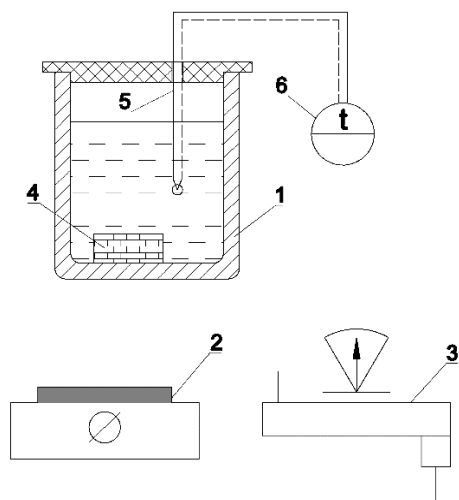


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для определения теплоемкости.

В ходе эксперимента известное количество нагретой до 100°C воды заливали в калориметр 1. Калориметр сверху закрывали теплоизолированной крышкой. Для измерения температуры воды использовали хромель-алюмелевую (ХА) термопару 2 и аналоговый модуль ввода МВА-8 (3). Значения температуры фиксировали на ПК. После выравнивания температуры воды в калориметр помещали предварительно взвешенный испытуемый образец 4, имеющий известную температуру окружающей среды. Спустя некоторое время в калориметре устанавливалось тепловое равновесие. Для получения более достоверных результатов и во избежание влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли 5 раз. Усредненные по пяти опытам результаты измерения температуры представлены на рис. 6.

Удельную теплоемкость рассчитывали по уравнению теплового баланса:

$$m_g \cdot c_g \cdot t'_g + m_o \cdot c_o \cdot t'_o = m_g \cdot c_g \cdot t'' + m_o \cdot c_o \cdot t'' \quad (6)$$

где m_g , c_g , t'_g – масса, удельная теплоемкость и начальная температура воды;

m_o , c_o , t'_o – масса, удельная теплоемкость и начальная температура образца;

t'' – конечная температура.

Полученные данные (рис.6) аппроксимированы линейным уравнением вида: $c = 550,81 + 10,125 \cdot t$ с достоверностью $R^2 = 0,956$.

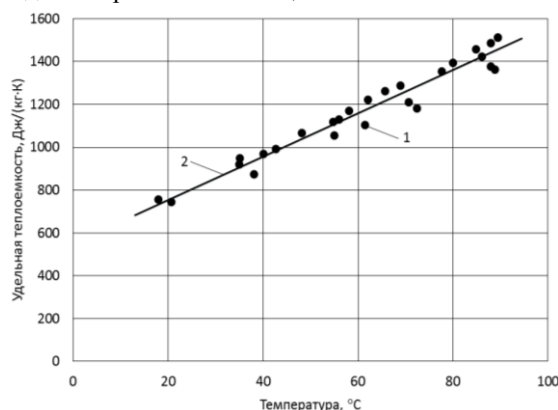


Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости керамики от температуры: 1 – эксперимент; 2 – аппроксимация.

Анализ результатов, представленных на рис.6, говорит о возрастающем характере теплоемкости исследуемого материала с увеличением температуры.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получен новый керамический материал, в котором в качестве структурофазообразующей добавки использован твердый остаток пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава.
2. Экспериментально определены: химический состав материала, водопоглощение, механическая прочность, плотность, теплопроводность, теплоемкость.
3. Полученный керамический материал рекомендуется использовать в технологии производства строительных изделий различного назначения.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ТКО – твердые коммунальные отходы;
- ρ – средняя плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- ρ_u – истинная плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;
- ρ_g – плотность воды, $\text{г}/\text{см}^3$.
- m – масса высушенного образца, г;
- m_1 – масса насыщенного водой образца, г;
- V – объем образца, $\text{кг}/\text{м}^3$.
- W – массовое водопоглощение, %.
- V_v – объемное водопоглощение, %.
- $P_{\text{отк}}$ – открытая пористость материала;
- $P_{\text{зак}}$ – закрытая пористость материала;
- $V_{\text{пор}}$ – объем пор в материале, м^3 ;
- d_1 – внутренний диаметр исследуемого образца, м^3 ;
- d_2 – наружный диаметр исследуемого образца, м^3 ;
- λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;
- t_1 – температура на внутренней поверхностях образца, К;
- t_2 – температура на наружной поверхностях образца, К;
- m_g – масса воды, кг;
- c_g – удельная теплоемкость воды, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;

t'_g – начальная температура воды, °С;
 m_0 – масса образца, кг;
 c_0 – удельная теплоемкость образца, Дж/(кг·°С);
 t'_o – начальная температура образца, °С;
 t^* – конечная температура, °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мальшевский, А.Ф.** Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов в городах России [Текст] / Мальшевский А.Ф., Хабиров В.В. // Российская акад. наук, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования. – Москва: ИФЗ РАН, 2012. – 63 с.
2. **Основы** государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года. Утверждены Президентом Российской Федерации 30 апреля 2012 года.
3. **Колпачев, А.Г.** Разработка технологии и оборудования для экологически безопасной переработки твердых органосодержащих отходов коммунального хозяйства с использованием среднетемпературного пиролиза [Текст] / А.Г.Колпачев // Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М.: 2001. – 181с.
4. **Яценко, Е.А.** Перспективы использования продуктов термической утилизации твердых коммунальных отходов в технологии силикатных теплоизоляционных материалов / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.А. Чумаков, В.А. Смолий, К. Хольшемахер, А.Г. Булгаков // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Технические науки. – 2019. – вып.3. – С.77 – 81.
5. **Об утверждении** информационно-технического справочника по наилучшим доступным технологиям «Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)». Утверждено приказом Росстандарта РФ от 15 декабря 2016 г. № 1887.
6. **ГОСТ 7025-91** Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости.
7. **ГОСТ 530-2012** Кирпич и камень керамические. Общие технические условия.
8. **ГОСТ 2211-65 (ИСО 5018-83)** Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения плотности (с Изменениями N 1, 2, 3).
9. **Осипова, В.А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена [Текст] : [Учеб. пособие для теплоэнерг. спец. вузов]. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : Энергия, 1979. - 319 с.
10. **Тепло- и массообмен** и теплотехнический эксперимент. Справочник. Под общей редакцией В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат. – 1982. - 510 с.

А.В. Коровяковский, С.К. Попов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕН ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА

АННОТАЦИЯ

Энергоэффективность топливных ванн стекловаренных печей определяется длительностью рабочей кампании и уровнем расхода топлива, среднего за рабочую кампанию. Разработана и исследована PHOENICS-модель теплообмена на наружной поверхности ограждения печи. Предложен алгоритм теплотехнического расчета печи, использующий адекватные соотношения при определении теплотерь и позволяющий оценить погрешность расчета расхода топлива.

Длительность рабочей кампании стекловаренной печи зависит от скорости эрозии огнеупорного ограждения, контактирующего с расплавом. Один из путей замедления эрозии – локальное струйное охлаждение огнеупора на уровне зеркала расплава. На основе разработанной PHOENICS-модели выполнено исследование эффективности применения струйного теплообмена для управления тепловым состоянием ограждения. Полученные результаты могут быть использованы для повышения энергоэкономичности стекловаренных печей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство тарного стекла характеризуется в РФ значительной масштабностью и высокой энергоемкостью. Основные потребители топливно-энергетических ресурсов – регенеративные ванны стекловаренных печей производительностью до 600 т/сутки с удельным энергопотреблением не менее 4500 МДж/(т стекломассы), тогда как теоретический минимум составляет 2050 МДж/т при массовой доле стеклобоя 30 %. Высокий уровень потенциала энергосбережения свидетельствует о наличии резервов повышения энергетической эффективности стекловаренных печей [1].

Энергоэффективность топливных ванн стекловаренных печей зависит от ряда параметров, среди которых наиболее существенны длительность рабочей кампании и видимый удельный расход топлива b , средний за рабочую кампанию.

В структуре расходной части теплового баланса стекловаренной печи заметная доля приходится на $Q_{o,c}$ – тепловой поток теплопроводностью через ограждение печи, рассеиваемый в окружающей среде, кВт. Расход топлива является линейной функци-

ей от $Q_{o,c}$. Величина $Q_{o,c}$ или соответствующая ему плотность теплового потока $q_{o,c}$, Вт/м², зависит от температуры внутренней поверхности ограждения, интенсивности конвективного и радиационного теплообмена наружной поверхности ограждения с окружающей средой, а также степени эрозионного износа ограждения вследствие контакта внутренней поверхности с агрессивными средами – расплавом стекломассы и высокотемпературными газами.

На внутренней поверхности боковых стен ограждения печи в районе свободной поверхности (зеркала) расплава стекломассы наблюдается наиболее интенсивная эрозия огнеупора, которая разрушает ограждающую поверхность и может привести к сокращению рабочей межремонтной кампании. Один из путей замедления процесса эрозии – принудительное охлаждение наружной поверхности стен на уровне зеркала расплава с целью снижения температуры внутренней огнеупорной поверхности. Такое охлаждение можно организовать путем локального струйного обдува.

На наружной поверхности элементов ограждения стекловаренной печи – свода, боковых стен и пода – имеет место свободно-конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой. В зоне локального обдува реализуется вынужденная конвекция. Достоверный расчет $q_{o,c}$ в условиях как свободной, так и вынужденной конвекции представляет интерес для инженерной практики, энергоаудита, проектных и исследовательских работ.

В данной работе представлены результаты математического моделирования процесса теплопередачи через элементы ограждения стекловаренной печи в условиях как свободной конвекции на всей поверхности, так и вынужденной конвекции при струйном обдуве локальной зоны поверхности ограждения.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЕ ПЕЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Плотность теплового потока $q_{o.c}$ определяется с использованием уравнений:

$$q_{o.c} = \alpha_{\text{сум}} (T_{\text{нар}} - T_{o.c}); \alpha_{\text{сум}} = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{рад}};$$

$$\alpha_{\text{рад}} = \frac{\varepsilon_{\text{нар}} \sigma_0 \left((T_{\text{нар}} + 273)^4 - (T_{o.c} + 273)^4 \right)}{T_{\text{нар}} - T_{o.c}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности элемента ограждения печи, °C; $T_{o.c}$ – температура окружающей среды, °C; $\alpha_{\text{сум}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности элемента ограждения печи, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи; $\alpha_{\text{рад}}$ – коэффициент радиационной теплоотдачи; $\varepsilon_{\text{нар}}$ – степень черноты наружной поверхности; $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции на вертикальной стене применяются следующие формулы:

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.75 \text{Ra}^{0.25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0.25}, & \text{Ra} < 6 \cdot 10^{10}; \\ 0.15 \text{Ra}^{1/3} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0.25}, & \text{Ra} \geq 6 \cdot 10^{10}; \end{cases} \quad [2] \quad (2)$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.726 (\text{Ra} \cdot \Phi(\text{Pr}))^{0.20}, & \text{Ra} < 10^9; \\ 0.241 (\text{Ra} \cdot \Phi(\text{Pr}))^{0.25}, & \text{Ra} \geq 10^9; \end{cases} \quad [3] \quad (3)$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.67 (\text{Ra} \cdot \Phi(\text{Pr}))^{0.25}, & 10^4 < \text{Ra} < 10^9; \\ 0.15 (\text{Ra} \cdot \Phi(\text{Pr}))^{1/3}, & \text{Ra} > 10^{12}; \end{cases} \quad [4] \quad (4)$$

$$\text{Nu} = \left(0.825 + \frac{0.387 \text{Ra}^{1/6}}{\left(1 + (0.492/\text{Pr})^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2, \quad [4, 5] \quad (5)$$

$$10^4 < \text{Ra} < 10^{13}.$$

Вспомогательная функция в (3), (4)

$$\Phi(\text{Pr}) = \left(1 + (0.437/\text{Pr})^{9/16} \right)^{-16/9}. \quad (6)$$

Формулы (2) – (4) получены при условии постоянной плотности теплового потока на стенке, формула (5) – при условии постоянной температуры стенки [4].

В формулах (2) – (5) определяющий размер L – длина поверхности теплообмена, определяющая температура

$$T_{\text{опр}} = 0.5 (T_{\text{нар}} + T_{o.c}). \quad (7)$$

Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции на своде (горизонтальной плоской плите с теплоотдающей поверхностью, обращенной вверх) в [3, 4] рекомендованы формулы (8), в [5] – соотношения (9):

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.766 \text{Ra}^{1/5} \left(1 + \left(\frac{0.322}{\text{Pr}} \right)^{11/20} \right)^{-4/11}, & \text{Ra} < 10^5; \\ 0.15 \text{Ra}^{1/3} \left(1 + \left(\frac{0.322}{\text{Pr}} \right)^{11/20} \right)^{-20/33}, & \text{Ra} > 10^5; \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0.59 \text{Ra}^{1/4}, & \text{Ra} \in [10^4, 10^7]; \\ 0.10 \text{Ra}^{1/3}, & \text{Ra} \in [10^7, 10^{11}]. \end{cases} \quad (9)$$

Для расчета среднего коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции на поду (горизонтальной плоской плите с теплоотдающей поверхностью, обращенной вниз) в [3] предложена формула (10), в [6] – формула (11):

$$\text{Nu} = 0.56 \text{Ra}^{0.25}; \quad (10)$$

$$\text{Nu} = 0.58 \text{Ra}^{1/5}, \text{Ra} \in [10^5, 10^{11}]. \quad (11)$$

В соотношениях (8) – (11) определяющая температура вычисляется по формуле (7), а определяющий размер L – как отношение площади теплообменной поверхности к ее периметру [4].

В формулах (2) – (11) Nu , Pr , $\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr}$, Gr – числа Нуссельта, Прандтля, Рэлея, Грасгофа [2], вычисляемые при определяющей температуре $T_{\text{опр}}$ и определяющем размере L ; $\text{Pr}_{\text{с}} = \text{Pr}(T_{\text{нар}})$ – число Прандтля при температуре наружной поверхности стены; $\text{Pr}_{\text{ж}} = \text{Pr}(T_{o.c})$ – число Прандтля при температуре жидкости вдали от стены (температуре окружающей среды).

В работе [7] показано, что представленные формулы дают заметный разброс значений коэффициента теплоотдачи. Неопределенность в выборе соотношений для $\alpha_{\text{конв}}$ затрудняет выполнение теплотехнического расчета печи и получение адекватного значения расхода топлива.

В этой связи представляет интерес исследование средствами математического моделирования свободно-конвективного теплообмена на наружной поверхности ограждения высокотемпературной промышленной печи с целью получения соотношений вида $\text{Nu} = f(\text{Ra})$.

Модель ванной стекловаренной печи, ориентированная на решение поставленной задачи, разработана в среде PHOENICS [8, 9]. Расчетная область (рис. 1) включает половину печи, примыкающую к вертикальной плоскости симметрии, и прилегающий объем воздушного пространства. Коричневым, оранжевым и серым цветом обозначены слои ограждения, выполненные из разных огнеупорных материалов. Желтым цветом обозначен газовый объем, заполненный высокотемпературными продуктами горения, зеленым цветом – расплав стекломассы. Конструктивные и режимные параметры модели выбраны на основе результатов теплотехнического обследования действующей печи в системе производства стеклотары.

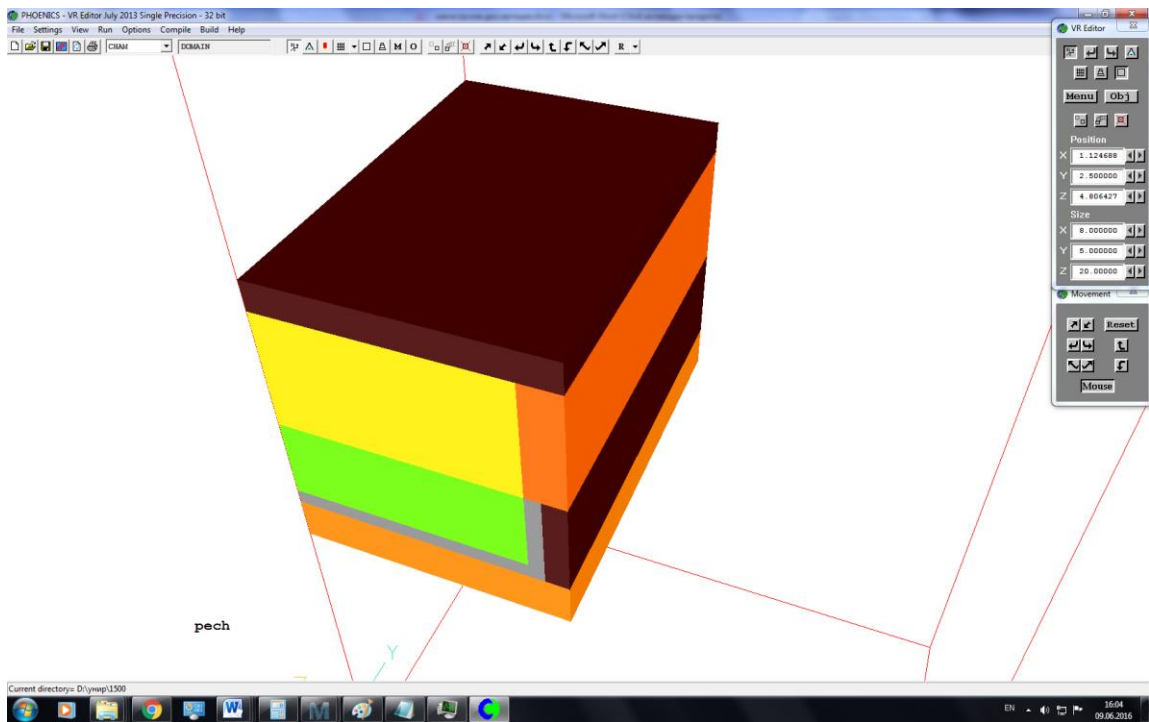


Рис. 1. Расчетная область для исследования теплопередачи через ограждение ванной стекловаренной печи.

Модель разработана для стационарного теплового режима печи с использованием следующих допущений: газовый объем печи изотермичен, неподвижен и по составу идентичен продуктам полного горения природного газа; объем стекломассы изотермичен и неподвижен; газ и расплав имеют бесконечно большую теплоемкость.

Исследование модели позволило получить следующие соотношения [7]:

$$\begin{cases} Nu = 0.488 Ra^{0.326} & \text{— для боковой стены;} \\ Nu = 0.465 Ra^{0.294} & \text{— для свода;} \\ Nu = 0.517 Ra^{0.271} & \text{— для пода.} \end{cases} \quad (12)$$

Альтернативный подход к определению тепловых потерь через элементы ограждения печи можно получить на основе данных, представленных в [10] в виде зависимостей плотностей тепловых потоков от $T_{нар}$. Анализ данных, выполненный в [7], позволил выяснить, что они характеризуют суммарную теплоотдачу, и получить соотношения для коэффициента суммарной теплоотдачи $\alpha_{сум}$ в виде функции

$$\alpha_{сум}(T_{нар}) = c_0 + c_1(T_{нар} - 20)^{c_2}. \quad (13)$$

Значения коэффициентов c_0, c_1, c_2 для элементов ограждения печи представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты функции (13) для $\alpha_{сум}$

Элемент ограждения	Значения коэффициентов		
	c_0	c_1	c_2
Свод	7,09	0,68	0,562
Боковая стена	7,20	0,56	0,592
Под	7,20	0,485	0,614

При расчете расхода топлива на стекловаренную печь целесообразно действовать по следующему алгоритму:

1) Выполнить вариантный расчет $Q_{о.с.}$. Первый вариант – с определением $\alpha_{сум}$ по формулам (13). Второй вариант – с расчетом $\alpha_{конв}$ по формулам (12) и $\alpha_{рад}$ по формуле (1).

2) Определить для каждого варианта видимый удельный расход топлива – соответственно b_1 и b_2 .

3) Вычислить искомую величину b как среднее арифметическое значений b_1 и b_2 . Расхождение между b_1 и b_2 считать оценкой погрешности определения видимого удельного расхода топлива. Таким образом,

$$b = \frac{b_1 + b_2}{2} \pm \Delta b; \quad \Delta b = \frac{|b_1 - b_2|}{2}.$$

3. ИСЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЕ ПЕЧИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ СТРУЙНОМ ОБДУВЕ НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для повышения срока службы огнеупора, контактирующего с расплавом, наружную поверхность стен стекловаренной печи принудительно охлаждаются на уровне зеркала расплава стекломассы [11 – 16]. Наиболее часто применяется воздушное охлаждение. Известны случаи воздушно-капельного охлаждения [11].

Локальный струйный обдув обычно реализуется посредством размещения вблизи охлаждаемой зоны воздухоподводящего короба по всей длине варочной зоны печи. Воздух направляется из короба на вертикальную стену через щель либо через сопла, врезан-

ные в короб с определенным шагом.

Для изучения характеристик струйного теплообмена разработана PHOENICS-модель. На рис. 2 представлена расчетная область, включающая фрагмент боковой стены печи на уровне зеркала расплава (области 2, 6 и 7), газовый объем рабочего пространства (область 1), стекломассу (области 4 и 5), окружающую среду (область 3) и воздушный коллектор 8. Коллектор с щелевым соплом шириной S размещен симметрично относительно уровня зеркала расплава (нулевой уровень по оси Oy , направленной вглубь ванны) на расстоянии h от стены. Поток воздуха на выходе из сопла имеет скорость V , м/с.

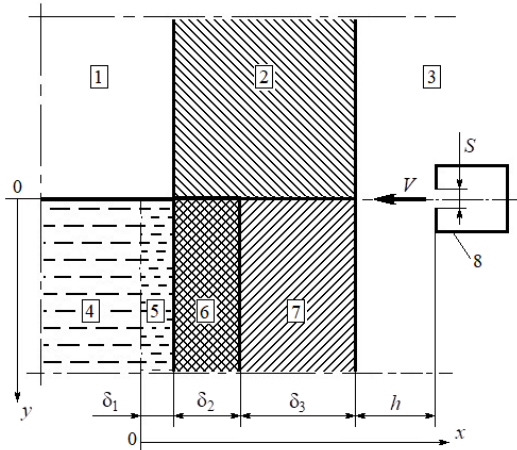


Рис. 2. Расчетная область для исследования локального струйного охлаждения стены стекловаренной печи.

С газовым объемом контактирует стена из корундового огнеупора (область 2). Боковое ограждение ванны расплава выполнено из хромоксида (слой 6 толщиной $\delta_2 = 0.200$ м) и муллита (слой 7 толщиной $\delta_3 = 0.300$ м).

По аналогии с [16] принято допущение, что часть объема стекломассы, примыкающая к ограждению (область 5), образует неподвижный слой толщиной $\delta_1 = 0.040$ м, а прочий объем расплава (область 4) движется. Начало оси Ox лежит на границе областей 4 и 5.

Поток воздуха набегает на стену и растекается по ее поверхности, интенсифицируя отвод теплоты на уровне зеркала расплава и снижая тем самым $T_{внутр}$ – температуру внутренней поверхности стены ограждения (на границе областей 5 и 6, т.е. при $x = \delta_1$). В результате замедляется процесс эрозии огнеупора.

Принято, что температура расплава на границе областей 4 и 5 составляет 1400 °С, температура окружающей среды (область 3) $T_{о.с} = 20$ °С.

Температура воздуха на выходе из сопла равна $T_{о.с}$. При разработке программного продукта использована стандартная k - ϵ -модель турбулентности.

Процесс струйного охлаждения сопровождается изменением параметров, относящихся к наружной

поверхности стены: снижением температуры $T_{нар}$, ростом плотности теплового потока в окружающую среду $q_{о.с}$ и коэффициента теплоотдачи α .

В процессе исследования определялись зависимости $T_{внутр}(y), T_{нар}(y)$ при заданных значениях параметров V, h, S . Глубина y изменялась в диапазоне до 0.500 м. Исходя из физической картины процесса, для аппроксимации этих зависимостей выбрана дробно-линейная (гиперболическая) функция вида

$$\varphi(y) = \frac{a_0 y + a_1}{y + a_2}$$

Аппроксимация выполнялась в среде Mathcad методом наименьших квадратов [17], после чего вычислялись плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи:

$$q_{о.с}(y) = \frac{T_{внутр}(y) - T_{нар}(y)}{\delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3};$$

$$\alpha(y) = \frac{q_{о.с}(y)}{T_{нар}(y) - T_{о.с}}$$

Результаты исследования при $h = 0.050$ м и $S = 0.014$ м представлены на рис. 3, 4, 5.

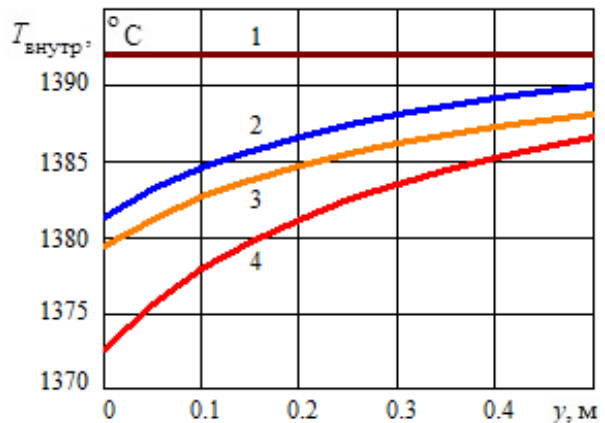


Рис. 3. Зависимость $T_{внутр}$ от глубины при различных скоростях обдува: 1 – $V = 0$; 2 – $V = 10$; 3 – $V = 30$; 4 – $V = 50$ м/с.

Из данных на рис. 3 следует, что на уровне зеркала расплава (при $y = 0$) уже при $V = 10$ м/с достигается эффект заметного снижения $T_{внутр}$, который усиливается с ростом скорости обдува. Снижение $T_{внутр}$ уже при $V = 10$ м/с распространяется до глубины 0.5 м. В то же время, как показывает рис. 4, эффект снижения $T_{нар}$ наблюдается на гораздо более протяженном участке стены.

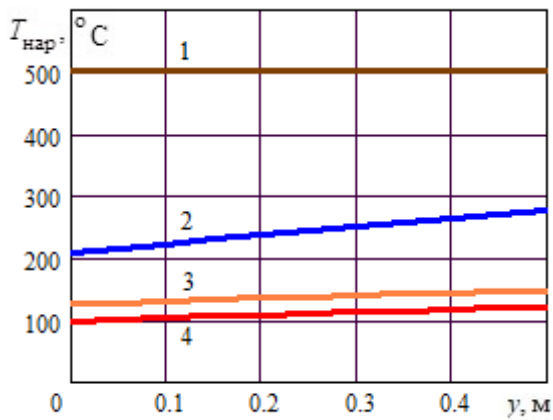


Рис. 4. Зависимость $T_{\text{нар}}$ от глубины при различных скоростях обдува: 1 – $V = 0$; 2 – $V = 10$; 3 – $V = 30$; 4 – $V = 50$ м/с.

Интенсификация обдува существенно влияет на величину коэффициента теплоотдачи (рис. 5). Так, на уровне зеркала расплава при отсутствии обдува $\alpha = 4.7$ Вт/(м²·К), а при $V = 50$ м/с наблюдается $\alpha = 41.1$ Вт/(м²·К).

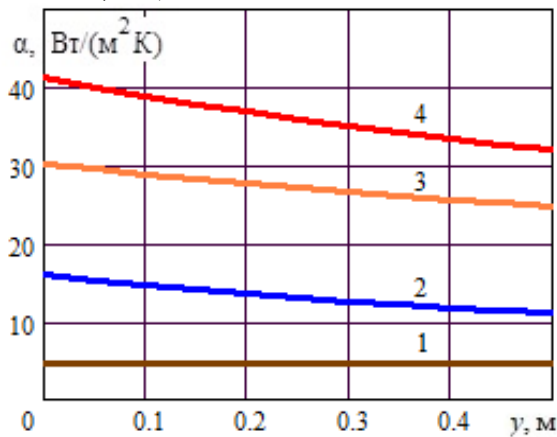


Рис. 5. Зависимость α от глубины при различных скоростях обдува: 1 – $V = 0$; 2 – $V = 10$; 3 – $V = 30$; 4 – $V = 50$ м/с.

Исследовано влияние геометрических параметров S и h на зависимости $T_{\text{внутр}}(y)$, $T_{\text{нар}}(y)$, $\alpha(y)$ при постоянной скорости обдува $V = 30$ м/с. Базовыми уровнями параметров выбраны значения $S = 0.014$ м, $h = 0.050$ м.

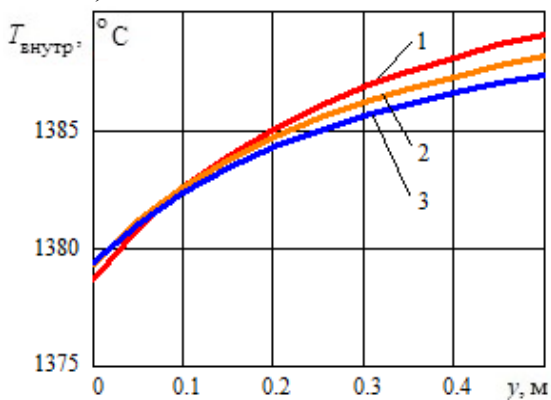


Рис. 6. Зависимость $T_{\text{внутр}}$ от глубины при различных размерах сопла: 1 – $S = 0,008$; 2 – $S = 0,014$; 3 – $S = 0,028$ м.

Влияние размера сопла S при постоянном значении $h = 0.050$ м иллюстрируется рис. 6 – 8. Данный параметр практически не влияет на температуру внутренней поверхности огнеупора (см. рис. 6). С увеличением S при неизменной скорости обдува растет массовый расход охлаждающего воздуха, что приводит к снижению $T_{\text{нар}}$ (рис. 7) и возрастанию коэффициента теплоотдачи α (рис. 8).

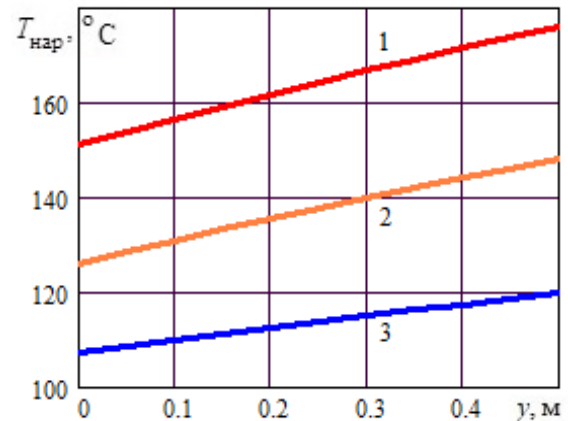


Рис. 7. Зависимость $T_{\text{нар}}$ от глубины при различных размерах сопла: 1 – $S = 0.008$; 2 – $S = 0.014$; 3 – $S = 0.028$ м.

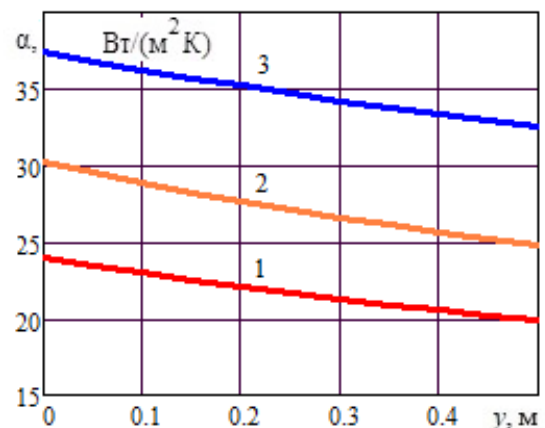


Рис. 8. Зависимость α от глубины при различных размерах сопла: 1 – $S = 0.008$; 2 – $S = 0.014$; 3 – $S = 0.028$ м.

Результаты исследования влияния размера зазора h между соплом и стеной при постоянном значении размера сопла $S = 0.014$ м представлены на рис. 9 – 11.

С уменьшением h наблюдается интенсификация локального охлаждения, проявляющаяся в снижении $T_{\text{внутр}}$ на уровне зеркала расплава (рис. 9) и падении уровня $T_{\text{нар}}$ (рис. 10). Как следует из рис. 11, по сравнению с базовым вариантом (кривая 2) коэффициент теплоотдачи при переходе к $h = 0.010$ м (кривая 1) может возрасти в 1.6 – 1.7 раза.

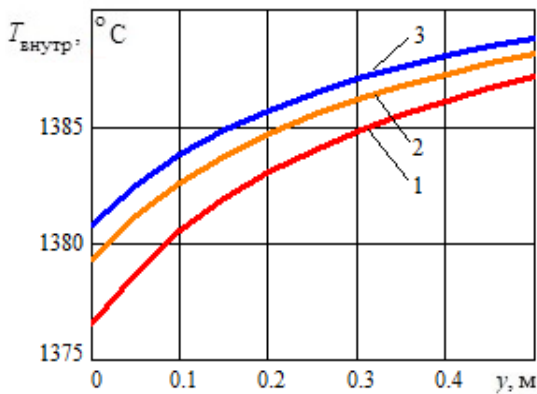


Рис. 9. Зависимость $T_{\text{внутр}}$ от глубины при различных размерах зазора «сопло – стенка»: 1 – $h = 0.010$; 2 – $h = 0.050$; 3 – $h = 0.100$ м.

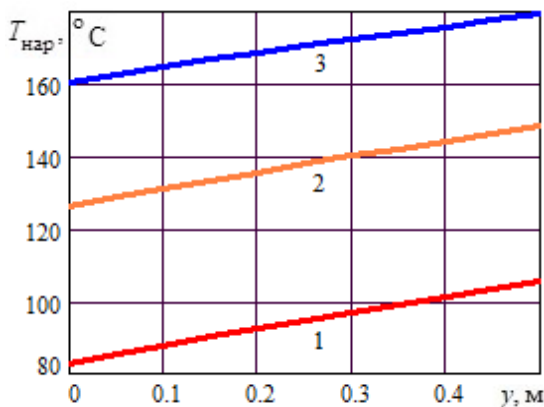


Рис. 10. Зависимость $T_{\text{нар}}$ от глубины при различных размерах зазора «сопло – стенка»: 1 – $h = 0.010$; 2 – $h = 0.050$; 3 – $h = 0.100$ м.

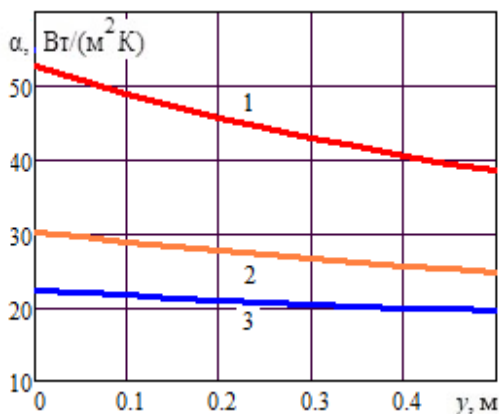


Рис. 11. Зависимость α от глубины при различных размерах зазора «сопло – стенка»: 1 – $h = 0.010$; 2 – $h = 0.050$; 3 – $h = 0.100$ м.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность топливных ванн стекловаренных печей определяется длительностью рабочей кампании и уровнем видимого расхода топлива, среднего за рабочую кампанию.

Достоверный расчет расхода топлива зависит от адекватного выбора формул для определения коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности ограждения печи. Известные формулы дают суще-

ственный разброс, что порождает неопределенность в расчете теплопотерь стекловаренной печи в окружающую среду. С целью устранения этой неопределенности разработана в среде PHOENICS и исследована математическая модель свободно-конвективного теплообмена на наружной поверхности ограждения высокотемпературной промышленной печи. Получены соотношения вида $Nu = f(Ra)$ для свода, боковой стены и пода печи. Предложен алгоритм теплотехнического расчета печи, использующий наиболее адекватные соотношения при определении теплопотерь и позволяющий оценить погрешность определения расхода топлива.

Длительность рабочей кампании стекловаренной печи зависит от скорости эрозии огнеупорного ограждения, контактирующего с расплавом. Один из путей замедления эрозии – снижение температуры внутренней огнеупорной поверхности на уровне зеркала расплава путем локального струйного обдува.

На основе разработанной PHOENICS-модели выполнено исследование эффективности применения струйного теплообмена для управления тепловым состоянием ограждения стекловаренной печи. Установлены зависимости температур внутренней и наружной поверхности стены ограждения печи в зоне расплава, коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности от скорости обдува, размеров и расположения воздушного сопла.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения энергоэкономичности стекловаренных печей.

Список обозначений

$T_{\text{нар}}$ – температура наружной поверхности элемента ограждения печи, °C;

$T_{\text{внутр}}$ – температура внутренней поверхности элемента ограждения печи, °C; $T_{\text{о.с}}$ – температура окружающей среды, °C;

$\alpha_{\text{сум}}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности элемента ограждения печи, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{рад}}$ – коэффициент радиационной теплоотдачи, Вт/(м²·К);

V – скорость обдува (скорость воздуха на выходе из сопла), м/с;

S – ширина щелевого воздушного сопла, м;

h – расстояние от стены до сопла, м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов, С.К. Оценка потенциала энергосбережения в технологии производства различных видов стекол / С.К. Попов, И.А. Тугучева // Промышленная энергетика. 2010. № 6. С. 5–7.
2. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.

3. **Справочник** по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. **Цветков, Ф.Ф.** Задачник по тепломассообмену / Ф.Ф. Цветков, Р.В. Керимов, В.И. Величко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
5. **Heat and mass transfer: Fundamentals & Applications, Fifth Edition.** – McGraw-Hill Education. – 2015.
6. **Крейт, Ф.** Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983.
7. **Попов, С. К.** Расчет теплотерь с наружной поверхности ограждения печи / С.К. Попов, А.В. Коровяковский, Э.А. Сериков // Стекло и керамика. – 2019. – № 8. – С. 3–8.
8. **Глазов, В.С.** Введение в программный комплекс PHOENICS / В.С. Глазов, Н.В. Хомченко, А.Ю. Маскинская; под ред. В.С. Глазова. – М.: Издательство МЭИ, 2017.
9. **Глазов, В.С.** Численное моделирование в среде PHOENICS и Mathcad / В.С. Глазов, Н.В. Хомченко, А.А. Арбатский; под ред. В.С. Глазова. – М.: Издательство МЭИ, 2017.
10. **Китаев, Б.И.** Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников и др.; под общ. ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1970.
11. **Dzyuzer, V.Ya.** Cooling of the gird of the melting tank of a glassmaking furnace / V.Ya. Dzyuzer // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No. 7. P. 280–283.
12. **Dzyuzer, V.Ya.** Calculation and design of glass melting tanks for glassmaking furnaces for container glass furnace / V.Ya. Dzyuzer // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. No. 11. P. 369–374.
13. **Dzyuzer, V.Ya.** Boundary conditions for heat transfer through glass furnace brickwork / V.Ya. Dzyuzer, V.S. Shvydkii, E.B. Sadykov // Glass and Ceramics. 2012. Vol. 69. No. 5–6. P. 163–167.
14. **Dzyuzer, V.Ya.** Energy-Efficient Cooling of Baddeleyite-Corundum in Glassmaking Furnaces / V.Ya. Dzyuzer // Glass and Ceramics. 2015. Vol. 72. No. 1–2. P. 24–26.
15. **Semenov, B. A.** Minimization of Specific Air Flows in Jet-Cooling Systems for Melting Tank Refractory Barriers in Glass Furnaces / B.A. Semenov, N.A. Ozerov // Glass and Ceramics. 2016. Vol. 72. P. 9–10.
16. **Semenov, B.A.** Indirect Determination of Real Heat-Emission Coefficients in Air-Cooling Systems of Operating Glass Furnaces / B. A. Semenov, N. A. Ozerov // Glass and Ceramics. 2018. Vol. 75. P. 1–2.
17. **Попов, С.К.** Решение задач высокотемпературной теплотехнологии в среде Mathcad / С.К. Попов, В.А. Ипполитов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

*В.А. Петров¹, В.Ю. Чайкин¹, Б.А. Христенко¹, И.Д. Савицкий¹, И.А. Султангузин¹,
Е.А. Демидов², А.Н. Нечаев³, А.В. Скоробатюк⁴*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Компания «Энергон», Москва, Россия,

³ ООО «ТНС», Москва, Россия,

⁴ ООО «НОВЫЙ ПОЛЮС», Москва, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

АННОТАЦИЯ

С принятием закона о микрогенерации было решено вывести энергоэффективный дом на нулевое энергопотребление с возможностью продавать избыточную электроэнергию в сеть. Основной целью работы является анализ и подбор оборудования для будущей инженерной системы. Будет рассмотрен вариант совместной установки воздушного и грунтового тепловых насоса, а также установка большего количества солнечных панелей и выбор между сетевыми и гибридными системами.

1. ВВЕДЕНИЕ

На данный момент в мире очень распространено строительство энергоэффективных домов. Одним из примеров этому является популярность строительства пассивных домов и домов с около нулевым энергопотреблением, основные критерии которых: удельный расход тепловой энергии на отопление ≤ 15 кВт·ч/(м²·год) с целью добиться 0 кВт·ч/(м²·год), общий расход первичной энергии также = 0 кВт·ч/(м²·год) за счёт использования возобновляемых источников энергии [1,2]. В нашей стране пока нет объектов, которые по всем критериям удовлетворяли бы стандарту домов с около нулевым энергопотреблением [3], но в некоторых новых зданиях уже используются принципы, компоненты и расчетные методики строительства энергоэффективных домов. На сегодняшний день, главной задачей является исследование уже готовых проектов, сближенных к пассивным домам и усовершенствование инженерной системы, чтобы вывести дом к показателю нулевого энергопотребления. Для этого требуется исследование и доработка инженерной системы с использованием возобновляемых источников энергии, используя тепловые насосы и солнечные батареи для выработки электрической энергии, которую будет потреблять система дома, а излишки продаваться в сеть.

2. РАЗВИТИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

Рассмотрим пример энергоэффективного дома, расположенного в Московской области, площадью 200м² в котором для повышения эффективности его систем применяются различные автоматизированные системы мониторинга, осуществляющие сбор различных параметров за продолжительный период для их анализа и самостоятельной корректировки параметров системы для её эффективной работы.

Дом оснащён тепловым насосом, солнечными коллекторами, солнечными батареями, механической вентиляцией с рекуперацией тепла, высокопроизводительными окнами, тёплым полом, тёплым потолком с функцией охлаждения летом и большим слоем изоляции. Инженерная система энергоэффективного дома представлена на рис. 1.

При строительстве дома было решено установить большое количество теплоизоляции, чтобы сохранялось, как можно больше тепла внутри дома зимой, математическая модель и расчеты по дому приведены в статье [4]. Так же были установлены тепловой насос и 4 солнечных коллектора для отопления дома. В 2017-2018 году отопление производилось радиаторами в подвале и потребляло много энергии, поэтому в январе 2018 года был запущен тёплый пол на 1 этаже и уже к 2019 году заработал тёплый потолок на втором этаже. Подробнее инженерная система энергоэффективного дома рассмотрена в работе [4]. Для контроля работы инженерной системы и перспективы её развития установили системы мониторинга, которые контролируют все параметры работы системы и считают потребление энергии домом, подробнее об этом написано в статье [6].

В данный момент происходит подбор воздушного теплового насоса для сравнения эффективности его работы с грунтовым тепловым насосом и большего количества солнечных батарей, чтобы вывести дом на нулевое энергопотребление с возможностью продажи избыточной электроэнергии в сеть.

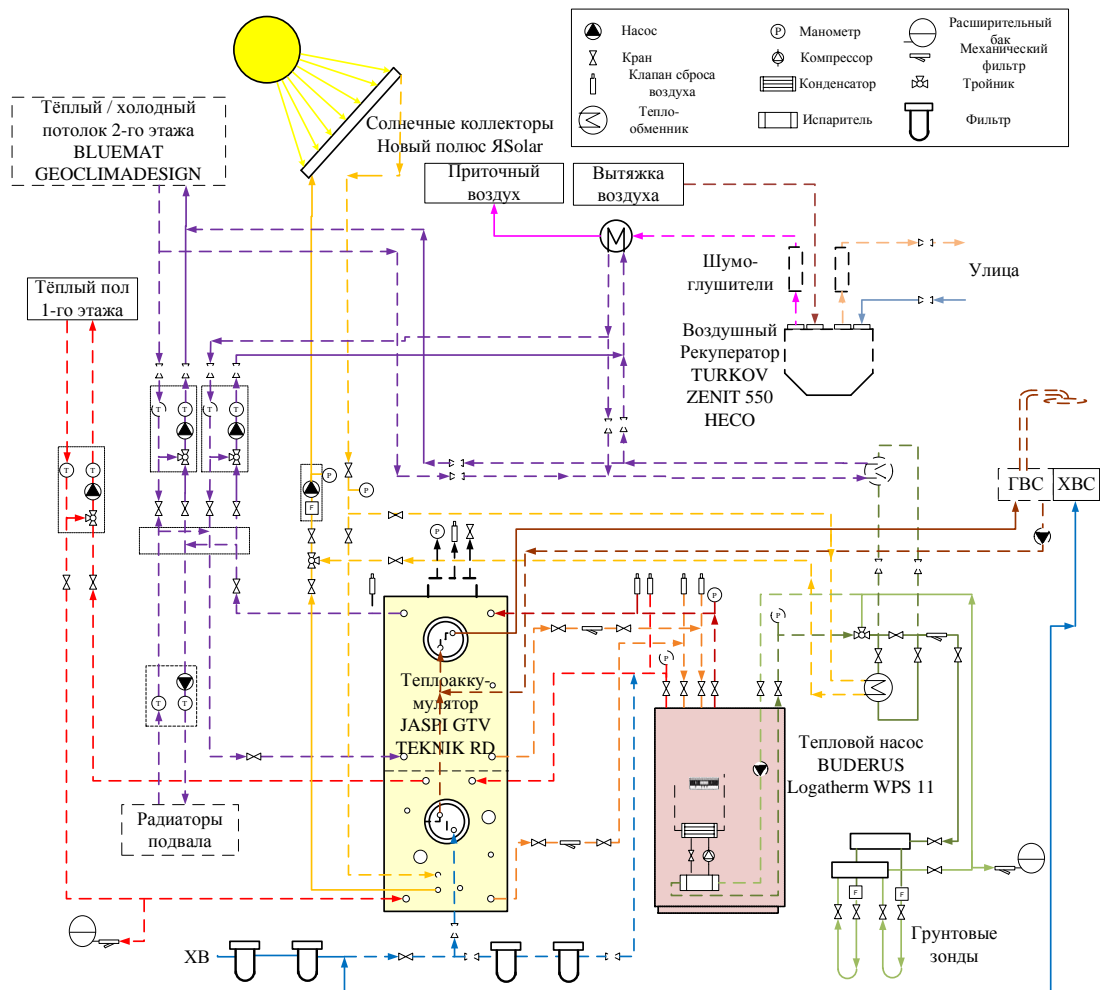


Рис.1 Инженерная система энергоэффективного дома

3. ЗАКОН О МИКРОГЕНЕРАЦИИ И ПОРЯДОК ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ ЛИЦАМИ

3.1. Закон о микрогенерации

27 декабря 2019 года был принят Федеральный Закон о внесении изменений в федеральный закон «об электроэнергетике» в части развития микрогенерации. В соответствии с ФЗ №35 "Об электроэнергетике" любой гражданин Российской Федерации или юридическое лицо, установивший солнечную электростанцию мощностью не превышающую 15 кВт, сможет отдавать излишки произведенной и не потреблённой электроэнергии в сеть, при этом сбытовая организация обязана будет купить данную электроэнергию.

Под объектом микрогенерации предлагается понимать принадлежащий на праве собственности или другом законном основании потребителю электроэнергии объект по производству электроэнергии, функционирующий, в том числе на основании использования возобновляемых источников энергии, установленная генерирующая мощность которого не превышает величину максимальной мощности энергопринимающих устройств такого

потребителя и составляет не более 15 кВт включительно. Технологическое подключение объектов микрогенерации может осуществляться к объектам электрического хозяйства не более 1 кВт.

3.2. Продажа электроэнергии

Генерация электроэнергии от солнечных батарей в дневное время будет направлена на собственное потребление домом, в случае избытка вся сгенерированная солнечная энергия будет направлена на продажу в централизованную сеть, при этом энергосбытовая компания будет обязана купить у собственника излишки электроэнергии.

Чтобы начать продажу электроэнергии нам необходимо приобрести и установить дополнительные солнечные батареи, обратиться в энергосетевую компанию для оформления технических условий и установить двухсторонний smart-счётчик, который будет считать отпущенную электроэнергию в сеть, а далее обратиться в энергосбытовую компанию для заключения договора на покупку электроэнергии.

Порядок заключения зелёного тарифа представлен на рис. 2.

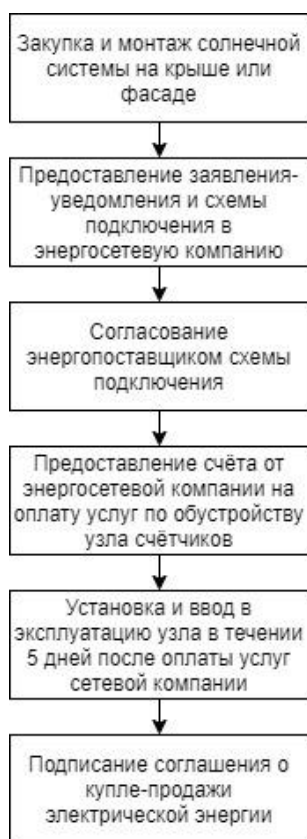


Рис.2. Порядок заключения зелёного тарифа

4. ВЫБОР МЕЖДУ СЕТЕВЫМИ И ГИБРИДНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ СИСТЕМАМИ

С Принятием закона о микрогенерации было решено поставить ещё 30 солнечных модулей на весь южный скат крыши дома, чтобы вывести дом на нулевое энергопотребление с возможностью продавать излишки в сеть.

На нашем объекте уже установлено 4 солнечных коллектора и 4 солнечных модуля, которые вырабатывают электроэнергию для отопления и собственных нужд, так что дом приблизился по показателю среднего удельного потребления электроэнергии дома в пересчёте на год равного 17.7 кВт*ч/м², который очень близок к показателю пассивного дома. Крыша дома позволяет поставить ещё 26 солнечных модулей (рис. 3), которые выведут его на нулевое энергопотребление с возможностью продажи избыточной электроэнергии.

В настоящее время на доме стоят 4 солнечные панели Delta BST 360-24 M, две из которых имеют систему охлаждения и две не охлаждаются. Развитие солнечной системы может предусматривать дополнительно установку таких же солнечных панелей 360 Вт или установить новые панели уже по 450 Вт. Так же перед нами стоит выбор между

двумя вариантами установки солнечных батарей, это классическая гибридная или сетевая, которая не накапливает электроэнергию, а отдаёт её напрямую потребителям в доме или в сеть.

К особенностям гибридных СЭС относится возможность не только сохранять электроэнергию для дальнейшего использования в накопителях, но и получать резервное питание от сети.

Уникальный функционал станций обеспечивается их составными элементами. В конструкцию СЭС входит гибридный инвертор, панели и аккумуляторы.

К сетевому инвертору подсоединяются модули, а к гибриднему дополнительно подключается электросеть и аккумуляторы. Инверторы для солнечной электростанции соединяются друг с другом через распределительный щит, который подаёт переменный ток прямо для потребления домом. Применение аккумуляторов в комплексе с гибридными инверторами обеспечивают основные плюсы СЭС:

- Позволяет экономить на потреблении электроэнергии;
- Функционирует при отсутствии напряжения в сети;
- Работает при перебоях в сети;
- Наличие нескольких режимов: автономного, смешанного и резервного;
- Высокая эффективность работы

Среди недостатков выделяют ограниченное количество техники, которую разрешается включить одновременно. Число устройств, которые можно запустить вместе, определяется возможностями мощностью гибридного инвертора.

Принцип выработки электричества сетевой СЭС аналогичный гибридным солнечным электростанциям. Основные различия между разными видами СЭС – это составляющие элементы и условия работы, которые приведены в таблице 1.

Обе СЭС используются для частных домов. Предпочтительней гибридную солнечную электростанцию купить предприятиям, которые функционируют круглосуточно. Но такая СЭС дороже и включает большое количество элементов.

Сетевая станция больше подходит для частных домов, работающих днем. Эта система дешевле гибридного варианта, проста в использовании, и достигает эффективности в 97 %.

Основной целью использования объекта микрогенерации, сетевой солнечной электростанции – это покрытие собственных потребностей в электроэнергии и продажи излишков в сеть.

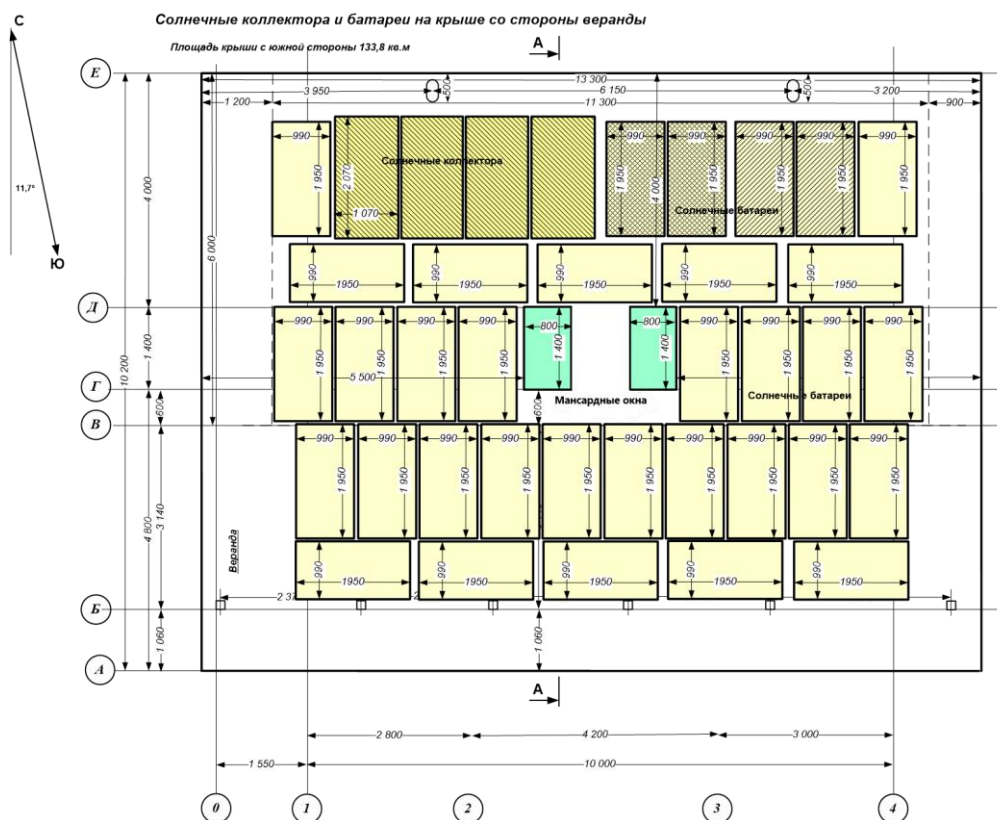


Рис.3. Солнечные батареи и коллектора на крыше с южной стороны дома.

Таблица 1. Сравнения сетевой и гибридной электростанции

Критерий оценки	Сетевая электростанция	Гибридная электростанция
Конструкция	Панель, инвертор.	Панель, гибридный инвертор, аккумуляторы.
Условия работы	Функционирует только при наличии доступа к электросети переменного тока, где напряжение должно соответствовать рабочим показателям инвертора.	Работа станции не зависит от сети. Пользователям доступны 3 режима работы СЭС.
Назначение	Используются для частных домов, дач, квартиры, коттеджей, предприятий, где нет необходимости в накоплении электроэнергии.	Применяются для частных домов, дач, офисов и прочих предприятий, где наблюдаются проблемы с подачей электропитания от сети. Также СЭС подходит для организаций, работающих круглосуточно.
Принцип действия	Электричество от панелей поступает к инвертору, где происходит преобразование постоянного тока в переменный.	Солнечные панели подсоединены к сетевому инвертору, а электросеть и аккумуляторы к гибриднему. Между собой инверторы соединены через распределительный щиток.

В данный момент дом питается электроэнергией от гибридных солнечных батарей и сети, которая регулируется по розничным тарифам. Тем не менее выгоднее ставить сетевую электростанцию, которая окупится в разы быстрее, чем тратиться на аккумуляцию и в случае неисправности и потери аккумулирующей способности, заменять аккумуляторы. Так же плюсом сетевой электростанции является возможностью её усовершенствования пу-

тём присоединения к ней литий-ионных аккумуляторов, тем самым сделав фотоэлектрическую систему гибридно-сетевой. Срок окупаемости сетевых электростанций составляет примерно 8 лет и сроком эксплуатации в 25 лет, по сравнению с окупаемостью гибридной СЭС 15 лет.

5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЁТ СЕТЕВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

5.1. Расчёт сетевой электростанции

Фотоэлектрическая система с номинальной мощностью 11,2 кВт будет подключена к трёхфазной электрической распределительной сети переменного тока 400В. Для того, чтобы наш объект микрогенерации соответствовал закону, будет установлена группа преобразователей: инвертор с полной выходной мощностью 15 кВт, подключенной в трёхфазную систему и 30 солнечных модулей, подключенных в 4 параллели, группа накопителей использоваться не будет.

Результаты расчёта гибридной и сетевой электростанции приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные результаты расчета

Параметр	Гибридная электростанция	Сетевая электростанция
Потребление нагрузкой всего, кВт·ч	10800	
Потребление из сети, кВт·ч	3346.0	5744.5
Потребление от солнца, кВт·ч	7454.0	5055.5
Экспорт электроэнергии, кВт·ч	12551.2	16175.9
% замещения потребляемой из сети ЭЭ	68.2	46.4

Учитывая параметры фотоэлектрического генератора и выбранного угла наклона 31°, можно рас-

считать итоговую генерацию электроэнергии без учета снежного покрова, которая представлена на рис. 4.

На основании данных по годовому потреблению, мы получаем, что потребляемая нагрузка домом составляет всего 10800 кВт, потребление из сети 5744.5 кВт, а потребление от солнца в данный период 5055.5 кВт. Из таблицы 2, мы получаем, долю экспортной электроэнергии составляет 16175.9 кВт, что составляет 46.4% замещения потребляемой из сети электроэнергии, а доля потребления выработанной энергии составляет 23.8%. Сокращение выбросов CO₂ за первый год эксплуатации составит 10615.7 кг., а за 25 лет 245703.9 кг, что существенно отразится на экологии городов, если большинство людей перейдут на потребление энергии от солнечных электростанций.

Суммарная стоимость оборудования солнечной сетевой электростанции будет составлять примерно 600 тыс. рублей. Стоимость электроэнергии из сети составляет 6 руб./кВт*ч, с ежегодным удорожанием на 5%, стоимость экспортируемой электроэнергии будет составлять 1 руб./кВт*ч, таким образом количество лет, необходимое для возврата первоначальных инвестиций через положительный годовой денежный поток: 14,6 лет. Положительный эффект от вложений составит: 806 642 руб. Средняя стоимость электроэнергии, выработанной сетевой солнечной электростанцией за 25 лет эксплуатации, составит 8.47 руб./кВт*ч. Таким образом электростанция окупит себя примерно через 15 лет и начнёт приносить доход.

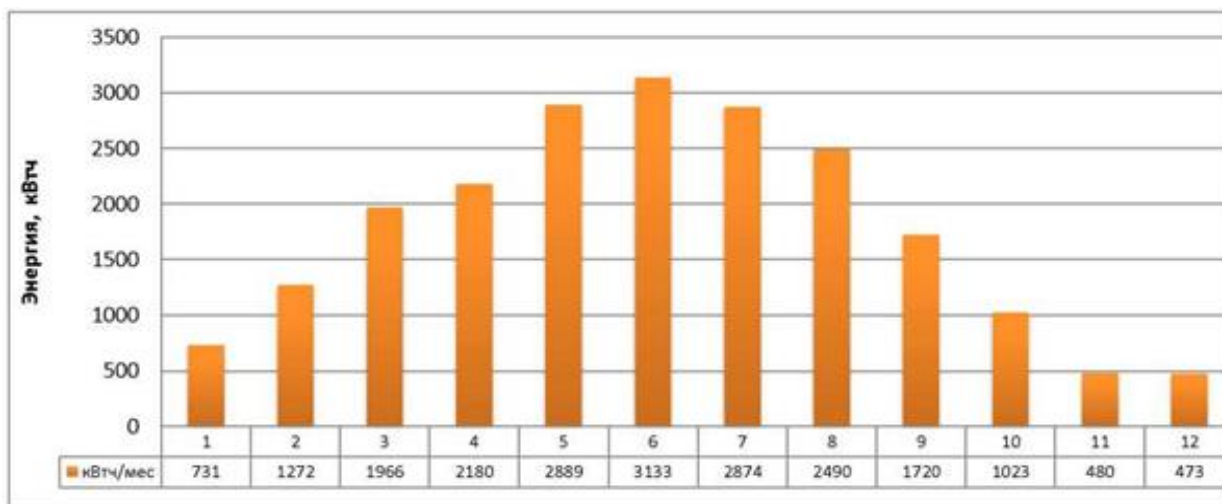


Рис. 4. Годовая производительность солнечной электростанции

5.2. Сравнительные данные по сетевому и гибричному варианту электростанции

При расчёте сетевой и гибридной электростанции мы получаем закономерность потребления энергии от гибридной электростанции больше, чем у сетевой. Потребление выработанной энергии у гибридной электростанции составляет 7454 кВт*ч, а у сетевой 5055 кВт*ч, это происходит за счёт аккумулярования энергии в батареях. Гибридная система производит 20005 кВт*ч в год, а сетевая 21231 кВт*ч, что значительно больше. При сравнении экспорта электроэнергии от гибридной электростанции мы получаем 12551.2 кВт*ч, а у сетевой электростанции этот показатель составляет 16175.9 кВт*ч, что даст нам большую прибыль при продаже электроэнергии.

Отличием гибридной от сетевой электростанции является приобретение дополнительно 8-ми аккумуляторов, которые в свою очередь составляют довольно крупную сумму, и более дорогой инвертор, который направлен как накопление энергии, так и на его отдачу. Таким образом мы получаем, что сетевая электростанция обходится нам в 600 тыс. рублей, а гибридная в целый 900 тыс. рублей, что на 300 тысяч больше. Но не смотря на более дорогое оборудование, гибридная электростанция окупит себя также через 15 лет, за счёт того, что замещение сетевого потребления составит 68.2% по сравнению с сетевой электростанцией 46.4%. Брав в расчёт перспективу развития закона о микрогенерации и совмещения сетевой электростанции с литийными аккумуляторами, мы получим гибридно-сетевую электростанцию, поэтому лучше устанавливать сетевую электростанцию.

6. ПОДБОР ВОЗДУШНОГО ТЕПЛОГО НАСОСА

Для исследования вопроса, какой тепловой насос более эффективен – грунтовый или воздушный, было решено приобрести в дополнение к грунтовому ещё один воздушный тепловой насос. Перед нами стоит выбор между компаниями Viessmann (Германия) и Chofu (Япония).

Требуется в период ночного тарифа выработать тепловым насосом типа «Воздух-Вода» тепловую мощность не менее 50 кВт*ч. Расчетная отопительная нагрузка энергоэффективного дома 3,5 кВт при температуре наружного воздуха -25 °С. В доме уже установлен тепловой насос BUDERUS Logatherm WPS 11, тепловая мощность которого составляет 10 кВт, у него установлено два грунтовых зонда по 60 м. глубиной, и он может работать только 50% ночного времени, чтобы не заморозить грунт. При расчете минимальной допустимой мощности воздушного теплового насоса при температуре уличного воздуха -7°С, мы получили необходимую тепловую мощность насоса, которая необходима нашей системе: 50 кВт*ч / 8 ч. = 6,25 кВт*ч.

Таким образом нашей системе нужен тепловой насос мощностью до 6 кВт, который мог бы работать в ночное время в некоторых режимах:

- Воздушный тепловой насос в диапазоне уличных температур $0 \pm 8^{\circ}\text{C}$;
- Вместе с грунтовым тепловым насосом в диапазоне уличных температур -20 - 0°С;
- Только грунтовый тепловой насос при уличной температуре ниже -20°С круглосуточно;

Так же предусмотрена возможность охлаждения системы летом, с номинальной мощностью 3 кВт. Тепловой насос будет работать в ночное время и охлаждать воду в буферной ёмкости, которая будет использоваться для охлаждения потолка и системы вентиляции в течение дня.

На данный момент рассматриваются две фирмы воздушных тепловых насосов Viessmann (Германия) и Chofu (Япония). Компания Chofu (Япония) предлагает тепловой насос марки Chofu AEYC7134SVFU с характеристиками 7.1/10.0 кВт при температуре источника 35/8°С и температуре подачи 18/35°С, который есть на складе и можно купить в данный период, так же есть возможность заказать тепловой насос марки AYEC-4037U (6kW), тепловая мощность которого при нагреве составляет 6 кВт и при охлаждении 4 кВт, что по всем параметрам подходит для нашей системы, но единственной загвоздкой является его отсутствие на Российских складах, этот тепловой насос можно приобрести только по предварительному заказу.

Компания Viessmann (Германия) предлагает тепловой насос марки Vitocal 100-S 101.B06, тепловая мощность которого в режиме нагрева составляет 6 кВт, а в режиме охлаждения 4,1 кВт, с возможностью регулирования мощности для нашего дома в режиме охлаждения от 2.6 до 6.4 кВт, то есть мы можем выставить необходимые нам из расчёта 3 кВт и экономить на электроэнергии и снизить нагрузку системы, что не позволяет нам сделать тепловой насос AYEC-4037U. Так же в Немецкой модели 101.B06 используется новый хладагент R32, который отличается низким парниковым потенциалом, таким образом способствует экологичности нового поколения тепловых насосов. Плюсом теплового насоса Vitocal 100-S 101.B06 является то, что у него есть встроенный подогреватель поддона наружного блока, который предотвращает замерзание конденсата в зимний период, поэтому систему можно эксплуатировать при отрицательных температурах до -20 °С. Еще одной особенностью теплового насоса является возможность его комплектации дополнительным модулем Active Cooling, благодаря которому агрегат может выполнять функцию системы охлаждения в теплое время года при температуре наружного воздуха до +45°С. Это делает Vitocal 100-S еще более выгодным для пользователя, поскольку экономит затраты на приобретение кондиционера. Ещё рассматривается вариант теплового насоса марки Vitocal 200-S AWB 201.B04. Номинальная тепловая мощность на обогрев которого составляет 4.5 кВт и на охлаждение 4.2 кВт без возможности регулирования. Так как наш энергоэффективный дом находится в Московской области, и наибольшая средняя температура воздуха равна

25°C и наш воздушный тепловой насос будет работать, только в ночное время суток 8 часов, то выбрать стоит по минимальному потреблению энергии. Нашей системе подходит воздушный тепловой марки Vitocal 100-S 101.B06 от Немецкой компании Viessmann, который по сравнению с Японским Chofu и моделью Vitocal 200-S AWB 201.B04 имеет преимущество по потреблению энергии в режиме охлаждения с регулированием мощности в 3 кВт, который необходим нам по нашему расчёту, а также используется хладагент нового поколения R32, который намного экологичнее R410A, используемого тепловыми насосами компании Chofu и моделью Vitocal 200-S AWB 201.B04. У каждого варианта есть свои плюсы и недостатки, выбор конечного варианта зависит от многих факторов, в том числе и от цены.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была рассмотрена актуальность принятия закона о микрогенерации, её стимулирования государством и порядок заключения зелёного тарифа для физических лиц. Было решено поставить дополнительно 26 солнечных батарей на крышу дома, а также на перспективу развития инженерной системы, мы проанализировали выбор предложенных нам вариантов воздушных тепловых насосов.

С принятием закона о микрогенерации была рассмотрена возможность установки одного из двух вариантов солнечной электростанции: гибридной или сетевой. Проанализировав оба варианта, мы предпочли выбрать сетевую электростанцию с перспективой развития в гибридно-сетевую путём установки литийонных батарей, потому что гибридная электростанция предусматривает собой более дорогое оборудование с установкой свинцовых аккумуляторов, которые со временем теряют свою аккумуляторную способность и выходят из строя, что в течение эксплуатации инженерной системы добавят дополнительные траты на замену батарей, которые в свою очередь очень дорогие. Мы доказали, что сетевая электростанция намного перспективнее гибридной и имеет массу плюсов, так и минусов для установки в частном доме. Произвели предварительный расчёт сетевой электростанции, который показал потребление инженерной системы в целом и возможность продажи избытков электрической энергии намного больше, чем у гибридного варианта, таким образом возможен вариант продажи электроэнергии в сеть сетевой электростанцией всё лето, что дому не придётся потреблять электроэнергию из сети и компенсировать это зимой покупкой электроэнергии из сети, когда будет не солнечные дни, но не

стоит забывать, что в зимние солнечные дни фотоэлектрические батареи вырабатывают больше энергии, чем в летние жаркие дни, поэтому зимой также будет осуществляться продажа электроэнергии в сеть. Таким образом проведя расчёт мы увидели, что сетевая электростанция окупит себя через 15 лет и начнет приносить существенный доход по сравнению с гибридной электростанцией.

Анализ воздушных тепловых насосов показал нам плюсы и минусы установки предложенных нам моделей. Компании Viessmann, марки Vitocal 100-S 101.B06 имеет большее преимущество, так как даёт возможность регулирования теплой и охлаждающей мощности, которую будет потреблять система в ночное время суток, а также там используется фреон нового поколения R32, который намного экологичнее R410A используемого в аналогичных тепловых насосах. Рассмотренные аналоги тоже подходят к нашей системе, но имеют недостаточную мощность, поэтому в лучшем случае будет сделать выбор в пользу компании Viessmann, так как её тепловые насосы есть на рынке и идеально подходят для работы нашей инженерной системы в летний и зимний период, но опять же все будет зависеть от многих факторов и выбор будет производиться по стоимостным предложениям.

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. Филипенко, журнал «Архитектура и строительство» 1/2014.
3. **Hill B.** Passive house development in Russia // III World Summit SmartEnergy Russia. 26-27 March 2019, Moscow. 95 p.
4. **Sultanguzin I., Toepfer H., Kalyakin I., Govorin A., Zhigulina E., Kurzanov S., Yavorovsky Yu.** Mathematical modeling and control system of nearly zero energy building // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2018. No.2. P. 21 – 24.
5. **Султангузин И.А., Кругликов Д.А., Яцюк Т.В. и др.** Применение BIM, BEM и CFD технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // С.О.К. Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. №3. С. 36 – 42
6. **Петров В.А. Чайкин В.Ю. Султангузин И.А.** Разработка и использование систем мониторинга для анализа энергоэффективного дома. // 21-я конференция «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». Магнитогорск 2020.
7. **Bacher P., Madsen H., Aalborg Nielsen H., Perers B.** Short-term heat load forecasting for single family houses. // Energy and Buildings. Vol. 65, October 2013, P. 101-112.

М.О. Пузин, Е.В. Цепляева, М.В. Горелов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗАГОРОДНОГО ДОМА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена сравнению различных вариантов автономного теплоснабжения загородного дома. В работе выполнен расчёт нагрузок на системы отопления и горячего водоснабжения (ГВС) одноэтажного здания, расположенного в Московской области, рассмотрены три альтернативные системы автономного теплоснабжения, источником теплоты в которых являлись электрический, твердотопливный котлы и котел, работающий на пропан-бутановой смеси. Сделаны выводы о целесообразности использования того или иного источника теплоты на основании экономических и эксплуатационных показателей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Теплоснабжения большинства загородных домов сельских поселений России осуществляется за счет централизованного газоснабжения. Однако на 1 января 2020 года уровень газификации природным газом составляет 70,1 %, в том числе в городах и поселках городского типа — 73 %, в сельской местности — 61,8%. [1]. Поэтому теплоснабжение негазифицированных территорий за счет автономных источников является актуальной и важной задачей, которая стоит перед собственниками загородных домов.

2. ТЕПЛОВАЯ НАГРУЗКА СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ И ГВС

В качестве объекта исследований был рассмотрен одноэтажный дом из бруса площадью 113,4 м² с неотапливаемым чердаком, без подвала. Дом в плане представляет собой правильный прямоугольник с размерами 12,4x8,8 м. Теплотехнические характеристики наружных ограждающих конструкций представлен в таблице 1.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики наружных ограждающих конструкций

№	Наименование ограждения	Приведенное сопротивление теплопередаче, (м ² ·°С)/Вт
1.	Наружная стена	1,3
2.	Внутренняя стена	1,3
3.	Покрытие	1,95
4.	Окно	0,71
5.	Дверь	0,2
6.	Пол на лагах: I зона	4,28
	II зона	7,12
	III зона	12,19

Для определения тепловой мощности системы отопления загородного дома был составлен тепловой баланс:

$$Q_{от} = k \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot (Q_{огр} + Q_{инф} - Q_{быт}), \quad (1)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий (при определении тепловой мощности системы отопления в целом) дополнительные теплопотери, связанные с охлаждением теплоносителя в магистралях, проходящих в неотапливаемых помещениях; β_1 – коэффициент учета дополнительного теплового потока отопительных приборов за счет округления их площади сверх расчетной величины; β_2 – коэффициент учета дополнительных потерь теплоты приборами, расположенными у наружных ограждений; $Q_{огр}$ – теплопотери через наружные ограждения (трансмиссионные тепловые потери), Вт; $Q_{инф}$ – расход теплоты на нагрев поступающего в помещение наружного воздуха, Вт; $Q_{быт}$ – бытовые теплопотупления, Вт.

Теплопотери через наружные ограждения определялись по формуле:

$$Q_i = \frac{A_i}{R_{OK,i}} \cdot (t_b - t_n) \cdot n_i \cdot \left(1 + \sum \beta_i\right), \quad (2)$$

где A_i – площадь ограждения, м²; t_n , t_b – расчетные температуры наружного и внутреннего воздуха, °С; n_i – коэффициент, учитывающий фактическое понижение расчетной разности температур для ограждений, которые отделяют отапливаемые помещения от неотапливаемых (подвал, чердак и др.); β_i – коэффициент, учитывающий дополнительные тепловые потери через ограждения.

Расход теплоты на нагрев поступающего в помещение наружного воздуха определялся по формуле:

$$Q_{инф} = 0,28 \cdot L_{вент} \cdot \rho_n \cdot (t_b - t_n) \quad (3)$$

где $L_{вент}$ – расчетный расход воздуха, удаляемый системой вытяжной вентиляцией, м³/ч. Для жилых зданий удельный расход воздуха нормируется в размере 3 м³/ч на 1 м² площади жилых помещений и кухни [2].

Теплопотуплений в комнатах и кухне были приняты не менее $Q_{быт} = 10$ Вт/м² [2].

Суммарный тепловые потери дома составили 12,45 кВт. Мощность системы отопления, определенная по формуле (1), составила 13,3 кВт. Произведение коэффициентов k , β_1 , β_2 в расчете был принят 1,07, т.к. согласно [3] суммарная величина до-

полнительных тепловых потерь должна быть не более 7 % тепловой мощности системы отопления.

Расчет максимальной нагрузки на горячее водоснабжение выполнено для двух периодов: зимнего и летнего. Сначала была определена средние нагрузки на ГВС.

Средняя нагрузка на ГВС для зимнего и летнего периодов соответственно:

$$Q_{ГВЗ}^{ср} = \frac{1,2 \cdot M \cdot (a_{ГВ} + b_{ГВ}) \cdot C_{в} \cdot (t_{ГВ} - t_{ХВЗ})}{24 \cdot 60 \cdot 60} \quad (4)$$

$$Q_{ГВЛ}^{ср} = \frac{1,2 \cdot M \cdot (a_{ГВ} + b_{ГВ}) \cdot C_{в} \cdot (t_{ГВ} - t_{ХВЛ})}{24 \cdot 60 \cdot 60} \quad (5)$$

где $a_{ГВ}$ – норма расхода горячей воды в сутки на 1 человека для жилых зданий ($a_{ГВ} = 65$ л/сут·чел [4]); $b_{ГВ}$ – норма расхода горячей воды в сутки на 1 человека для общественных зданий, общественных зданий, л/(сут·чел); M – количество потребителей воды, проживающих в здании, чел ($M = 4$ чел); $t_{ГВ}$ – температура горячей воды, °С ($t_{ГВ} = 55$ °С); $t_{ХВЗ}$ – температура холодной воды для зимнего периода, °С ($t_{ХВЗ} = 5$ °С); $t_{ХВЛ}$ – температура холодной воды для летнего периода, °С ($t_{ХВЛ} = 15$ °С); $C_{в}$ – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С) ($C_{в} = 4,19$ кДж/(кг·°С)).

Средняя нагрузка на ГВС для зимнего периода составляет 0,757 кВт, а для летнего периода – 0,605 кВт

Максимальная нагрузка на ГВС:

$$Q_{ГВЗ}^p = K_{ч}^{max} \cdot Q_{ГВЗ}^{ср} \quad (6)$$

$K_{ч}^{max}$ – коэффициент часовой неравномерности. Для жилых зданий принимается в диапазоне от 2,2 до 2,4 (в настоящем расчете использовано значение «2,3»).

Максимальная нагрузка на ГВС, определенная по большей средней нагрузке, составила 1,74 кВт.

Суммарная тепловая нагрузка на источник теплоты для рассмотренного загородного дома составила 15,1 кВт.

3. ПОДБОР ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Подбор радиаторов отопления

Для рассмотренных трех альтернативных источников теплоснабжения были подобраны котлы, дополнительное оборудование (при необходимости), отопительные приборы, трубопроводы, циркуляционные насосы.

Система отопления – лучевая радиаторная. В качестве отопительных приборов использованы радиаторы биметаллические «Сантехпром БМ» с термостатами фирмы «Danfoss». Подвод и отвод теплоносителя к радиаторам осуществляется по стальным сварным газопроводным трубам диаметром $D_y = 15$ мм, $D_y = 20$ мм. Трубопроводы проложены открыто.

Основные технические характеристики секции биметаллического радиатора приведены в таблице 2.

Расчет и подбора радиаторов отопления проводился для каждого помещения отдельно.

В задачу расчета отопительных приборов входит определение поверхности нагрева и числа секций прибора. Исходными данными при расчете прибо-

ров являлись тепловая нагрузка прибора и расчетные температуры горячей и обратной воды.

Таблица 2. Технические характеристики секции радиатора РБС-500

№	Наименование показателя	Значение
1.	Монтажная высота H_M , мм	500
2.	Высота H , мм	578
3.	Глубина B , мм	100
4.	Длина l_c	80
5.	Номинальный тепловой поток $q_{ну}$ (с учётом эксплуатационных испытаний), кВт	0,195
6.	Площадь наружной поверхности f_c , м ²	0,48
7.	Коэффициент теплопередачи при нормальных условиях $K_{нв}$, Вт/(м ² ·°С)	5,8
8.	Масса (без учёта массы пробок), не более, кг	2,7
9.	Удельная масса (без учёта массы пробок), не более, кг/кВт	13,85
10.	Объём воды, л	0,23

Расход теплоносителя (воды) через радиатор, кг/с:

$$G_{пр} = \frac{Q_{п}}{c \cdot (t_{вх} - t_{вых})} \quad (7)$$

где $Q_{п}$ – тепловая нагрузка отопительного прибора, Вт; $t_{вх}$ – температура воды на входе, $t_{вх} = 95$ °С; $t_{вых}$ – температура воды на выходе, $t_{вых} = 70$ °С.

Тепловой поток радиатора в расчетных условиях определяется по формуле:

$$Q_{пр} = Q_{деф} - Q_{тр.п} \quad (8)$$

где $Q_{деф}$ – дефицит теплоты в помещении (разность тепловых потерь и поступлений теплоты), Вт. Поступления теплоты учитываются в расчёте только для одного из радиаторов; $Q_{тр.п}$ – полезный тепловой поток от теплопроводов (труб), Вт

Полезный тепловой поток теплопроводов был принят равным 90% от общей теплоотдачи труб, т.к. трубопроводы проложены у наружных стен:

$$Q_{тр.п} = 0,9 Q_{тр} \quad (9)$$

$$Q_{тр} = q_{тр.в} \cdot L_{тр.в} + q_{тр.г} \cdot L_{тр.г} \quad (10)$$

$q_{тр.в}$ и $q_{тр.г}$ – тепловые потоки 1 м открыто проложенны соответственно вертикальных и горизонтальных гладких труб, Вт/м; $L_{тр.в}$ и $L_{тр.г}$ –общая длина соответственно вертикальных и горизонтальных теплопроводов, м.

Тепловой поток открыто проложенных горизонтальных труб, расположенных в нижней части помещения, принимается в среднем в 1,28 раза больше, чем вертикальных.

Расход воды через прибор с учётом того, что стоит термостат *RTD-G* фирмы «Danfoss» на подводке к прибору:

$$G_{п} = \alpha_{пр} \cdot G_{пр} \quad (11)$$

где $\alpha_{пр}$ – коэффициент затекания, принимается в зависимости от термостата.

Перепад температур теплоносителя между входом в отопительный прибор и выходом из него $\Delta t_{пр}$, °С определялся по формуле (12):

$$\Delta t_{пр} = \frac{Q_{пр}}{C_{в} \cdot G_{п}} \quad (12)$$

Температурный напор Δt_{cp} , °С, определялся по формуле (13):

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_{вх} + t_{вых} - t_{в}}{2} \quad (13)$$

$t_{в}$ – температура внутреннего воздуха помещения, °С.

Требуемый тепловой поток отопительного прибора при нормальных условиях, Вт:

$$Q_{ну} = \frac{Q_{пр}}{\varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot b} \quad (14)$$

где φ_1 – безразмерный поправочный коэффициент, с помощью которого учитывается изменение теплового потока отопительных приборов при отличии расчётного температурного напора от нормального; φ_2 – безразмерный поправочный коэффициент, с помощью которого учитывается изменение теплового потока отопительного прибора при отличии расчётного массового расхода теплоносителя от нормального с учётом схемы движения теплоносителя; b – безразмерный поправочный коэффициент на расчётное атмосферное давление;

Исходя из полученного значения $Q_{ну}$ было определено количество секций N в приборе по формуле:

$$N = \frac{Q_{ну}}{q_{ну}} \quad (15)$$

В результате расчета суммарное количество секций радиаторов РБС-500 для здания составило 52 штуки.

3.2. Источники теплоснабжения

В качестве источника теплоснабжения для загородного дома были рассмотрены три котла: электрический, твердотопливный на пеллетах и котел, работающий в совокупности с газгольдером (автономная газификация).

Котлы были выбраны для покрытия нагрузки системы отопления и ГВС с запасом.

В качестве электрического котла был выбран котел «Stout». Краткие технические характеристики котла представлены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики котла «Stout»

№	Наименование показателя	Значение
1.	Максимальная мощность, кВт	18
2.	Площадь отапливаемого помещения, м ²	180
3.	Максимальная температура теплоносителя, °С	85
4.	КПД, %	не менее 95
5.	Наличие насоса	да

В качестве твердотопливного котла был выбран котел «Metal-Fach SMART PELLEТ», который может работать на пеллетах, угле и дровах. Краткие технические характеристики котла представлены в таблице 4.

В система автономной газификации был выбран газовый котел «Rinnai RB-137», который работает на

природном и сжиженном газе. Краткие технические характеристики котла представлены в таблице 5.

Таблица 4. Технические характеристики котла «Metal-Fach SMART PELLEТ»

№	Наименование показателя	Значение
1.	Максимальная мощность, кВт	20
2.	Площадь отапливаемого помещения, м ²	200
3.	Максимальная температура теплоносителя, °С	85
4.	КПД, %	до 90
5.	Наличие насоса	нет

Таблица 5. Технические характеристики котла «Rinnai RB-137»

№	Наименование показателя	Значение
1.	Максимальная мощность, кВт	15,1
2.	Площадь отапливаемого помещения, м ²	150
3.	Максимальная температура теплоносителя, °С	85
4.	КПД, %	до 96,7
5.	Наличие насоса	нет

3.3. Вспомогательное оборудование

Система радиаторного отопления в рассмотренном здании не зависела от источника теплоснабжения и была одинаковой для всех рассмотренных вариантов.

Для циркуляции теплоносителя в системе отопления был подобран циркуляционный насос «Wilо» для схем с пеллетным котлом и котлом, работающим на пропан-бутановой смеси.

Для системы автономной газификации было подобрано основное оборудование: газгольдер, объем которого составил 4,85 м³; основание газгольдера; запорно-регулирующая арматура и трубопроводы.

4. СРАВНЕНИ КАПИТАЛЬНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Для сравнения трех альтернативных схем теплоснабжения загородного дома была определена средняя нагрузка на системы отопления и ГВС. По средней нагрузке определен расход топлива (пеллеты и пропан-бутановой смеси) и количество потребленной электроэнергии.

В капитальные затраты для системы автономной газификации входили: стоимость котла (39,12 тыс. руб.), дополнительное оборудование и работы на обустройство системы (240 тыс. руб.), радиаторы (130,8 тыс. руб.), трубопроводы системы отопления (6,3 тыс. руб.), насос (10,3 тыс. руб.). Итоговые капитальные затраты на возведение системы отопления с котлом, работающем на пропан-бутановой смеси, составили 426,6 тыс. руб.

В капитальные затраты для системы автономного теплоснабжения на базе пеллетного котла входили: стоимость котла (190 тыс. руб.), радиаторы (130,8 тыс. руб.), трубопроводы системы отопления (6,3 тыс. руб.), насос (10,3 тыс. руб.). Итоговые капитальные затраты на возведение системы отопления с пеллетным котлом составили 337,4 тыс. руб.

В капитальные затраты для системы автономного теплоснабжения на базе электрического котла входили: стоимость котла (44,8 тыс. руб.), радиато-

ры (130,8 тыс. руб.), трубопроводы системы отопления (6,3 тыс. руб.). Итоговые капитальные затраты на возведение системы отопления с электрическим котлом составили 192,2 тыс. руб.

По капитальным затратам теплоснабжение от электрического котла имеет преимущества по сравнению с другими вариантами. Поэтому необходимо также рассмотреть и эксплуатационные затраты для каждого варианта теплоснабжения загородного дома.

В эксплуатационные затраты были включены стоимость электроэнергии при использовании электродкотла, стоимость топлива (пеллеты и пропан-бутановая смесь) и его доставки, затраты электроэнергии на циркуляцию теплоносителя. Минимальные эксплуатационные затраты среди рассмотренных вариантов получились у твердотопливного котла, которые составили 68,2 тыс. руб./год. Максимальные эксплуатационные затраты – электрический котел, 168,3 тыс. руб./год. Затраты на эксплуатацию системы автономной газификации – 128,8 тыс. руб./год.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные варианты теплоснабжения загородного дома способны обеспечить комфортные условия проживания в отопительный период при отсутствии централизованного газоснабжения. Все рассмотренные источники теплоты имеют необходимые средства автоматизации и не требуют постоянного пребывания человека.

Наименьшие суммарные затраты для теплоснабжения загородного дома получены для твердотопливного котла, однако для работы указанного котла

необходим запас топлива. Пеллеты должны храниться в отдельном сухом помещении для поддержания их качества. Загрузка бункера котла производится вручную примерно один раз в десять суток, необходимо регулярное золоудаление.

Система автономной газификации не требует действий со стороны собственника, техническое обслуживание и заправку газгольдера производит специализированная организация.

Эксплуатация электродкотла не требует действий со стороны пользователя и привлечения специализированных организаций, услуги которых необходимо оплачивать.

Среди рассмотренных вариантов наиболее конкурентоспособной является схема теплоснабжения загородного дома с использованием пеллетного котла, т.к. суммарные затраты минимальны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Газификация регионов России:** [Электронный ресурс] //ООО «Газпром межрегионгаз». URL: <https://mrg.gazprom.ru/about/gasification/>. (Дата обращения: 01.06.2020).
2. **Сканави А. Н.,** Махов Л. М. Отопление. Учебник для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 576 с.
3. **СП 60.13330.2016** Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (с Изменением N 1). – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018.
4. **СП 30.13330.2016** Внутренний водопровод и канализация зданий. Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85* (с Поправкой, с Изменением N 1). М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2018.

*М.С. Пурдин*Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия**МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В
АККУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОТЫ С МНОЖЕСТВОМ ФАЗ И
СВОБОДНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ФАЗОВЫХ ГРАНИЦ****АННОТАЦИЯ**

Разработан и представлен численный метод моделирования теплообмена в аккумуляторах теплоты с множеством фаз и свободным перемещением фазовых границ, основанный на неявной безусловно устойчивой схеме. Проведено исследование устойчивости неявной численной схемы для аппроксимации уравнения энергии. В качестве примера рассмотрен и сопоставлен с результатами расчетов другого автора процесс затвердевания отливки цинка толщиной 10 см.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема аккумуляции тепловой энергии с помощью фазового перехода является одной из важнейших в настоящее время. Ее решение осложнено множеством различных условий, режимных параметров и состояний вещества. Одним из первых затвердевания круглой капли жидкости было исследовано Lame еще в 1831 г. [1].

До сих пор большое количество научных трудов посвящено проблемам теплообмена при фазовых переходах и с течением времени увеличивается. Это можно оценить по количеству международных публикаций. Наиболее значительной считается статья Стефана [2] в которой предложено решение задачи о плавлении льда в северном ледовитом океане. Она получила в последующем название «задача Стефана». Число международных публикаций, сославшихся на эту статью, за 2016 и 2017 года составило примерно по 50, а за 2018 и 2019 год – по 60, а общее число публикаций составляет порядка 900. Таким образом интерес к классу задач о теплообмене при фазовых переходах неуклонно растет.

Решение данного класса задач позволяет спрогнозировать не только плавление льда в океане, но и исследовать теплообмен в грунте [3], при отливке металлов и 3D печати [4], а также работу аккумуляторов теплоты. В частности, биологические исследования показывают [5], что промерзание грунта приводит к отмиранию мелкой корневой системы деревьев, что сказывается на активности роста лесных массивов. В целом класс задач крайне широк и их решение может значительным образом повлиять на эффективность использования энергии. Наибольший эффект может оказать применение аккумуляторов теплоты при потреблении энергии. Известно, что график потребления тепловой и электрической энергии неравномерный в силу перио-

дичности сезонов и суточной деятельности человека. Аккумуляция энергии у потребителя в периоды времени с минимальной нагрузкой источника энергии и расходование ее в периоды пиковых нагрузок позволяет снизить неравномерность нагрузки на источник, уменьшить его установленную мощность и цену выработанной энергии. В качестве меры стимуляции уже приняты меры по многотарифному учету электроэнергии во многих странах. Это позволяет потребителю рентабельно использовать аккумуляторы теплоты для отопления, запасая энергию ночью. Достаточно объемный современный обзор практического применения, методов аккумуляции и методов расчета теплообмена при фазовых переходах сделан в обзорной статье [6].

Экспериментальные исследования не представляют большой трудности, однако для предсказания и обобщения результатов исследований необходимо использовать расчетные исследования, что требует поиска единой методики, хорошо подходящей для всех случаев. Для расчета и проектирования систем с фазовым переходом требуется определение поля температур в веществе, границ областей с фазовыми переходами и изменение их во времени. Один из корректных методов численного решения задачи о фазовом переходе изложен в [7].

Теплообмен при фазовых превращениях является нестационарным процессом, в котором происходит изменение фазового состояния вещества и перемещение границ раздела фаз. Последнее сильно осложняет задачу, так как требуется решить уравнение перемещения этих границ. На них располагается граничное условие для уравнения энергии. Нестационарные процессы на практике не имеют постоянного граничного условия, т.е. температура на границах расчетной области может изменяться и быть в разные моменты времени как выше, так и ниже температуры фазового перехода. Это означает, что в общем случае зон фаз в рассматриваемой области может быть неограниченно много и решение такой задачи способом, изложенным в [7], становится невозможно, как и поиск установившегося во времени решения с периодически изменяющимися граничными условиями. Кроме того, может быть также множество фазовых состояний вещества, что дополнительно осложняет задачу.

Задачи о фазовых переходах можно классифицировать по следующим признакам: число фаз веще-

ства (две, три и более), число границ раздела фаз в расчетной области (одна, две и более), система координат (прямоугольная, цилиндрическая, сферическая), число измерений (одно, два или три), наличие внутренних источников теплоты, граничные условия. Граничные условия можно классифицировать по роду и заданному закону нестационарной зависимости. Так как результат решения многих нестационарных задач можно представить в виде набора гармонических решений, то наибольший интерес представляет постановка установившейся в периоде задачи. Как один из предельных случаев следует также рассмотреть переходную задачу.

Ранее в работе [8] рассмотрен корректный метод решения задачи о фазовых переходах первого рода, называемый энтальпийным [9], и показано, что применение классической разностной схемы позволяет решить задачу только явным условно устойчивым методом, что часто неудобно и затратно. В настоящей работе предложен корректный неявный метод численного моделирования установившегося в периоде теплообмена с множеством границ фазовых переходов в расчетной области и множеством фаз.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теплопередача в аккумуляторе теплоты при отсутствии конвекции в одномерном случае для цилиндрической и прямоугольной систем координат описывается линейным параболическим дифференциальным уравнением энергии

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{x^k} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^k \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где T – температура, К; t – время, с; x – координата, м; c_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); $k \in \{0, 1\}$ – коэффициент, позволяющий выбрать систему координат; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³.

Анализ видов дифференциального уравнения энергии для решения задачи о фазовых переходах проведен в [8]. На основе этого анализа уравнение энергии следует записать в следующем виде:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho x^k} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^k \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где h – энтальпия, Дж/кг. Такой вид позволяет определить изменение энтальпии вещества во времени и не требует определения границ фазовых переходов во время решения.

Решение уравнения (1) не учитывает особенностей фоновой передачи теплоты через молекулярную структуру вещества и соответствует теории сплошной среды, поэтому с его помощью можно решать задачи роста кристаллов со строгой ориентацией без дефектов, задачи с чисто случайной ориентацией молекул, задачи, когда количество дефектов велико и расстояния между ними значительно меньше любых других масштабов. Так как в такой постановке не обязательно устанавливать положение границ раздела фаз, то становится возможным решение задач с множеством таких границ. Эта постановка задачи позволяет моделировать энантиотропные переходы между аллотропными состояниями вещества. При некоторых модификациях и дополнениях математической модели можно решать

задачи монотропных превращений, таких, например, как разрушение кристаллической решетки белого олова и переход в серое.

Для замыкания системы уравнений следует описать зависимость температуры от энтальпии. Качественный пример такой зависимости с двумя фазовыми переходами изображен на рис. 1.

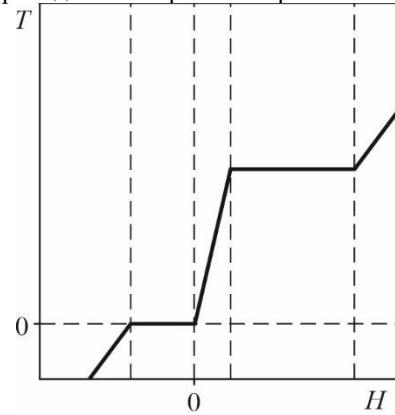


Рис. 1. Зависимость температуры вещества от энтальпии.

Любую такую зависимость можно разбить на участки и сопоставить каждому диапазону линейную функцию:

$$\left\{ \begin{array}{l} h < h_{s1} \rightarrow T(h) = \frac{1}{c_{p0}} h + b_0 \\ h_{s1} \leq h \leq h_{s2} \rightarrow T(h) = \frac{1}{c_{p1}} h + b_1 \\ \dots \\ h_{s(n-1)} \leq h \leq h_{sn} \rightarrow T(h) = \frac{1}{c_{p(n-1)}} h + b_{n-1} \\ h > h_{sn} \rightarrow T(h) = \frac{1}{c_{pn}} h + b_n \end{array} \right. , \quad (2)$$

где b – коэффициент линейного уравнения, К; h_s – величина энтальпии перехода вещества из одного в другое состояние, n – число переходов между фазами. Величину коэффициента b можно определить по значению частной зависимости при $h = 0$. В данном случае под фазой понимается не только аллотропное состояние вещества, но и состояние вещества, находящегося в процессе превращения, то есть при плавлении и кристаллизации, испарении и конденсации и т.п. Очевидно, что в состоянии превращения теплоемкость вещества $c_p \rightarrow \infty$, коэффициент b принимает значение температуры насыщения, а теплота фазового перехода r принимает некоторое значение. Вне состояния превращения теплоемкость c_p и коэффициент b принимают некоторые значения, а теплота фазового перехода $r = 0$.

Зависимость (2) является монотонной, непрерывной и состоит из линейных отрезков, поэтому её можно представить в виде монотонной непрерывной кусочно-линейной формулы

$$T(h) = \frac{\frac{1}{c_{p0}} + \frac{1}{c_{pn}}}{2} h + \frac{b_0 + b_n}{2} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{1}{c_{pi}} - \frac{1}{c_{p(i-1)}}}{2} |h - h_{si}| \right).$$

Для большей общности получаемых решений и уменьшения числа влияющих параметров необходимо привести ее к безразмерному виду.

$$\mathcal{G}(H) = \gamma_0 H + \mathcal{G}_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i |H - H_{si}|), \quad (3)$$

где $H = \frac{h}{\sum_{i=0}^n (r_i)}$ – безразмерная энтальпия,

$\mathcal{G} = \frac{T}{\sum_{i=0}^n (r_i) \sum_{i=0}^n (1/c_{pi})}$ – безразмерная температура, r –

теплота фазового перехода, Дж/кг,

$$\mathcal{G}_0 = \frac{T_{s0} + T_{sn}}{2 \sum_{i=0}^n (r_i) \sum_{i=0}^n (1/c_{pi})} \text{ и } \gamma_0 = \frac{1/c_{p0} + 1/c_{pn}}{2 \sum_{j=0}^n (1/c_{pj})} - \text{главные}$$

коэффициенты, $\gamma_i = \frac{1/c_{pi} - 1/c_{p(i-1)}}{2 \sum_{j=0}^n (1/c_{pj})}$ – угловые коэф-

фициенты. Следует отметить, что в силу непрерывности и монотонности (3) сумма угловых коэффициентов $\left| \sum_{i=1}^n (\gamma_i) \right| \leq \gamma_0$.

Для решения установившихся периодических задач уравнение энергии (1) следует привести к безразмерному виду.

$$F \frac{\partial H}{\partial t_\omega} = \frac{1}{X^k} \frac{\partial}{\partial X} \left(X^k \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial X} \right), \quad (4)$$

где $F = \frac{\omega \rho_0 x_0^2}{\lambda \sum_{i=0}^n (1/c_{pi})}$ – безразмерная частота колеба-

ний, $t_\omega = t\omega$ – безразмерное время, $X = \frac{x}{x_0} \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0}}$ –

безразмерная координата, x_0 – характерный размер, м; ρ_0 – характерная плотность, кг/м³; ω – круговая частота, с⁻¹. Отношение $\sqrt{\rho/\rho_0}$ является некоторым нормировочным коэффициентом, действующим в пределах дифференциального приращения. При вычислении размерной координаты x следует учитывать размер всех приращений от начала координаты. Такое определение безразмерной координаты X позволяет исключить влияние изменения плотности различных фаз на координатную ось расчетной области. Характерные физические величины x_0 , ρ_0 принимаются в зависимости от условий решаемой задачи.

Для решения переходных задач уравнение энергии (1) также можно привести к безразмерному виду.

$$\frac{\partial H}{\partial t_\tau} = \frac{Fo}{X^k} \frac{\partial}{\partial X} \left(X^k \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial X} \right), \quad (5)$$

где $Fo = \frac{\lambda \tau \sum_{i=0}^n (1/c_{pi})}{\rho_0 x_0^2}$ – многофазное число Фурье, $t_\tau = t/\tau$ – безразмерное время.

Решение системы уравнений (3) и (4) или (3) и (5) зависит от множеств F_i или Fo_i , H_{si} и γ_i , где $i \in \{0, 1, \dots, n\}$, а также периодических граничных

условий или начальных и переходных граничных условий для энтальпии. Граничные условия задаются в координатах $X = 0$ и $X = X_0$, где X_0 – координата конца расчетной области. Для установившегося в периоде колебаний решения необходимости в начальном условии нет.

3. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Рассмотрим систему уравнений (3) и (4). Она поддается численному решению методом конечных разностей. Вторая производная аппроксимируется со вторым порядком точности, что дает безусловно устойчивую схему. Устойчивость решения системы подробно исследована в [8]. Показано, что возможно выработать только условно устойчивую схему, при этом наиболее экономичной является явная схема. Однако в ходе получения разностной схемы возможно выработать безусловно устойчивую экономичную неявную схему. Для этого следует записать классическую неявную схему на четырехточечном шаблоне сетки:

$$\frac{F}{\Delta t_\omega} (H_{i,j} - H_{i,j-1}) = \frac{(X_i + 0,5\Delta X)^k}{X_i^k \Delta X^2} \mathcal{G}_{i+1,j} + \frac{(X_i - 0,5\Delta X)^k}{X_i^k \Delta X^2} \mathcal{G}_{i-1,j} - \frac{2}{\Delta X^2} \mathcal{G}_{i,j}, \quad (6)$$

где i, j – номера точек расчетной сетки по осям X и t_ω , Δt_ω – шаги по t_ω , ΔX – шаг по оси X .

Устойчивость схемы по временной координате подтверждена в работе [8]. Известно, что аппроксимация второй производной центрально разностной схемой также приводит к безусловно устойчивому решению. Видно, что в центральной точке разностных уравнений имеем $H_{i,j}$ и $\mathcal{G}_{i,j}$. Можно записать кусочно-заданную зависимость температуры от энтальпии, однако для записи зависимости энтальпии от температуры следует прибегнуть к доле фазы, что не удобно. Искать решение уравнения (6) можно, фиксируя величину правой части, итерационно. В этом случае можно получить неустойчивое решение, когда изменение левой части оказывается больше, чем в правой. Исследование устойчивости такого итерационного решения проведено в работе [8] и показало, что схема является условно устойчивой. Однако подстановка формулы (3) в уравнение (6) дает возможность выработать новую схему.

$$\begin{aligned} \frac{F}{\Delta t_\omega} (H_{i,j} - H_{i,j-1}) = & \frac{(X_i + 0,5\Delta X)^k}{X_i^k \Delta X^2} \left(\gamma_0 H_{i+1,j} + \mathcal{G}_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i |H_{i+1,j} - H_{si}|) \right) + \\ & + \frac{(X_i - 0,5\Delta X)^k}{X_i^k \Delta X^2} \left(\gamma_0 H_{i-1,j} + \mathcal{G}_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i |H_{i-1,j} - H_{si}|) \right) - \\ & - \frac{2}{\Delta X^2} \left(\gamma_0 H_{i,j} + \mathcal{G}_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i |H_{i,j} - H_{si}|) \right). \end{aligned}$$

Нет возможности извлечь значение энthalпии в точке из модуля однозначно, поэтому решение необходимо проводить итерационно, находя значение модуля по данным с прошлого итерационного слоя. Для определения условия устойчивости применим метод дискретных возмущений [10]. Введем возмущение δH_1 и δH_2 к величинам, находящимся на настоящем и прошлом слоях итераций, и вычтем из уравнения с возмущениями уравнение без возмущений. В результате получим

$$\left(\frac{F}{\Delta t_\omega} + \frac{\gamma_0}{\Delta X^2} \left(2 - \frac{(X_i + 0,5\Delta X)^k}{X_i^k} - \frac{(X_i - 0,5\Delta X)^k}{X_i^k} \right) \right) \delta H_1 =$$

$$= \pm \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i)}{\Delta X^2} \left(\frac{(X_i + 0,5\Delta X)^k}{X_i^k} + \frac{(X_i - 0,5\Delta X)^k}{X_i^k} - 2 \right) \delta H_2.$$

Так как $k \in \{0,1\}$, то критерий устойчивости

$$g = \frac{\delta H_1}{\delta H_2} = \frac{0 \cdot \Delta t_\omega}{F} = 0. \text{ В любом случае сохраняется}$$

некий коэффициент при нестационарном члене уравнения (6), поэтому числитель критерия устойчивости равен нулю, а знаменатель существует и положителен, что является достаточным условием безусловной устойчивости. Такой же результат дает исследование устойчивости системы уравнений (3) и (5).

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Для верификации метода проведено численное моделирование симметричного отверждения плоской отливки цинка толщиной 10 см при граничном условии первого рода и сопоставление с результатами аналитической работы [11]. В качестве начальных условия задано равномерное распределение температуры жидкой отливки (T)_{*t*=0} = 520 °С. Заданы условия симметрии $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=x_1} = 0$ в координате x_1

= 0,05 м и первого рода (T)_{*x*=0} = 20 °С в начале координаты x . Теплофизические свойства цинка: $r = 111720$ Дж/кг – теплота плавления, $T_S = 420$ °С – температура фазового перехода, $\rho_{тв} = \rho_{ж} = 7000$ кг/м³ – плотность, $\lambda_{тв} = 102,9$ Вт/(м·К) и $\lambda_{ж} = 57,54$ Вт/(м·К) – теплопроводность твердой и жидкой фаз, $c_{р\text{тв}} = 403,2$ Дж/(кг·К) и $c_{р\text{ж}} = 508,2$ Дж/(кг·К) – теплоемкость твердой и жидкой фаз, индексы «тв» и «ж» означают принадлежность величины к твердой и жидкой фазе.

В рамках разработанного метода можно выделить три фазы: твердая, переходная и жидкая. В результате получены безразмерные параметры $\gamma_0 = 0,5$, $\gamma_1 = 0,279$, $\gamma_2 = 0,221$, $H_{s1} = -1$, $H_{s2} = 0$, $\vartheta_0 = 1,124$, $Fo_0 = 2,615$, $Fo_1 = 2,039$, $Fo_2 = 1,463$.

На языке C++ разработана программа, решающая систему линейных уравнений методом Гаусса-Зейделя. Число равномерных шагов по временной и пространственной координатам составляет 1000×256. Расчет на одном ядре процессора Intel i5-3570k завершился в течение приблизительно 2 минут.

На рис. 2 в размерном виде представлены результаты расчетов. Хорошо видно, как происходит постепенное затвердевание отливки и перемещение границы раздела твердой и жидкой фазы, заметен излом линий при температуре 420 °С, связанный с различием в температуропроводности этих фаз. Результаты аналитического решения Huber, изложенные в работе [11], близки к результатам расчета, однако заметно расхождение во времени затвердевания.

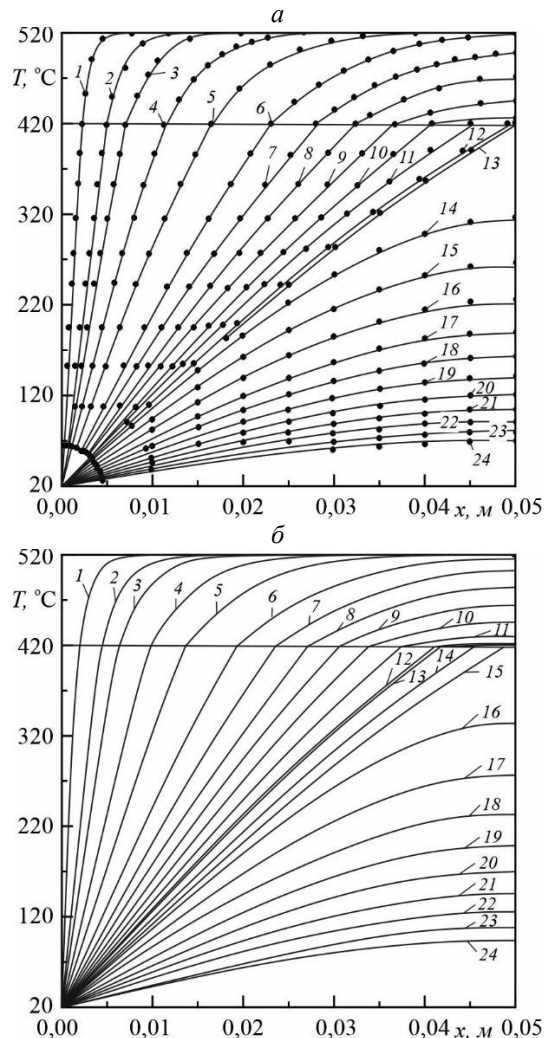


Рис. 2. Осесимметричное охлаждение отливки цинка, толщиной 10 см, при граничном условии первого рода на поверхностях. *a* – данные Huber [11], *б* – результат расчета. 1 – 0,1 с, 2 – 0,5 с, 3 – 1 с, 4 – 2,5 с, 5 – 5 с, 6 – 10 с, 7 – 15 с, 8 – 20 с, 9 – 25 с, 10 – 30 с, 11 – 35 с, 12 – 40 с, 13 – 41 с, 14 – 46 с, 15 – 51 с, 16 – 56 с, 17 – 61 с, 18 – 66 с, 19 – 71 с, 20 – 76 с, 21 – 81 с, 22 – 86 с, 23 – 91 с, 24 – 96 с.

В работе Huber время полного затвердевания, когда граница раздела фаз достигает координаты 0,05 м, составляет 41 секунду, в то время как в результатах расчетов это время составило 51 секунду. Время затвердевания можно приближенно оценить. Из рисунка 2 видно, что число Фурье твердой фазы достаточно велико, и зависимость температуры от координаты можно считать линейной, поэтому тепловой поток вблизи границы раздела фаз можно грубо

оценить по закону Фурье $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$. Удельное количество энергии, выделившейся при перемещении границы, можно выразить по формуле $E(x) = \rho r x \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$. Используя две эти формулы можно записать уравнение перемещения границы раздела фаз $\rho r \frac{\partial x}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$. Проинтегрировав по длине и во времени получим зависимость координаты границы раздела фаз от времени $x(t) = 7,255 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{t}$. Время затвердевания отливки, определенное по этой формуле, составляет 47,5 секунд. В работе [11] получена такая же зависимость но с коэффициентом $7,144 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{1/2}$, а время полного затвердевания составило 49 секунд. Такая оценка дает время меньшее, чем в реальном процессе, поэтому результаты достаточно точных расчетов не могут давать время затвердевания меньше этого. Это подтверждает, что разработанный метод численного моделирования дает достоверные результаты. Зависимости положения границы раздела фаз от времени представлены на рис. 3.

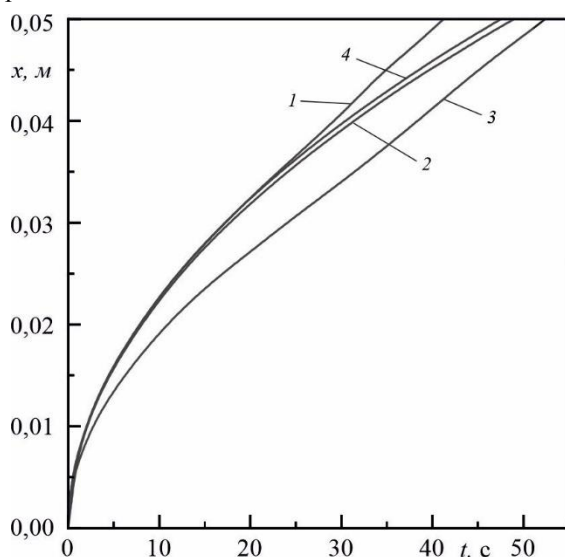


Рис. 3. Изменение координаты границы раздела фаз во времени. 1 – результат аналитического решения [11], 2 – оценка Huber [11], 3 – результат расчета по представленному методу, 4 – представленная оценка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и представлен метод численного решения задачи о фазовых переходах в аккумуляторах теплоты. Проведено исследование устойчивости разработанной двухслойной во времени численных схем для аппроксимации уравнения энергии с подставленной в него монотонной непрерывной кусочно-линейной формулы зависимости температуры от энтальпии. Показана безусловная устойчивость разработанной схемы.

На основе предложенного метода возможно исследовать возникновение, исчезновение и перемещение границ зон фаз в процессах тепло и массообмена. Метод применим для расчета теплообмена с множеством границ фазовых переходов в расчетной области и множеством фаз вещества.

Разработанный метод позволяет создавать программные средства для проектирования аккумуляторов теплоты с фазовыми переходами. Область применения метода достаточно широка и в случае применения позволяет значительно снизить нагрузку на системы генерации, передачи и потребления энергии, увеличит безопасность и стабильность многих энергетических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lame G., Clapeyron B.P.** Memoire sur la solidification par refroidissement d'un globe liquid // Annales de Chimie et de Physique. 1831. Vol. 47. P. 250–256.
2. **Stefan J.** Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere // Ann. Phys. J. Chem. 1891. Vol. 278. No. 2. P. 965–983.
3. **Spaans E.J.A., Baker J.M.** The Soil Freezing Characteristic: Its Measurement and Similarity to the Soil Moisture Characteristic Soil // Science Society of America. 1996. Vol. 60. P. 13–19.
4. **Sama S.R., Badamo T., Lynch P., Manogharan G.** Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing // Additive Manufacturing. 2019. Vol. 25. P. 563–578.
5. **Tierney G.L., Fahey T.J., Groffman P.M., Hardy J.P.** Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest // Biogeochemistry. 2001. Vol. 56. P. 175–190.
6. **Sarbu I., Dorca A.** Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials // Int. J. Energy Res. 2019. Vol. 43. P. 29–64.
7. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики // М.: Наука. 1977. 735 с.
8. **Пурдин М.С., Савченкова Н.М.** Математическое моделирование теплообмена в аккумуляторах теплоты с фазовыми переходами // Энергосбережение — теория и практика: Труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов М.: Издательский дом МЭИ. 2018. С. 121–125.
9. **Özisik M.N., Orlande H.R.B., Colaço M.J., Cotta R.M.** Finite difference methods in heat transfer // CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton. 2017. 578 p.
10. **Thoman D. C., Szewczyk A.A.** Numerical Solution of Time Dependent Two dimensional Flow of a Viscous Incompressible Fluid Over Stationary and Rotating Cylinder // 1966. Tech. Rept. Heat Transfer and Fluid Mechanics Lab. University of Notre Dame, Indiana, USA. 66–14 pp.
11. **Huber A.** Über das Fortschreiten der Schmelzgrenze in einem linearen Leiter // ZAMM. 1939. Vol. 19, No. 1. P. 1–21.

М.С. Пурдин, Е.А. Павлова, А.Н. Николаева, Р.Э. Муртазин

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОДНОФАЗНОМ АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛОТЫ ПРИ КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ ГРАНИЧНОМ УСЛОВИИ ПЕРВОГО РОДА

АННОТАЦИЯ

Разработана и представлена математическая модель установившегося колеблющегося теплообмена в цилиндрическом однофазном аккумуляторе теплоты при колеблющемся граничном условии первого рода. Проведен анализ влияния относительного диаметра источника теплоты и числа Фурье на характерные тепловые величины. Определена глубина проникновения тепловых волн.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для отопления и кондиционирования помещений в качестве источника возможно использование аккумуляторов теплоты, например, грунтовых. Теплота отбирается по трубопроводам, помещенным в грунт горизонтально, вертикально или наклонно. Могут использоваться системы, где рабочее тело испаряется по мере циркуляции в контуре трубопровода, системы с рассольной или гликолевой жидкостью, имеющих низкие температуры замерзания.

При изменении температуры грунтов происходит замораживание и размораживание, изменение плотности, прочностных и геометрических параметров грунта. Расчет температурного поля в большинстве нормативных документов ограничивается равномерным распределением базальной температуры без учета различных теплофизических свойств грунта. В действующих нормативных документах, таких, как [1], карта глубины промерзания составляется на основе статистических усредненных данных, фактическая глубина промерзания зависит от местных условий грунта.

Устройство теплоизоляции, морозозащитного и дренажного слоев позволяет изменить тепловой режим грунта, но не его аккумулярующие свойства.

На температурный режим грунтов влияют различные факторы, которые можно разделить на несколько групп.

1. Климатические факторы, такие как изменение температуры воздуха, скорость ветра и солнечная радиация.

2. Теплофизические свойства грунта, такие как теплопроводность, плотность, теплоемкость, теплота фазового перехода.

3. Фильтрация грунтовых вод, учитывается коэффициент фильтрации и температура воды.

Расчет температурных полей в грунте необходим для прогнозирования его состояния при решении многих важных технических задач. На практике существует множество случаев, когда недостаточный контроль температуры грунта приводит к значительным деформациям и, как следствие, к возникновению аварийных ситуаций.

Сезонные и суточные изменения интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха вызывают колебания температуры верхних слоев грунта [2]. Глубина проникновения тепловых волн от суточных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации в зависимости от конкретных условий колеблется, как правило, в пределах от нескольких десятков сантиметров до полутора метров. Тепловой режим слоев грунта, расположенных ниже этой глубины, формируется под воздействием тепловой энергии, поступающей из недр Земли, и практически не зависит от сезонных и тем более суточных изменений параметров наружного климата. С увеличением глубины температура грунта увеличивается примерно на 3 °С на каждые 100 м [3].

Большие возможности заключает в себе использование теплоаккумулирующих свойств грунтового массива для систем хладоснабжения зданий летом. В этом случае грунт охлаждает теплоноситель, нагреваемый внутренним воздухом помещения, и повышает свою температуру. Таким образом, в течение лета грунт накапливает дополнительную теплоту и к отопительному сезону выходит с повышенным температурным потенциалом, что значительно повышает эффективность эксплуатации теплонасосной системы теплоснабжения в целом.

Аккумуляция энергии — одна из важнейших проблем при эксплуатации энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии. Существует много разновидностей аккумуляторов энергии. Они классифицируются по автономности, по устройству и виду накапливаемой энергии.

Аккумуляция энергии имеет ряд преимуществ [4]:

1) удовлетворяются требования непрерывного снабжения потребителя энергии в случаях периодичности выработки, например, при солнечной или ветровой генерации;

2) покрывается часть пиковых нагрузок и уменьшается установленная мощность, а следовательно, стоимость энергии.

Разделяют открытые и закрытые системы грунтовых аккумуляторов теплоты. В закрытой теплоноситель циркулирует по замкнутому контуру трубопровода. В открытой вода забирается из одной скважины и перекачивается в другую, а затем фильтруясь через грунт попадает в первую.

Вертикальные грунтовые теплообменники не требуют большой площади, они погружаются в скважины диаметром от 100 до 200 мм и глубиной до 200 метров. Вертикальные грунтовые теплообменники эффективно работают практически во всех видах геологических сред, за исключением грунтов с низкой теплопроводностью, например, сухого песка или сухого гравия.

Бывают U-образные и коаксиальные вертикальные теплообменники. U-образные – представляют собой две трубы, соединенные в нижней части. Не используемое внутреннее пространство скважины заполняется специальным составом, как правило, на основе бентонита и цемента, для улучшения термического контакта труб и прилегающего грунта. Коаксиальные – скважину, заглушенную снизу и опущенную в нее трубу. Длина такого грунтового аккумулятора выбирается в зависимости от ожидаемой тепловой производительности. Однако при исследованиях эффективности грунтовых теплообменников влияние его длины обычно не учитывается.

Иногда в качестве вертикальных закрытых систем используются строительные конструкции, например, термосваи – фундаментные сваи с трубопроводами.

Наклонные грунтовые теплообменники для извлечения теплоты грунта применяют U-образные теплообменники из труб. Располагают теплообменники под углом 45° относительно поверхности земли на глубину 15–30 м. Такие теплообменники удобно применять, если отсутствует свободная площадь на участке.

Самое большое в мире число скважин используется в системе теплохладоснабжения «Richard Stockton College» в США, в штате Нью-Джерси. Вертикальные грунтовые теплообменники этого колледжа располагаются в 400 скважинах глубиной 130 м каждая. В Европе наибольшее число скважин (154 скважины глубиной 70 м) используются в системе тепло- и хладоснабжения центрального офиса Германской Службы управления воздушным движением («Deutsche Flug-sicherung»).

Решение задачи об аккумуляции теплоты в цилиндрическом однофазном аккумуляторе теплоты является актуальной проблемой, а ее решение представляет практический интерес.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для большей общности, уменьшения числа параметров и упрощения поставленной задачи сделан ряд допущений.

1. Так как существуют технические и экономические ограничения, например, по глубине скважин, для устройства аккумуляторов теплоты, то полезно изучить поле, рационально замощенное шестиугольными аккумуляторами теплоты, где один аккумулятор принимает форму шестиугольного столба, который можно представить в форме цилиндрического столба с таким диаметром, чтобы площадь горизонтального сечения была эквивалентна (см. рис. 1).

2. Глубина скважины минимум на порядок больше и диаметр скважины минимум на порядок меньше диаметра аккумулятора теплоты, а также глубина скважины значительно больше глубины поверхностных слоев грунта, где происходят сезонные и суточные колебания температуры.

3. Температура теплоносителя по длине скважины изменяется незначительно относительно амплитуды ее колебаний, а сопротивление теплоотдаче и стенки скважины незначительно, поэтому температура теплоносителя соответствует температуре поверхности скважины.

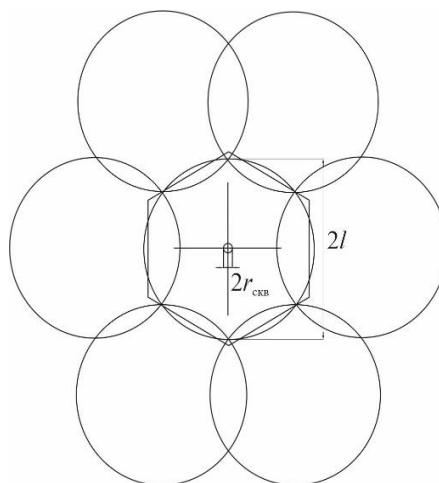


Рис. 1. Замощение горизонтальной поверхности сотовой структурой аккумуляторов теплоты.

В таком случае теплопередача в аккумуляторе теплоты при отсутствии конвекции или диффузии вещества в одномерном случае для цилиндрической систем координат описывается линейным параболическим дифференциальным уравнением энергии

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right),$$

где T – температура, °С; t – время, с; r – пространственная координата, м; c_p – теплоемкость, Дж/(кг·°С), λ – теплопроводность, Вт/(м·°С); ρ – плотность, кг/м³.

Для уменьшения числа параметров и упрощения анализа приведем уравнение энергии к безразмерному виду

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t_\omega} = \text{Fo} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial \vartheta}{\partial R} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial R^2} \right), \quad (1)$$

где $Fo = a\tau / (2\pi l^2)$ – число Фурье; $a = \lambda / (\rho c_p)$ – температуропроводность, m^2/c ; $t_{\omega} = t\omega$ – безразмерное время; $R = r/l$ – безразмерная координата; l – характерный радиус аккумулятора, м; $\vartheta = (T - T_{cp}) / A_T$ – безразмерная температура; T_{cp} – средняя температура, °C; A_T – амплитуда колебания температуры, °C; τ – характерный период колебаний, с; $\omega = 2\pi / \tau$ – круговая частота, c^{-1} .

Решение уравнения (1) зависит от числа Фурье Fo и относительного диаметра скважины $\gamma = r_{скв} / l$, где $r_{скв}$ – радиус скважины, м. Так как изучается периодический процесс аккумуляции теплоты, то в первую очередь полезно изучить наложение гармонических граничных условий. На стенке скважины задано периодическое граничное условие первого рода в виде закона $\vartheta_{r=\gamma} = \sin(\omega t)$. На некотором удалении от оси скважины, равном радиусу аккумулятора теплоты ставится граничное условие симметрии $\frac{\partial \vartheta}{\partial X} = 0$.

Тепловой поток на стенке скважины определяется по закону Фурье $q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{r=r_{скв}}$. Удельный тепловой поток определяется по формуле $q_l = q 2\pi r_{скв}$.

3. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Уравнение (1) поддается численному решению методом конечных разностей. Его удобно решать в программе Mathcad с помощью блок-функции Given – pdsolve. Блок Given – pdsolve предназначен для решения параболических и гиперболических уравнений в частных производных и их систем с граничными условиями, имеющих в качестве аргументов, например, время t_{ω} и пространственную координату R . Значения, получаемые в ходе решения, являются результатом решения матрицы линейных уравнений, аппроксимирующих уравнения, подобных (1).

Так как ищется решение установившейся во времени задачи с колеблющимися граничными условиями, то в качестве интервала времени задано несколько периодов колебаний, в последнем из которых результат мало отличается от предыдущего периода. В результате выбран интервал времени 10π , в течение которого происходит установление.

Число шагов во времени t_{ω} и по координате R принято 160 и 100. Шаги подбираются таким образом, чтобы при дальнейшем их увеличении, результаты решения не изменялись.

Решение данной задачи занимало достаточно короткое время. На рис. 2 представлена программа, которая использовалась в среде Mathcad для решения на компьютере с процессором AMD Phenom™II X4 965 Processor 3,40 Ghz, установленной оператив-

ной памятью 4,0 ГБ и 64-разрядной операционной системой.

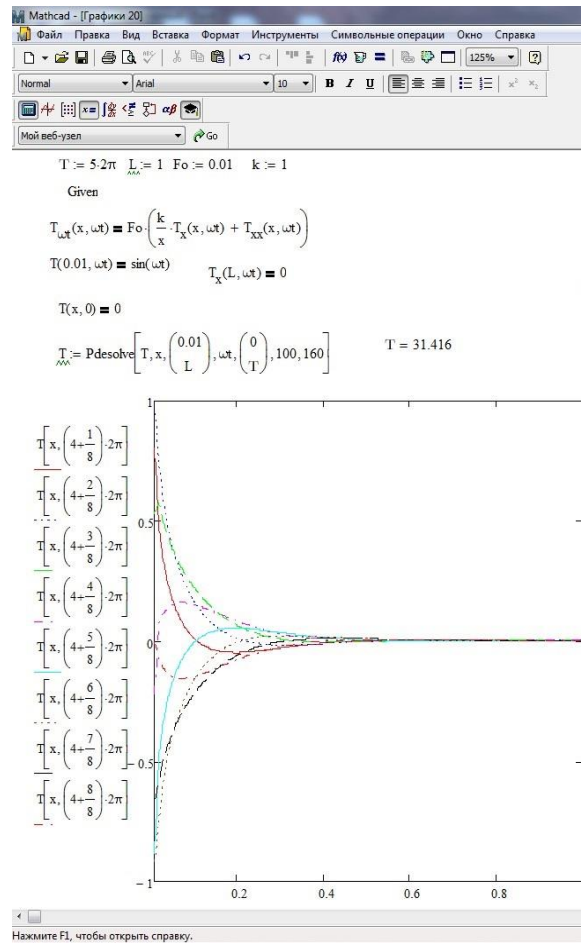


Рис. 2. Снимок экрана с программой в среде Mathcad.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рисунке 3 представлены результаты расчетов теплообмена в грунте при числе Фурье $Fo = 0,001$. Хорошо видно колебания профиля температуры в аккумуляторе теплоты, следует отметить, что при таком низком числе Фурье только малая доля аккумулятора задействована в накоплении теплоты. Значительная часть не задействована, что показывает малую эффективность использования аккумулирующего материала. При увеличении относительного диаметра скважины объем аккумулирующего материала уменьшается, однако толщина задействованного слоя аккумулятора и его эффективность возрастают.

При увеличении числа Фурье до $Fo = 1$ весь объем аккумулятора используется для аккумуляции (см. рис. 4), однако его объем прогревается неравномерно, что можно определить, как эффективность аккумуляции. Увеличение относительного диаметра скважины приводит к увеличению эффективности и более равномерному распределению теплоты. С течением времени возмущение, вносимое граничным условием, распространяется по оси R от скважины. В связи с этим по мере удаления от оси колебания температуры в аккумуляторе теплоты запаздывают.

Дальнейшее увеличение числа Фурье до $Fo = 100$ приводит к еще более равномерному распределению температуры в аккумулирующем материале, запаздывание изменения профиля температуры сокращается, а распределение температуры становится почти равномерным. Эффективность аккумуляции практически максимальна. При увеличении относительного диаметра скважины распределение температуры становится еще более равномерным.

При малых числах Фурье можно определить расстояние, на которое распространяется тепловая вол-

на, как координата в которой значение безразмерной температуры отличается от среднего значения не более чем на 0,01. На рисунке 6 представлены зависимости расстояния распространения тепловой волны от относительного диаметра скважины. При $Fo = 0,001$ и $\gamma = 0,01$ это расстояние равно 0,16, а при увеличении относительного диаметра скважины – это расстояние увеличивается. При числах Фурье $Fo > 0,1$ определить данное расстояние невозможно, так как амплитуда колебаний превышает 0,01.

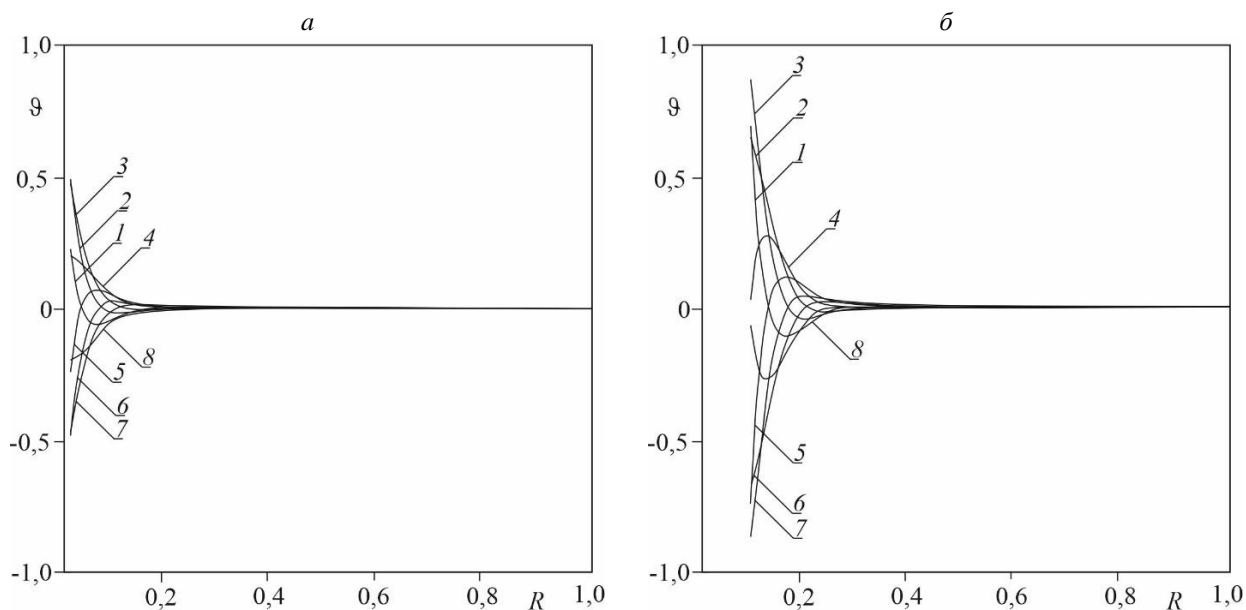


Рис. 3. Зависимости безразмерной температуры от координаты в разные моменты времени при $Fo = 0,001$. *a* – $\gamma = 0,01$, *б* – $0,1$. 1 – $t_{\omega} = 0$, 2 – $\pi/4$, 3 – $\pi/2$, 4 – $3\pi/4$, 5 – π , 6 – $5\pi/4$, 7 – $3\pi/2$, 8 – $7\pi/4$.

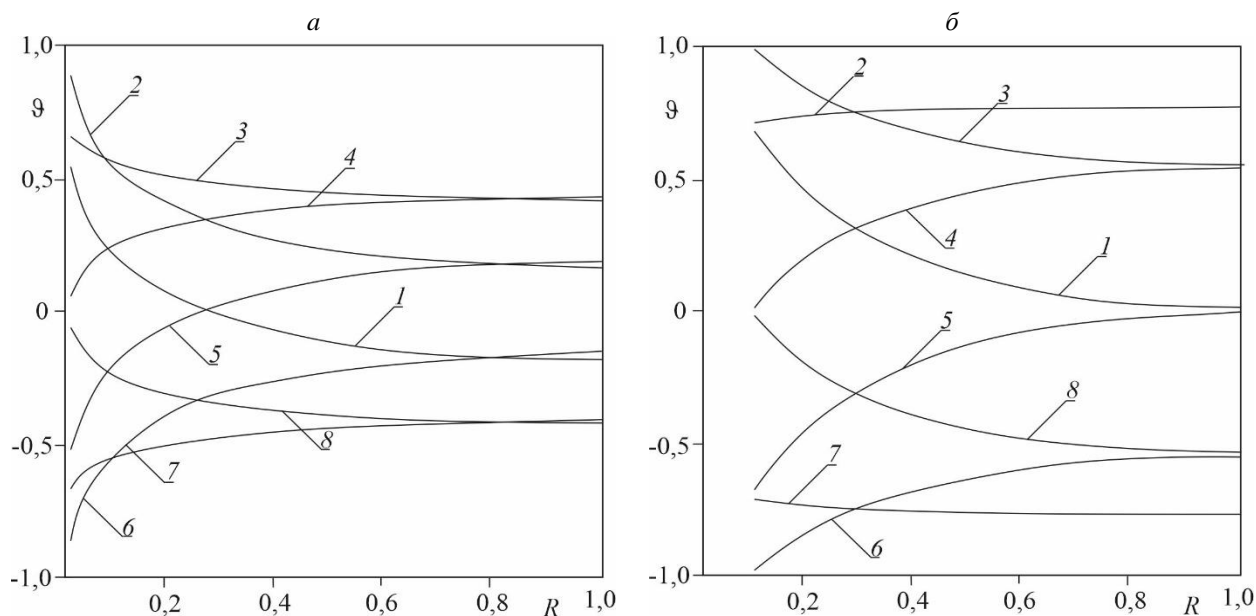


Рис. 4. Зависимости безразмерной температуры от координаты в разные моменты времени при $Fo = 1$. *a* – $\gamma = 0,01$, *б* – $0,1$. 1 – $t_{\omega} = 0$, 2 – $\pi/4$, 3 – $\pi/2$, 4 – $3\pi/4$, 5 – π , 6 – $5\pi/4$, 7 – $3\pi/2$, 8 – $7\pi/4$.

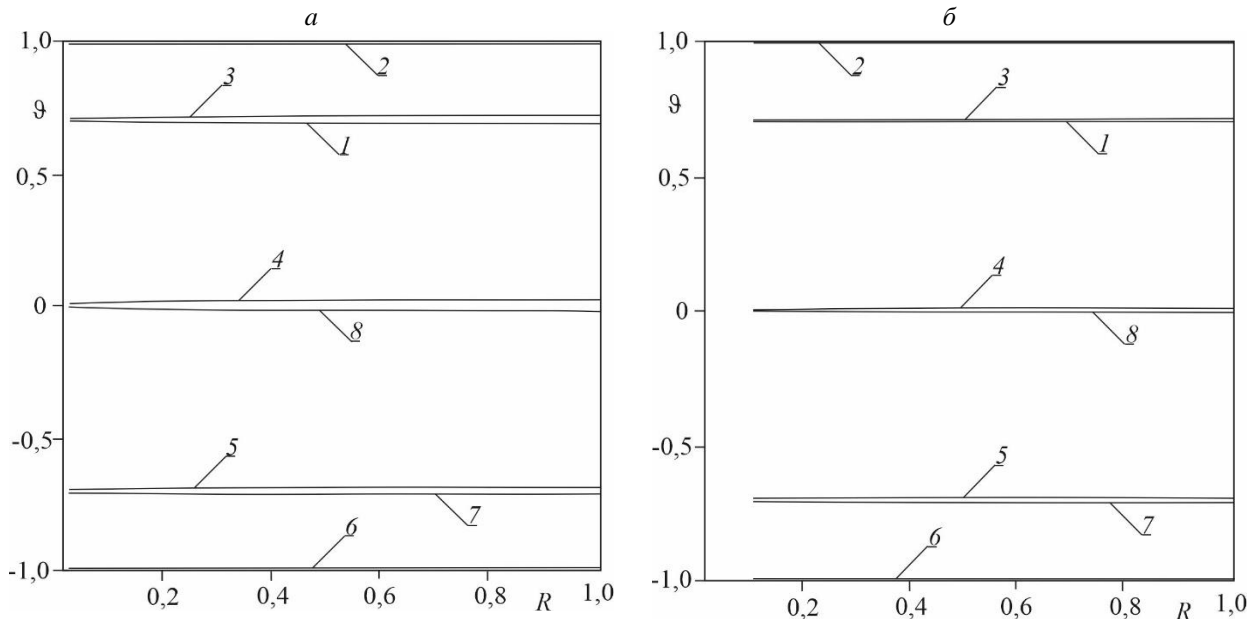


Рис. 5. Зависимости безразмерной температуры от координаты в разные моменты времени при $Fo = 100$. $a - \gamma = 0,01$, $б - 0,1$. $1 - t_0 = 0$, $2 - \pi/4$, $3 - \pi/2$, $4 - 3\pi/4$, $5 - \pi$, $6 - 5\pi/4$, $7 - 3\pi/2$, $8 - 7\pi/4$.

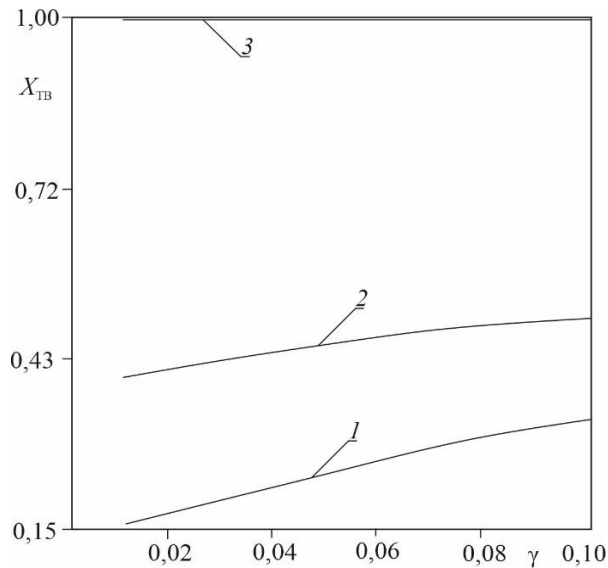


Рис. 6. Зависимости глубины распространения тепловой волны от относительного диаметра скважины. $1 - Fo = 0,001$; $2 - 0,01$; $3 - 0,1$.

5. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРУНТОВОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛОТЫ

В качестве примера рассмотрим процесс теплообмена в аккумуляторе теплоты со следующими параметрами: $c_p = 2,15 \cdot 10^6$ Дж/(кг·К), $\lambda = 1,13$ Вт/(м·К); $\rho = 1900$ кг/м³, $T_{cp} = 7^\circ\text{C}$, $\Delta T_{хар} = 5^\circ\text{C}$, $r_{скв} = 0,05$ м, $r = 5$ м, $\tau = 24$ часа $\vee 365$ дней. В таком случае число Фурье $Fo = 0,0029$ или $0,106$, а относительный диаметр скважины $\gamma = 0,01$.

На рисунке 7 представлены результаты расчетов в размерном виде. Видно, что при колебаниях с периодом 24 часа глубина проникновения тепловых волн невелика, так как

число Фурье мало, а при колебаниях с периодом 365 дней тепловые волны достигают дальней границы аккумулятора теплоты. Однако эффективность аккумуляции все еще не велика.

На рисунке 8 представлено изменение во времени теплового потока на поверхности скважины. Для заданных условий при периоде колебаний $\tau = 24$ часа максимальная величина теплового потока составляет 282 Вт/м², а удельный тепловой поток составляет 89 Вт/м. При периоде колебаний 365 дней – 152 Вт/м² и 48 Вт/м. А максимальная мощность при длине скважины 100 м составляет $8\,900$ Вт при суточном периоде и $4\,800$ Вт при годовом.

a

б

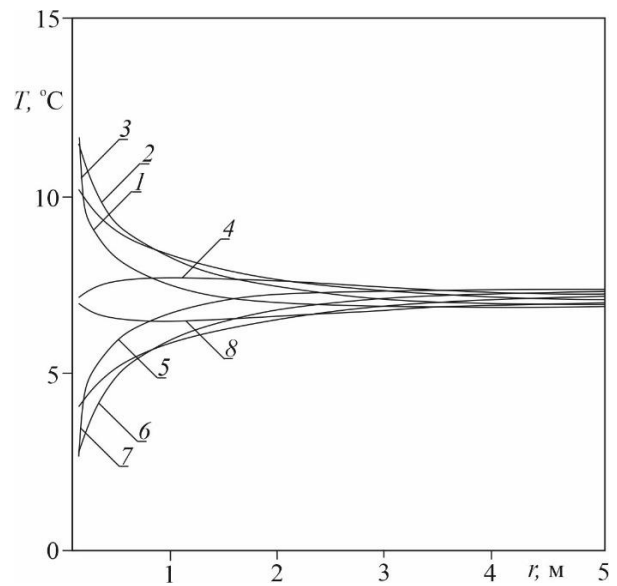
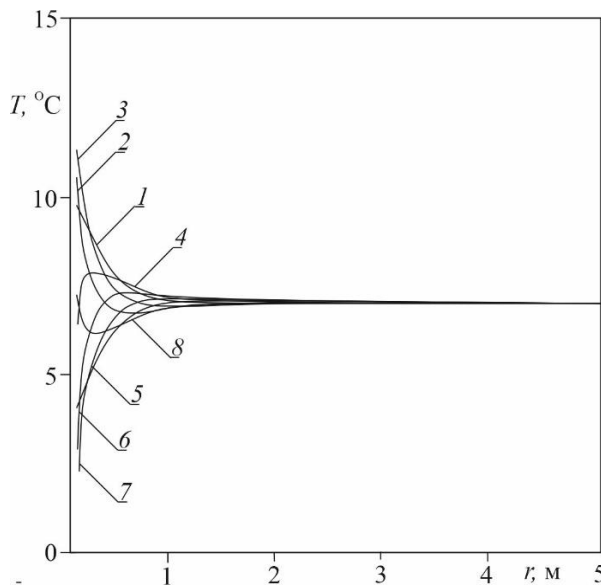


Рис. 7. Зависимости температуры от координаты в разные моменты времени при $\gamma = 0,01$. а – $Fo = 0,0029$, б – $0,106$. 1 – $t_w = 0$, 2 – $\pi/4$, 3 – $\pi/2$, 4 – $3\pi/4$, 5 – π , 6 – $5\pi/4$, 7 – $3\pi/2$, 8 – $7\pi/4$.

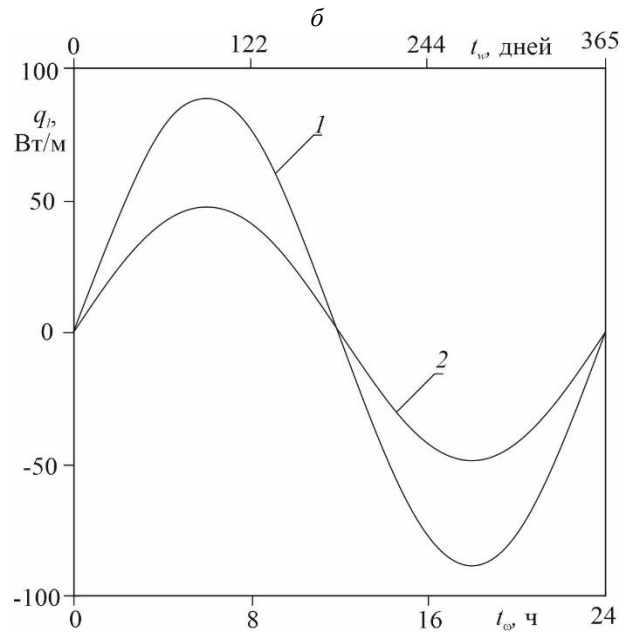
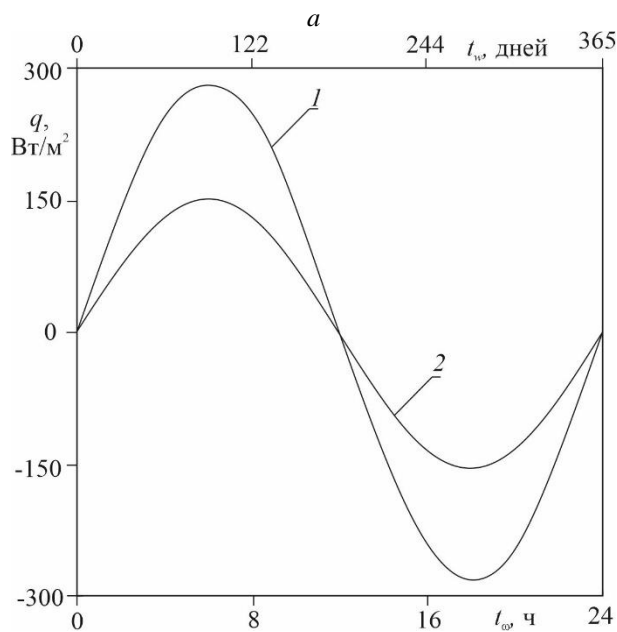


Рис. 8. Изменение теплового потока на поверхности скважины во времени. а – тепловой поток q , б – удельный тепловой поток q_s . 1 – $Fo = 0,0029$, 2 – $0,106$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика численного моделирования и проведено исследование установившегося теплообмена в цилиндрическом однофазном аккумуляторе теплоты при колеблющемся граничном условии первого рода. Выявлены два режимных параметра, влияющих на тепловые характеристики: число Фурье Fo и относительный диаметр скважины γ . Обнаружено, что с увеличением числа Фурье и относительного диаметра скважины глубина проникновения тепловых волн, а также эффективность аккумулятора теплоты увеличиваются. Приведен пример расчета грунтового аккумулятора теплоты, позволивший определить удельный тепловой поток на поверхности скважины (до 89 Вт/м) и тепловую мощность (до 8 900 Вт) при глубине скважины – 100

м и диаметре – 100 мм. Разработанная методика позволяет проектировать грунтовые аккумуляторы теплоты без фазовых переходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНИП 23-01-99 "Строительная климатология".
2. Васильев Г.П., Шилкин Н.В. Использование низкопотенциальной тепловой энергии земли в теплонасосных системах // АВОК. 2003. № 2. С. 52–64.
3. Штым А.С., Маркелова И.А. Системы теплосбора для геотермальных тепловых насосов // Вестник ВолГАСУ. Сер.: Стр-во и архит. 2011. № 23 (42). С. 126–133.
4. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием поверхностных слоев Земли // М.: Издательский дом «Граница». 2006. 176 с.

Е.С. Рекуненко, А.Б. Гаряев

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРЕБРЕННЫХ РАДИАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

АННОТАЦИЯ

Предложен метод приближенной оптимизации геометрических характеристик оребренных радиаторов тепловых труб, теплота от которых отводится естественной конвекцией. В качестве целевой функции использована масса радиатора при заданной отводимой тепловой мощности с его поверхности. Разработана математическая модель для расчета оптимальных геометрических характеристик радиаторов из плоских круглых ребер, а также ребер из квадратных пластин.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из распространенных способов отвода теплоты от конденсаторов тепловых труб является естественная конвекция воздуха. Для того, чтобы увеличить отводимую тепловую мощность, в зоне конденсации устанавливаются оребренные радиаторы. При их проектировании возникает задача оптимизации их массы и габаритов. Решение задачи оптимизации позволит сократить массу металла или передать больше теплоты с поверхности радиатора при его постоянной массе.

В отличие от других типов оребренных охлаждающих или нагревательных устройств (таких, например, как отопительные конвекторы) температура поверхности стенки конденсатора тепловой трубы остается постоянной по длине, что облегчает математическое описание процесса переноса теплоты и оптимизацию геометрических параметров радиатора.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПРОЦЕССА

При отводе теплоты при помощи радиатора, расположенного на конденсаторе тепловой трубы, теплота от стенки конденсатора передается теплопроводностью по металлу ребра и далее отводится с его поверхности конвективным путем. Эффективность передачи теплоты теплопроводностью снижается при уменьшении толщины и росте высоты ребра. В пространстве между ребрами возникает естественное конвективное движение воздуха. Скорость движения воздуха будет определяться в первую очередь разностью плотностей в окружающем воздухе и воздухе вблизи нагретого ребра. При достаточно большом расстоянии между ребрами интенсивность теплоотдачи практически постоянна и слабо зависит

от высоты ребра. Она может быть описана соотношениями, применяемыми для описания естественной конвекции на вертикальной пластине.

На вертикальной поверхности ребра возникают гидродинамический и тепловой пограничные слои. При уменьшении расстояния между ребрами происходит смыкание пограничных слоев воздуха в пространстве между ними. В результате перестраивается профиль скорости и температуры, увеличивается аэродинамическое сопротивление, уменьшится расход и скорость воздуха. Таким образом, при приближении ребер резко уменьшается теплоотдача и тепловой поток, отводимый от поверхности ребер радиатора.

Помимо конвективного теплообмена имеет место радиационный теплообмен между поверхностями радиатора и окружающих его предметов. Как показывают расчеты [1], при температурах поверхности радиатора 90 – 120 °С, доля лучистого теплового потока в общем потоке теплоты с поверхности радиатора, не превышает 20 %.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

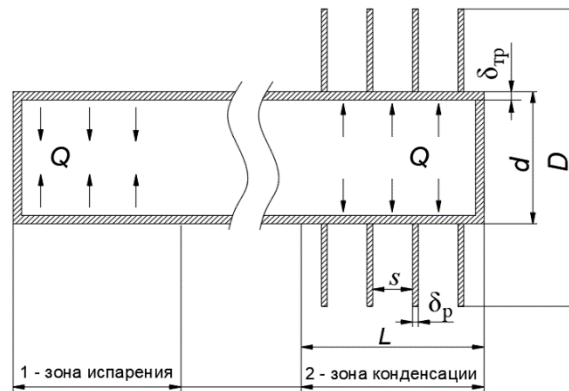


Рис. 1. Геометрические характеристики оребренного радиатора конденсатора тепловой трубы: D – диаметр ребра, d – диаметр трубки радиатора тепловой трубы, s – расстояние между ребрами радиатора, δ_p – толщина ребра, $\delta_{тр}$ – толщина корпуса тепловой трубы; L – длина радиатора.

Выбор целевой функции определяется задачами, стоящими перед потребителями системы охлаждения, и описан в предыдущих работах авторов [2].

Геометрические характеристики радиатора представлены на рис. 1.

В рассматриваемом случае целевой функцией является минимальное значение массы радиатора M при заданной отводимой тепловой мощности с его поверхности Q . Длина (линейный размер) конденсатора L при этом не является постоянной величиной.

Постановка задачи оптимизации выглядит так. Радиатор передает тепловую мощность Q . Нужно найти оптимальные значения длины радиатора L , эквивалентного диаметра ребра D (диаметра круга, равного по площади ребру, имеющему прямоугольную или квадратную форму), расстояния между ребрами s , и толщины ребра δ_p , при которых достигается минимальное значение массы M ребренного радиатора. Известны диаметр и толщина стенки корпуса тепловой трубы, плотность материала ребра и корпуса трубы, коэффициент теплопроводности ребра, температуры стенки конденсатора и окружающего воздуха.

Масса радиатора может быть вычислена как сумма массы части трубы, на которой нанесен радиатор, и массы ребер $M = M_{тр} + M_p$:

$$M = \rho_{тр} \cdot F_{тр} \cdot \delta_{тр} + \rho_p \cdot F_p \cdot \delta_p \cdot \frac{L}{s + \delta_p}. \quad (1)$$

Здесь $F_{тр} = \pi \cdot d \cdot L$ и $F_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)$ – площадь трубки радиатора тепловой трубы, на которую нанесены ребра, и площадь ребра, м². Выражение $\frac{L}{s + \delta_p}$ представляет собой количество ребер радиатора, шт.

Наибольшую сложность представляет вычисление тепловой мощности радиатора Q , которая входит в приведенную выше задачу оптимизации в качестве ограничения. Ранее была разработана математическая модель для расчета передаваемой тепловой мощности для радиаторов с круглыми ребрами, а также ребрами из прямоугольных пластин с разными геометрическими характеристиками [3]. Модель имеет следующие особенности.

Температура ребра считается постоянной по его высоте. Разность температур ребер и воздуха определяется как:

$$T_p - T_\infty = (T_w - T_\infty) \cdot \eta, \quad (2)$$

где T_p , T_∞ , T_w – средняя температура поверхности ребра, температура воздуха в помещении, температура основания ребра (принимается равной температуре поверхности трубки тепловой трубы), °С соответственно; η – эффективность ребра.

Коэффициент теплоотдачи в пространстве между ребрами принимается постоянной величиной и рассчитывается по известным критериальным зависимостям числа Нуссельта от чисел Грасгофа и Прандтля для естественной конвекции на вертикальной пластине. Считается, что наличие трубки не

меняет коэффициента теплоотдачи между ребрами.

Эффективность ребра вычисляется по формуле, предложенной в книге А.Э. Пиира [4]:

$$\eta = \frac{th \left[m \cdot l \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{d}} \right]}{m \cdot l \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{d}}}, \quad (3)$$

где $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\delta_p \cdot \lambda_p}}$, $l = 0,5 \cdot (D - d)$ – эффективная высота ребра, м.

В случае, если ребро квадратное или прямоугольное, то при определении его эффективности оно сводится к круглому ребру. Наоборот, если ребро круглое, оно сводится к квадратному для определения его высоты.

В данной работе в расчетах теплового потока с поверхности радиатора учитывается только естественная конвекция. Излучение для упрощения задачи не учитывается, хотя его учет также возможен с использованием предлагаемого метода. В этом случае передаваемую тепловую мощность можно определить, как:

$$Q_{кр} = \bar{\alpha} \cdot (T_0 - T_\infty) \cdot \left[F_{тр} + \eta \cdot 2 \cdot F_p \cdot \frac{L}{s + \delta_p} \right]. \quad (4)$$

Выделим факторы, которые входят в выражения для M и Q , и следовательно влияют на результат оптимизации.

- Параметры корпуса тепловой трубы, на которой закреплены ребра: длина радиатора L , диаметр корпуса тепловой трубы d ; толщина стенки корпуса тепловой трубы $\delta_{тр}$; плотность материала корпуса тепловой трубы $\rho_{тр}$;
- Параметры ребер: высота ребра D ; толщина ребра δ_p ; расстояние между ребрами s ; плотность материала ребра ρ_p ; коэффициент теплопроводности ребра λ_p .
- Параметры сред: температура паров теплоносителя в зоне конденсации тепловой трубы T_0 ; температура воздуха в помещении, где установлен радиатор T_∞ .

Большинство из них являются постоянными параметрами, заданными для каждого рассматриваемого случая. К ним относятся: температуры воздуха и теплоносителя, материалы трубки и ребер. Независимыми переменными являются высота ребер D , их толщина δ_p , расстояние между ребрами s , а также длина радиатора L (рис. 1). В общем случае, ограничения также могут быть наложены на длину радиатора и высоту ребер, которые не могут быть чрезмерно большими, а также на толщину ребер, поскольку они не могут быть слишком тонкими из-за необходимости обеспечить их механическую прочность.

Произведем преобразование оптимизационной задачи с сокращением числа переменных.

Рассмотрим выражения для целевой функции (1) и ограничение на передаваемую тепловую мощность (4). И масса, и тепловая мощность прямо пропорциональны длине.

Введем обозначение:

$$Z = \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \frac{1}{s + \delta_p}. \quad (5)$$

Тогда масса и тепловая мощность могут быть представлены, как:

$$Q = \pi \cdot \alpha \cdot \Delta T \cdot L \cdot (d + 2 \cdot Z \cdot \eta), \quad (6)$$

$$M = \pi \cdot \rho_p \cdot \delta_p \cdot L \cdot (A \cdot d + Z). \quad (7)$$

Здесь $A = \frac{\rho_{тр} \cdot \delta_{тр}}{\rho_p \cdot \delta_p}$ постоянная величина, вычисляемая как отношение произведений толщин и плотностей ребер и корпуса тепловой трубы.

Выразив L из выражения (6) и подставив его в (7), получаем выражение для массы радиатора, в котором значение Q является известной постоянной:

$$M = \frac{Q \cdot \delta_p \cdot \rho_p}{\alpha \cdot \Delta T} \cdot \frac{A \cdot d + Z}{d + 2 \cdot Z \cdot \eta}. \quad (8)$$

Таким образом, целевая функция больше не зависит от длины.

Исходя из вида целевой функции, можно провести анализ влияния толщины ребра на ее минимальное значение. Можно показать, что при уменьшении толщины ребра происходит монотонное уменьшение целевой функции пропорционально квадратному корню из ее значения, даже не смотря на уменьшение эффективности ребра. Покажем это. Если считать, что толщина ребра существенно меньше расстояния между ребрами, что действительно выполняется на практике, то зависимость массы радиатора от толщины ребер можно представить в следующем виде:

$$M = C_1 \cdot \frac{\delta_p}{C_2 + C_3 \cdot \eta} = C_1 \cdot \frac{\delta_p}{C_2 + C_4 \cdot \sqrt{\delta_p}}. \quad (9)$$

Здесь $C_1 - C_4$ – величины, не зависящие от толщины ребра. Вид формулы показывает, что при любых значениях этих функций масса монотонно возрастает с ростом толщины ребра, причем при $C_3 = 0$ $M \sim \delta_p$, а при $C_2 = 0$ $M \sim \sqrt{\delta_p}$.

Таким образом, чем меньше толщина ребра, тем меньше значение массы. Тогда, минимальная толщина ребра определяется только технологическими и прочностными соображениями. Толщина ребра является некоторой константой – параметром нашей задачи. Она не является независимой переменной, а

является исходным данным при решении задачи оптимизации.

В полученном выражении осталось две независимых переменных – диаметр и расстояние между ребрами. Мы можем найти расстояние между ребрами, при котором будет начинаться описанное ранее резкое снижение коэффициента теплоотдачи между ребрами для заданного диаметра ребра, то есть связать между собой эти две величины. Используем для этого решение Польгаузена для задачи о естественной конвекции на вертикальной пластине [5]:

$$s = \frac{2 \cdot C_1 \cdot D^{0,25}}{\sqrt[4]{\frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T}{4 \cdot \nu^2}}}. \quad (10)$$

Постоянная C_1 определяет безразмерную толщину пограничного слоя на поверхности ребра. При $C_1 = 3$ пограничные слои в пространстве между ребрами на верхней кромке ребер начинают смыкаться [5]. Мы считаем, что существенное снижение теплоотдачи возникает при существенно меньшем расстоянии между ребрами, когда смыкаются максимальные значения скоростей в гидродинамическом пограничном слое на пластине, т.е. при $C_1 = 1$. Вопрос о значении C_1 требует дальнейшего уточнения в будущем. Он может быть проведен путем совместного анализа на основании результатов работ [6,7] и [5], либо на основании численного решения задачи о естественной конвекции в пространстве между ребрами.

В итоге получаем выражение для расстояния между ребрами s как функцию от высоты ребра, связанной с ее эквивалентным диаметром D . Выражение $Z(D)$, входящее в целевую функцию, при малой толщине ребер теперь примет вид:

$$Z(D) = \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{\frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T}{4 \cdot \nu^2}}}{2 \cdot C_1 \cdot D^{0,25}}. \quad (11)$$

В итоге наших рассуждений, мы получили формулу для целевой функции (9), которая зависит только от одной независимой переменной D . Определив оптимальное значение D , можно вычислить оптимальные значения двух других аргументов. Оптимальная длина радиатора:

$$L = \frac{Q}{\pi \cdot \alpha \cdot \Delta T} \cdot \frac{1}{d + 2 \cdot \eta \cdot Z(D)}. \quad (12)$$

Оптимальное расстояние между ребрами можно найти по формуле (10).

Таким образом, выражения (6), (8), (10) – (12) описывают поставленную ранее задачу оптимизации.

Предлагаемый метод оптимизации является приближенным. Это связано с тем, что оптимальным расстоянием между ребрами принимается расстояние, при котором пограничные слои смыкаются и

после этого происходит быстрое уменьшение коэффициента теплоотдачи и передаваемого теплового потока. На самом деле, оптимальное расстояние между ребрами s будет несколько ниже значений, вычисляемых по приведенному методу. Это связано с тем, что при уменьшении s не только уменьшается коэффициент теплоотдачи, но и растет количество ребер на несущей трубке, а, значит, увеличивается площадь поверхности теплообмена.

Метод является приближенным еще и потому, что в его основе лежит приближенная модель, не учитывающая излучение. Тем не менее, он достаточно точен для оценочных расчетов, учитывает много факторов и вполне может быть уточнен.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ целевой функции показывает также, как и проведенные расчеты показывают, что у нее всегда есть минимум.

Оптимизационные расчеты были проведены при следующих условиях: отводимая от радиатора тепловая мощность составляла 200 Вт. Тепловая труба сделана из стали. Ее наружный диаметр составлял 20 мм, толщина стенки – 1 мм. Температура воздуха составляла 20 °С. Температура стенки трубки – 90 °С.

Было установлено, что изменение толщины ребра в достаточно широких пределах (от 0,1 мм до 0,4 мм) не влияет на оптимальные значения прочих геометрических параметров, а минимальная масса радиатора при этом увеличивается (рис. 2).

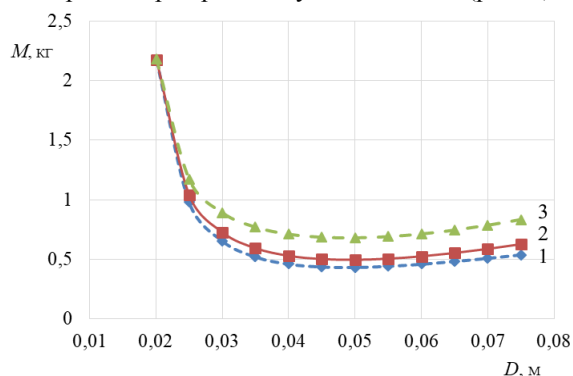


Рис. 2. Влияние толщины ребра на оптимальную массу ребра и диаметр ребра, при котором она достигается: 1 – $\delta_p = 0,1$ мм; 2 – $\delta_p = 0,2$ мм; 3 – $\delta_p = 0,4$ мм.

Были проведены расчеты радиаторов с ребрами из стали, меди и алюминия. Толщина ребра во всех случаях составляла 0,2 мм. Оптимальная масса радиатора стальными ребрами примерно в полтора раза выше, чем у ребер из меди или алюминия и достигается при существенно меньшем значении эквивалентного диаметра (рис. 3).

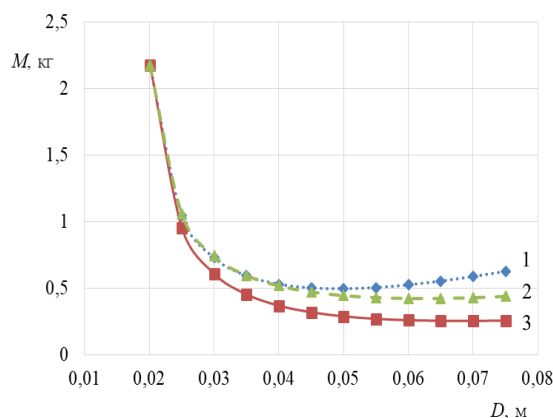


Рис. 3. Влияние материала ребер на минимальное значение массы и минимальный диаметр при толщине ребра $\delta_p = 0,2$ мм: 1 – стальные ребра, 2 – медные ребра, 3 – алюминиевые ребра.

Несмотря на отличие в плотности, ребра из алюминия, меди и стали имеют примерно одинаковые характеристики. Это связано с тем, что масса радиатора в основном определяется массой несущей трубки, а масса ребер составляет в ней малую долю.

Проведенные расчеты показали, что на оптимальные значения характеристик оребрения сильное влияние оказывают диаметр и толщина стенок и плотность материала корпуса тепловой трубы, на которой установлен оребренный радиатор.

Предложенный метод может быть уточнен путем более строгого учета снижения коэффициента теплоотдачи в пространстве между ребрами при уменьшении расстояния между ними с учетом использования в математической модели формул Павловой [7] и Чена [8]. Кроме того, имеется возможность учета лучистого потока теплоты с поверхности радиатора. Однако, учитывая все указанные факторы, расчеты при этом будут существенно сложнее. Преимущество данного метода состоит в его наглядности и простоте.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведенный метод позволяет приближенно определить оптимальные размеры радиатора тепловой трубы: диаметр ребер, расстояние между ними, их толщину, а также длину радиатора для заданных диаметра и толщины тепловой трубы, материалов ребра и трубы, а также температур стенки конденсатора и окружающего воздуха.

2. Масса радиатора имеет безусловный минимум при определенном соотношении геометрических параметров радиатора.

3. Изменение толщины ребра в достаточно широких пределах (от 0,1 мм до 0,4 мм) не влияет на оптимальные значения прочих геометрических параметров, но влияет на массу радиатора.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- M — масса радиатора тепловой трубы, кг;
- Q — тепловой поток, Вт;
- L — длина радиатора тепловой трубы, м;

D — эквивалентный диаметр ребра, м;
 d — диаметр тепловой трубы, м;
 s — расстояние между ребрами радиатора тепловой трубы, м;
 δ — толщина, м;
 F — площадь поверхности, м²;
 T_w — температура основания ребра, °С;
 T_0 — температура теплоносителя внутри тепловой трубы, °С;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
 ρ — плотность, кг/м³;
 η — эффективность ребра.

Индексы:

k — конвективный тепловой поток;
 l — лучистый тепловой поток;
 p — ребро;
 tr — трубка радиатора тепловой трубы;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рекуненко Е.С., Гаряев А.Б.** Влияние температуры теплоносителя на оптимальные характеристики отопительного конвектора. СЕМИНАР ВУЗОВ ПО ТЕПЛОФИЗИКЕ И ЭНЕРГЕТИКЕ Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. – С-Пб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2019. Стр. 334-335.
2. **Рекуненко Е.С., Гаряев А.Б.** Анализ целевых функций для оптимизации оребренных радиаторов. РАДИО-ЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать шестая Междунар. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12-13 марта 2020 г., Москва): Тез. Докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг “Радуга”», 2020. - Стр. 641.
3. **Рекуненко Е.С., Емельянов С.А., Гаряев А.Б.** Метод оптимизации параметров радиаторов с квадратными и круглыми ребрами. Энергосбережение — теория и практика: Труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 5—12 октября 2018 г.) — М.: Издательский дом МЭИ, 2018. Стр. 126-130.
4. **Пиир А. Э.** Основы проектирования высокоэффективных воздухонагревателей : учеб. пособие / А.Э. Пиир. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. 79 с.
5. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя, перев. с немецкого. Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1974. 712 с.
6. **Elenbaas W.** Heat dissipation of parallel plates by free convection. Physica IX, no 1. Januari 1942. P. 665–671.
7. **Павлова А.Д.** Особенности процессов теплообмена в радиоэлектронных аппаратах в герметичном исполнении. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – С-Пб. 2011. 20
8. **Chen H-T and Hsu W-L,** Estimation of heat transfer coefficient on the fin of annual-finned tube heat exchangers in natural convection for various fin spacing, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2007) 1750–61.

П.С. Соколов¹, М.В. Козлова², А.В. Банников²

¹ООО «КУБ», Иваново, Россия

²Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

О ПРИМЕНЕНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕСНЕНИЯ ДЛЯ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ МОРСКИХ И СОЛОНОВАТЫХ ВОД

АННОТАЦИЯ

Одним из альтернативных вариантов преодоления растущего дефицита пресных водных ресурсов является опреснение морских и солоноватых вод. Для целей промышленного, питьевого и хозяйственного водоснабжения широко используются обратноосмотический и дистилляционный методы опреснения. В силу своих особенностей каждый из них требует существенных энергетических и материальных затрат. В связи с этим является актуальной задача разработки и исследования наиболее энерго- и экономически эффективных опреснительных установок. Авторами проведено экспериментальное исследование и анализ эффективности работы оригинальной автономной опреснительной установки гигроскопического типа. В результате проведенных исследований установлено, что одним из вариантов интенсификации процесса гигроскопического опреснения является повышение начальной температуры воды в зоне барботажа.

1. ВВЕДЕНИЕ

Пресная вода является одним из важнейших и наиболее потребляемых природных ресурсов, ежегодно из различных водных источников отбирается порядка 4000 км³ воды, что в разы превышает потребление остальных природных ресурсов в совокупности [1-3]. Глобальные возобновляемые водные ресурсы составляют, по разным оценкам, от 42000 [4] до 43800 км³/год [5] и распределены по территории суши неравномерно. В условиях роста численности населения, изменения климатических условий и неравномерной заселенности планеты, возникает проблема дефицита пресной воды.

Дефицит пресной воды остро ощущается на территории более 40 стран, расположенных в засушливых областях земного шара и составляющих около 60% всей поверхности суши [2].

В ряде случаев опреснение морских и солоноватых вод позволяет удовлетворить потребности населения в пресных водных ресурсах [6]. В последние десятилетия наблюдается рост мирового рынка оборудования, предназначенного для получения пресной воды. По данным Международной ассоциации по опреснению воды, в настоящее время в 120 странах действует около 17 000 опреснительных заводов. Наибольшее распространение этот способ получения питьевой воды приобрел в стра-

нах Аравийского полуострова, прежде всего, Саудовской Аравии, ОАЭ, Кувейте, а также Испании.

Сегодня возрастает потребность в малогабаритных высокоэффективных опреснительных установках. Такие установки необходимы как отдаленным регионам планеты, лишенным чистых пресных водоемов и рек, с низкой плотностью населения и недостаточно развитой инфраструктурой, так и судоходству.

Совершенствование опреснительной техники с целью повышения ее энергоэффективности снижения затрат на производство пресной воды и соответствует мировым тенденциям по рациональному использованию энергоресурсов, снижению энергопотребления, а также использованию альтернативных источников энергии.

В связи со всем вышеизложенным актуальной является задача разработки новых энергоэффективных и экономически оправданных опреснительных установок.

Сегодня возрастает потребность в малогабаритных высокоэффективных опреснительных установках. Такие установки необходимы как отдаленным регионам планеты, лишенным чистых пресных водоемов и рек, с низкой плотностью населения и недостаточно развитой инфраструктурой, так и судоходству.

Совершенствование опреснительной техники с целью повышения ее энергоэффективности снижения затрат на производство пресной воды и соответствует мировым тенденциям по рациональному использованию энергоресурсов, снижению энергопотребления, а также использованию альтернативных источников энергии.

В связи со всем вышеизложенным актуальной является задача разработки новых энергоэффективных и экономически оправданных опреснительных установок.

2. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ОПРЕСНЕНИЯ

Процесс получения пресной воды может быть реализован двумя путями: путем извлечения молекул воды из раствора и путем удаления ионов солей.

В соответствии с тенденциями, наблюдаемыми в области опреснения, выделяют несколько путей дальнейшего развития этой отрасли.

Во-первых, совершенствование процесса дистилляции и создание на этой основе новых опреснительных установок.

Во-вторых, разработка технологий опреснения на основе обратного осмоса.

В-третьих, продолжение поиска экономически и термодинамически эффективных методов опреснения.

В связи с этим основными технологиями, применяемыми в процессе опреснения, являются технологии дистилляции и обратного осмоса.

В процессе термической дистилляции исходная вода нагревается до температуры, превышающей температуру кипения при этой концентрации солей в ней и давлении с последующим кипением. Термический метод опреснения основан на фазовых превращениях воды и позволяет получить готовый продукт, очищенный от разнородных примесей, не оказывая на него химического воздействия. Однако процесс дистилляции требует существенных затрат энергии.

Деминерализация воды замораживанием основана на том, что при охлаждении в первую очередь будет кристаллизоваться чистая вода. Опреснение в подобных установках включает в себя следующие этапы: кристаллизация-льдообразование; сепарация льда и рассола; плавление льда. Для реализации данного процесса требуются существенные капитальные затраты, значительные затраты энергии, в том числе на процесс сепарации льда. Кроме этого, недостатками опреснения замораживанием являются: сложное конструктивное исполнение установок, сильная зависимость параметров работы от сезонности и погодных условий; сложность прогнозирования степени очистки; необходимость соблюдения последовательности циклов заморозки-плавления.

К методам опреснения, в которых не происходит фазового перехода, относят метод обратного осмоса, химический, ионный и электродиализ.

Физическая сущность опреснения обратным осмосом заключается в диффузии веществ через полупроницаемую перегородку, разделяющую раствор и чистый растворитель. Данный метод эффективен для обессоливания вод с низкой и средней солёностью, практически не применяется в странах с высокой температурой окружающей среды (более 32 °С), так как в этом случае процесс гидролиза мембран идет более интенсивно, что сокращает период их эксплуатации. Соответственно обратноосмотическое опреснение требует существенных экономических затрат на его реализацию.

В процессе электродиализа происходит электрохимическое выделение солей из растворов электролитов благодаря их переносу через ионоселективные мембраны под действием электрического поля. Для реализации данного метода опреснения требуется предварительная подготовка исходной воды, кроме этого, он не применяется для опреснения соленых вод, в связи с тем, что с возрастанием разности потенциалов между электродными, существенно возрастает

затраты энергии и процесс износа мембран идет более интенсивно.

Ионный метод опреснения основан на поглощении растворенных в воде солей при пропускании исходного продукта через сорбционные фильтры, выполненные из ионнообменной смолы. Химическое опреснение заключается во введении в опресняемую воду осаждающих реагентов, которые при взаимодействии с ионами солей образуют осадок. В силу сложности исполнения и высокого расхода реагентов, применяемых в процессе деминерализации, химический и ионный методы опреснения не получили особого распространения.

Одним из перспективных методов опреснения в силу его энергоэффективности является гигроскопический метод опреснения [7]. При осуществлении данного метода морскую воду испаряют, используя поток воздуха, а затем конденсируют водяные пары, то есть в качестве энергоресурса используют природную психрометрическую разность температур, соответственно, он достаточно схож с механизмом природного образования пресной воды. [8].

Основными факторами, определяющими выбор метода опреснения являются: параметры качества получаемого продукта; принцип действия и стоимость установки; затраты на ее обслуживание и монтаж; свойства обрабатываемой воды; производительность установки и ее месторасположение.

Анализ эффективности агрегатно-технологических схем различных методов опреснения, функционирующих на исходном продукте одинакового качества, показывает, что расход энергии для них различен. В свою очередь величина энергетических затрат определяется параметрами процесса, конструкцией опреснительной установки, компоновкой технологической схемы, присутствием или отсутствием регенерации отработанной энергии.

Энергоэффективность процесса опреснения в значительной степени зависит от потерь энергии, которые возникают при создании «движущих сил» данного процесса: разности температур, разности давлений и т.д., соответственно при совершенствовании и разработке опреснительных установок особое внимание уделяется вопросу снижения потерь энергии, в частности с регенерации теплоты.

3. КОНСТРУКЦИЯ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

К гигроскопическим относятся опреснительные установки, в составе которых присутствует контактный аппарат, в котором протекают процессы тепло- и массообмена между жидкостью и газом [9].

Разработка автономной гигроскопической опреснительной установки [10] направлена на снижение затрат на получение пресной воды, повышение энергетической эффективности процесса опреснения, создание экологически безопасных установок, способных конкурировать на рынке опреснительных технологий.

Оригинальная опреснительная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, содержит емкость опресняемой воды, испарительную камеру, емкость-сборник пресной воды. Опреснительная установка выполнена по замкнутой схеме движения воздуха с встроенными змеевиками нагревателя воды и охладителя дистиллята. Работа таких установок основана на законе равновесного состояния паро-газожидкостных смесей.

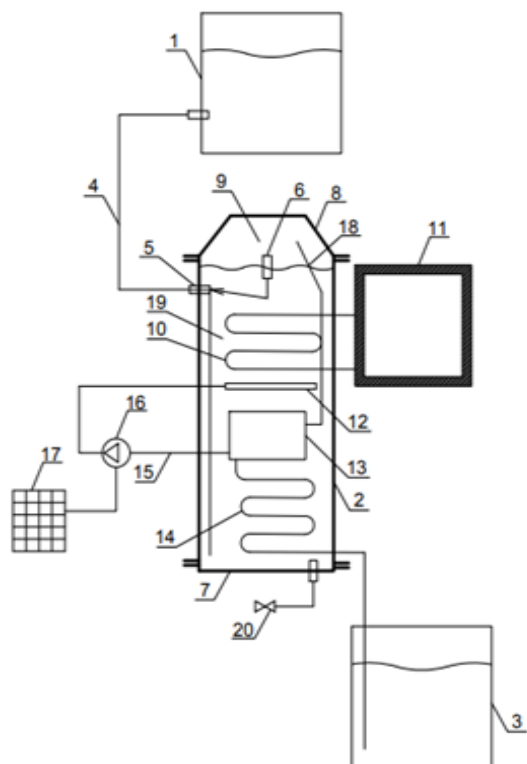


Рис.1. Принципиальная схема автономной опреснительной установки. 1 – емкость опресняемой воды; 2 – испарительная камера; 3 – емкость-сборник пресной воды; 4 – переливная труба; 5 – клапан; 6 – датчик уровня воды; 7 – съемное дно; 8 – съемная крышка; 9 – зона паровоздушной смеси; 10 – нагревательный элемент; 11 – солнечный коллектор; 12 – барботажное устройство; 13 – конденсатор-сепаратор; 14 – змеевик; 15 – труба; 16 – нагреватель воздуха; 17 – солнечная батарея; 18 – труба паровоздушной смеси; 19 – зона нагрева; 20 – кран слива рассола.

К основным конструктивным элементам гигроскопических опреснительных установок относятся: теплообменные аппараты, механизмы, устройства, емкости, трубопроводы и контрольно-измерительные материалы.

Опреснительная установка включает в себя алюминиевую цилиндрическую испарительную камеру, в верхней части которой ниже уровня опресняемой воды установлен змеевик, соединенный с солнечным коллектором; барботажное устройство, расположенное под нагревательным элементом и выполненное в виде плоской спирали с отверстиями; нагнетательное устройство, служащее для перемещения воздушных масс и питающееся от солнечной батареи; конденсатор-сепаратор, в

котором осуществляется процесс осушки воздуха; змеевик, служащий для нагрева опресняемой и охлаждения пресной воды. При этом емкость опресняемой воды установлена выше испарительной камеры, соответственно деминерализуемая вода поступает в тело установки самотеком. А вода с повышенным содержанием (рассол) из зоны нагрева над барботажным устройством за счет большей плотности опускается ко дну испарительной камеры. Удаление рассола осуществляется через кран слива рассола.

Для регулирования и контроля режима установки она снабжена всей необходимой арматурой, контрольно-измерительными приборами, средствами автоматики.

При проектировании опреснительных установок необходимо учитывать особенности рабочих сред, циркулирующих в теле установки, так для морской или солоноватой воды, характерно то, что она является коррозионно-активной. В связи с этим необходимо элементы установки, имеющие непосредственный контакт с этой средой выполнять из материала стойкого к подобному воздействию, соответственно теплообменные аппараты и барботажное устройство, входящие в состав установки, выполнены медными. Кроме этого, использование морской воды как рабочего тела требует знания ее термодинамических характеристик, что важно для проведения термоэкономической оценки процессов, протекающих в опреснительных установках. В связи с этим необходимо учесть, что вначале процесса опреснения морскую воду можно рассматривать как разбавленный раствор, то есть как идеальный, в последующем с увеличением концентрации необходимо учитывать изменения свойств морской воды из-за присутствия в ней солей.

Процесс насыщения воздушных масс может осуществляться под атмосферным давлением, а также под вакуумом.

Работа установки под атмосферным давлением, подразумевает то, что в этом случае: нет необходимости обеспечивать постоянно действующий вакуум, требующий герметичности и постоянных энергозатрат; паровоздушная смесь обладает большей плотностью, соответственно занимает меньший объем, что позволяет сократить размеры каналов установки; отсутствуют специальные технические средства для ввода и вывода потоков жидкости из полости под вакуумом. Однако в таких условиях интенсивность отложения солей на теплообменных поверхностях более высокая.

Исходя из анализа преимуществ и недостатков обоих вариантов, принята система опреснения, функционирующая при атмосферном давлении.

В процессе работы установки энергия затрачивается на процесс нагрева опресняемой воды, а так же на перемещение воздушных масс по контуру. Процесс нагрева промежуточного теплоносителя, циркулирующего в контуре нагревательного элемента, осуществляется в солнечном коллекторе. Перемещение промежуточного теплоносителя, температура кипения которого выше нормальной температуры

кипения опресняемой воды, осуществляется естественным образом. Использование энергии солнца для генерации тепловой и электрической энергии позволяет добиться автономности установки.

4. ТЕПЛОМАССОБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕМЕНТАХ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Энергетической эффективностью опреснителей гигроскопического типа состоит в увеличении производительности установки за счет дополнительной генерации пара, обусловленной разницей температуры термодинамического равновесия жидкости и температуры ее насыщения при этом же давлении.

Работа исследуемой установки включает в себя: процесс нагрева и перемещение воздушного потока через барботажное устройство; процесс насыщения воздуха, сопровождающийся влагообменом между опресняемой водой и воздушными массами; последующую его осушку в конденсаторе-сепараторе; нагрев опресняемой воды в результате ее контакта с поверхностью змеевика пресной воды, конденсатора-сепаратора и нагревательного элемента; процесс нагрева жидкости в солнечном коллекторе.

В результате контакта нагретого воздушного потока со слоем горячей воды его влагосодержание возрастает, изменяется температура, энтальпия, влажность. Процессу насыщению потока воздуха влагой способствует подвод теплоты в зоне барботажа. Барботирование воздуха в слой нагретой воды интенсифицирует процессы тепло- и массообмена между газовой и жидкой средами. Данное явление обусловлено развитием поверхности взаимодействия, возникшей ввиду высокой дисперсности пузырей, подаваемых в жидкость [11].

При функционировании установки протекают процессы сопряженного теплообмена, интенсивность которых определяется начальными условиями протекания процессов, конструктивными особенностями установки. Анализ зависимостей, описывающих процессы массообмена, протекающие в контактных аппаратах показывает, что в качестве потенциалов, характеризующих движущую силу массообмена можно применять различные величины: молярные или массовые концентрации компонентов, их парциальные давления и влагосодержание газа [7]. При расчете этих процессов в рассматриваемом случае удобно пользоваться разностью влагосодержаний газа. «Движущей силой» процесса теплообмена является разница температур.

Поскольку парциальное давление пара в воздухе является однозначной функцией влагосодержания, то количество испаряющейся воды в результате контакта с воздухом можно определить по уравнению (1):

$$dW = \beta_d \cdot dF \cdot \frac{d_n - d_g}{1000}, \quad (1)$$

где β_d – коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}(\text{г}/\text{кг}))$;

d_n – влагосодержание воздуха в пограничном слое жидкости при температуре ее поверхности, $\text{г}/\text{кг}$ с.в.; d_g – влагосодержание воздуха в окружающей среде, $\text{г}/\text{кг}$ с.в.; dF – элементарная площадка влагообмена, м^2 ;

На границах пограничных слоев отчетливо формируются две разности температур: разность между температурами воздуха по мокрому термометру и сухому и разность между температурой воздуха по смоченному термометру и температурой жидкости. Первая разность температур не определяет процесс теплообмена, так как входящая в нее температура газа по сухому термометру не определяет температуру воздуха. Вторая разность определяет теплообмен, так как входящие в нее температуры однозначно определяют энтальпию каждой среды: воздуха и жидкости.

Процесс насыщения воздушного потока влагой сопровождается соответствующими элементарными процессами: процессами диффузии, молярного переноса теплоты и массы, оказывающими взаимное влияние друг на друга. При рассмотрении совместно протекающих процессов тепло- и массопереноса необходимо учитывать их взаимное воздействие друг на друга, которое обусловлено возникновением стефанового потока [12], термодиффузии и диффузионной теплопроводности. При этом основной современных методов расчета этих процессов являются дифференциальные уравнения движения, неразрывности, и диффузии.

Определяющими факторами интенсификации процессов тепло- и массообмена в установке является высокая относительная скорость воздуха, развитая поверхность контакта; высокая дисперсность воздушных масс; равномерность распределения скоростей, дисперсности и массы воздуха в объеме реактивного пространства; достаточное время контакта сред.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В целях проверки работоспособности, определения оптимальных условий эксплуатации, и подтверждения теоретических исследований была проведена серия экспериментов на созданной для этого опреснительной установке.

Исследуемая гигроскопическая установка предназначена для получения воды питьевого качества, в связи этим общая минерализация в конденсате на выходе из опреснителя принималась на уровне 1 г/л [13]. Сухой остаток в конденсате определяется путем выпаривания определенного объема воды, предварительно профильтрованного через бумажный фильтр с последующим высушиванием остатка до постоянного веса при температуре 105-120 °С.

Нагрев воды в установке обеспечивает солнечный коллектор с площадью поглощательной пластины 4,4 м², а работу нагнетателя панель фотоэлементов мощностью 60 Вт.

Основными факторами, влияющими на эффективность работы установки, являются температура

воды и воздуха в зоне барботажа. При проведении эксперимента температура воды поддерживалась на уровне 70-100 °С, а температура воздуха изменялась в пределах 20-100 °С, давление и расход воздуха оставались постоянными. Воздушные массы поступают в барботажное устройство с влажностью равной 40%.

Существенное влияние на производительность установки оказывает начальная температура воды в зоне барботажа, с ее увеличением производительность параболически возрастает. С повышением температуры воды, в контакт с которой входит воздушный поток, возрастает способность воздуха удерживать влагу. Зависимость производительности установки от температуры воды в зоне барботажа представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Зависимость производительности установки от начальной температуры воды в зоне барботажа.

С повышением температуры барботируемого воздуха производительность установки снижается, характер изменения величины линейный и представлен на рисунке 3. Изменение температуры воздушного потока незначительно влияет на производительность.

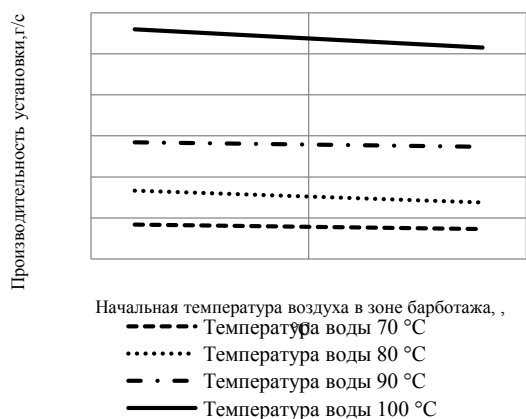


Рис. 3. Зависимость производительности установки от начальной температуры воздуха в зоне барботажа.

Резюмируя все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что температура воды в зоне барботажа оказывает существенное влияние на эффективность работы опреснительных установок гигроскопического типа, а ее увеличение является одним из способов интенсификации процесса получения пресной воды.

6. ВЫВОД

Эффективность разработанной опреснительной установки морской воды гигроскопического типа состоит в значительном увеличении производительности за счет дополнительной генерации пара, на основе закона равновесного состояния парогидрогазовых смесей, полной утилизации теплоты конденсации паров паровоздушной смеси в конденсаторе-сепараторе и охлаждения конденсата в змеевике пресной воды. Эти обстоятельства снижают затраты тепловой энергии на процессы нагрева воды в установке. При этом источником тепловой и электрической энергии является солнечная энергия в связи, с чем установка может быть использована, особенно в регионах, лишенных чистых пресных водоемов и централизованных источников электрической и тепловой энергии.

Итак, к достоинствам гигроскопической опреснительной установки можно отнести: простоту их конструкции и эксплуатации, малое накипеобразование, не препятствующее испарению в контактном аппарате, возможность более полного использования теплоты низкого потенциала, возможность применения любых, в том числе интенсифицированных контактных аппаратов, малый расход энергии, возможность предельного упаривания рассола с доведением до сухого остатка. К недостаткам установок данного типа можно отнести: повышенную коррозионную агрессивность воды, находящейся в контакте с воздухом, снижение производительности при уменьшении температуры греющей среды. Для уменьшения габаритов установок гигроскопического типа необходимо понижение давления сред в испарителе и его повышение в конденсаторе.

Таким образом, высокая энергоэффективность установки при низкой капиталоемкости устройства и качестве получаемой пресной воды, соответствующего нормативным требованиям, делает применение разработанного устройства, актуальным в системах подготовки воды питьевого качества различного масштаба от бытового до промышленного.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- dW – элементарный поток влаги, кг/с.
- β_d – коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}(\text{г}/\text{кг}))$;
- d_n – влагосодержание воздуха в пограничном слое жидкости при температуре ее поверхности, г/кг с.в.;
- d_w – влагосодержание воздуха в окружающей среде, г/кг с.в.;
- dF – элементарная площадка влагообмена, м^2 ;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oelkers E.H., Hering J.G., Zhu C.** Water: is there a global crisis? // Elements: an international magazine of mineralogy, geochemistry, and petrology, 2011. N 3. P. 157-162.
2. **Gleeson T., Wada Y., Bierkens M., Van Beek L.** Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint//Nature, 2012, N 7. P. 197-200.
3. **Gunkel A., Lange J.** Water scarcity, data scarcity and the budyko curve-an application in the lower Jordan river ba-

- sin//Journal of hydrology: regional studies, 2017, N 12, P. 136-149.
4. **Jiménez Cisneros B.E., Oki T., Nishijima A., Arnell N.W., Benito G.** Freshwater resources.// Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: part a: global and sectoral aspects, 2015, N 5, P. 229-236.
 5. **Jackson R.B., Carpenter S.R., Dahm C.N., Mcknight D.M.** Water in a changing world // Ecological applications, 2001, N4, P.1027-1045.
 6. **Semiat, R.** Desalination: present and future International water resources association//Water international, 2000. N. 1, pp. 54–65.
 7. **Андреев Е.И.** Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах.Л.: Энергоатомизда, 1976. 192 с.
 8. **Аверкин А.Г.** I-d диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств. СПб.: Лань, 2016.192 с.
 9. **Павлов Ю.В.** Опреснение воды.М.:Просвещение, 1972.159 с.
 10. **Автономная** опреснительная установка: пат. 2613920 Рос. Федерация: 2016100701; заявл. 11.01. 16; опубл. 22.03.2017, БюлN9 9с.
 11. **Солонин В.И., Перевезенцев В.В., Исаков Н.Ш., Кузеро В.Б.** Структура двухфазного адиабатического потока в режиме барботажа воздуха в заполненном водой вертикальном цилиндрическом канале// Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.2014.№ 6. С. 375 – 391.
 - 12.**Готовский М.А., Суслов В.А.** Теплообмен в технологических установках ЦБП СПб.: СПб ГТУ РП, 2012. 120 с.
 13. **ГОСТ 2874-82 Вода** питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. С Изменениями №1 и 2. М.: Издательство стандартов, 1989 г.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВА

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается возможность энергосбережения высокотемпературных процессов получения расплава. Снижение энергопотребления обеспечивается комплексом мер, направленных на интенсификацию процесса дегазации расплава и повышение его эффективности. Представлены современные способы дегазации расплавов. Основными параметрами, определяющими характер движения пузырьков газа в расплаве, являются критерий Рейнольдса и динамическая вязкость расплава. Вязкость расплава базальта уменьшается при росте температуры. Создание в камере дегазации условий вакуума обеспечивает многократное увеличение скорости дегазации расплава и снижение тепловых потерь в окружающую среду.

Ключевые слова: интенсификация, дегазация, расплав, базальт, энергосбережение, вакуум.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день актуальным является вопрос нехватки энергоресурсов, энергосбережения и экологичности производств [1]. Снижение удельного потребления топлива в производстве является одним из основных трендов современной промышленности [2]. Особый экономический эффект это может дать в энергоемких производствах, относящихся к черной металлургии и композитной отрасли. Так, рынок композитных материалов в России сегодня включает более 150 крупных игроков и составляет 700 миллионов долларов. В этом направлении ожидается рост не менее, чем на 20% в год за счет внедрения новых технологий, автоматизации и увеличения объемов производства [3]. Объем российского рынка черной металлургии составляет более 124 миллиардов долларов [4]. Отрасль является сформировавшейся и растет меньшими темпами, но за счет большого объема внедрение новых технологий может иметь значительный экономический эффект.

Снижения потребления энергии на нагрев можно достичь путем интенсификации технологических процессов, на всех стадиях получения расплава, это снижает требования к перегреву расплава и позволяет снизить удельный расход топлива. Одним из таких технологических процессов является дегазация расплава. Для получения продукта высокого качества из расплава необходимо удалить пузырьки газа и растворенные неметаллические включения.

2. СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДЕГАЗАЦИИ

2.1. Дегазация при атмосферном давлении

Расплав после нагрева проходит тонким слоем через специальные ванны большой площади. Для достижения необходимой скорости дегазации, расплав должен иметь большую поверхность контакта с атмосферой. Это приводит к большим тепловым потерям в окружающую среду за счет теплопроводности и излучения. Данный способ технологически самый простой, не требующий затрат на дополнительное оборудование, является самым неэффективным и энергозатратным, однако он распространен в производстве базальтовых композитов, непрерывных композитных волокон [5]. Достоинством данного способа является возможность применения в непрерывных производствах.

2.2. Порционное вакуумирование (DH)

Данный способ применяется в металлургической промышленности. По патрубку в вакуум-камеру засасывается до 12% от общего объема металла из ковша. В камере происходит дегазация расплава. За счет применения вакуума и малого объема расплава процесс протекает интенсивно, в течение 15-30 с [6]. Затем расплав возвращается в ковш, перемещается и в вакуум-камеру поступает новая порция. Данный способ требует большого числа повторений циклов до достижения необходимой степени дегазации всего объема расплава. Порционное вакуумирование нельзя применять в непрерывных производствах.

2.3. Циркуляционное вакуумирование (RH)

Вакуум-камера имеет два патрубка. По первому расплав попадает из ковша в камеру, по второму – обратно в ковш. За счет постоянной циркуляции расплава через вакуум-камеру эффективность процесса возрастает по сравнению с порционным вакуумированием [7]. На сегодняшний день данный способ часто применяется на крупных металлургических комбинатах.

2.4. Вакуумирование в ковше (VD)

Ковш с расплавом целиком помещается в вакуум-камеру. Способ требует создания вакуума в большом объеме, при этом поверхность дегазации остается достаточно малой, по сравнению с толщиной слоя расплава [8]. Из-за этого процесс протекает дольше, чем при циркуляционном вакуумировании.

нии. Вакуумирование в ковше нельзя применять в непрерывных производствах.

Таким образом, существует необходимость в разработке метода интенсивной дегазации, доступного к применению в непрерывных производствах композитов и металлургии.

3. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩЕГО МЕТОДА

Метод циркуляционного вакуумирования RH является принципиально наиболее близким к разрабатываемому. Циркуляционное вакуумирование было впервые успешно применено в 1957 году немецкой фирмой RUHRSTAHL HENRICHSHUTTE.

В состав установки RH (рис. 1) входят: вакуум-камера с вакуум-проводом, вакуумные насосы, механизм перемещения вакуум-камеры, система дозирования и ввода добавок. Вакуум-камеру устанавливают на транспортной тележке для перемещения между рабочим положением и позицией готовности к вакуумной обработке. Корпус вакууматора — цилиндрический, высотой до 10 метров, с двумя патрубками в нижней части. Внутренняя поверхность корпуса, контактирующая с расплавом, имеет футеровку специальным огнеупорным кирпичом. Циркуляционные патрубки имеют дополнительную футеровку с внешней стороны. Входной патрубок оснащен системой сопел для подачи инертного газа аргона. Вакуум-камера имеет систему шлюзовых устройств для ввода добавок [9].

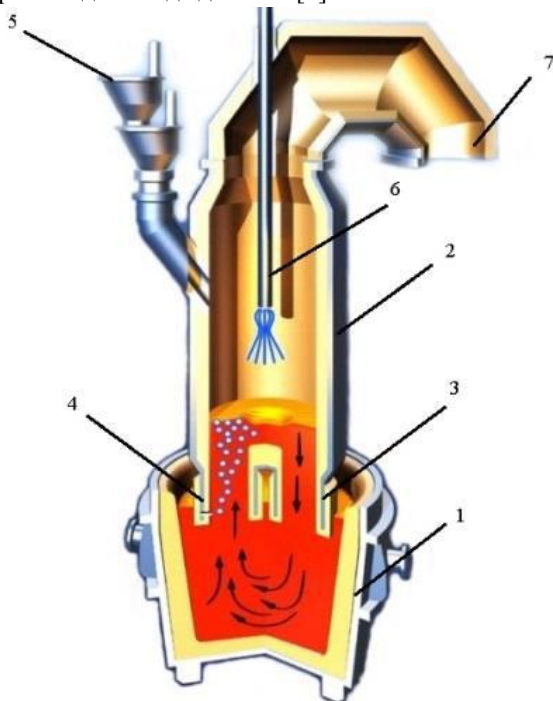


Рисунок 1. Схема циркуляционного вакууматора RH — TOP.

1 — сталеразливочный ковш; 2 — вакуумная камера; 3 — входной патрубок; 4 — сливной патрубок; 5 — устройство

для подачи сыпучих в вакуум; 6 — горелка; 7 — отвод газов.

Широкое применение циркуляционных вакууматоров (типа RH - TOP) обусловлено возможностью более полного и быстрого обезуглероживания расплава стали, что выражается в сокращении продолжительности обработки (на 7—10 мин), уменьшении температурных потерь и достижении более низкой концентрации углерода в сравнении с VD/VOD. Кроме того, отсутствие интенсивного взаимодействия с рафинировочным шлаком сталеразливочного ковша оказывается полезным при выплавке особо чистых по содержанию углерода марок стали типа IF [10].

4. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МОДЕЛЬ

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» на кафедре энергетики высокотемпературной технологии разрабатываются способы непрерывного плавления различных материалов. Применение непрерывных процессов позволяет упростить их автоматизацию, уменьшить простой оборудования, увеличить выход продукта и повысить его качество. Принципиальная схема реактора для получения расплава базальта [11, 12] представлена на рис. 2.

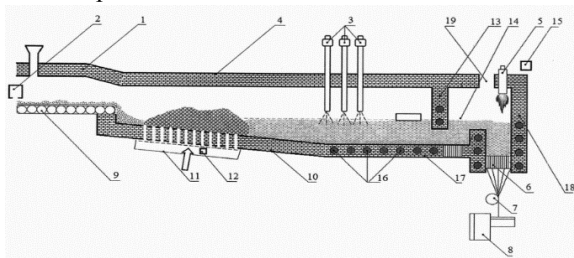


Рисунок 2. Схема реактора по непрерывной плавке базальта.

1- зона подогрева; 2 — бункер с дозатором и загрузчиком базальта; 3 — теплообменник; 4 — свод печи; 5 — горелки подогрева; 6 - фильерные питатели; 7- механизмы нанесения замасливателя; 8 - механизмы намотки волокна на бобины; 9 — конвейер; 10 — зона плавки; 11 — перфорация для подачи газа; 12 — насос; 13, 18 - перегородки камеры дегазации; 14 — камера дегазации; 15 - вакуумный насос; 16 - система охлаждения; 17 — под; 19 — отвод газов.

Особенностью таких систем является невозможность применения традиционных методов дегазации расплава. На кафедре энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ» проводится разработка и физическое моделирование системы для интенсивной дегазации расплава. Главной особенностью разрабатываемой модели является возможность работы в непрерывном режиме с постоянным потоком расплава через камеру дегазации. В отличие от метода циркуляционного вакуумирования, дегазация расплава в предлагаемой установке происходит в

одну стадию. На данный момент одной из важных задач разработки является оптимизация установки для использования с расплавами разной вязкости (сталь, базальт и т.д.) в разных отраслях промышленности. Необходимо учитывать вязкость, температуру расплава, затраты на работу систем дегазации и тепловые потери.

Основным параметром, определяющим эффективность установки для дегазации расплава, является скорость всплытия газовых пузырьков. Характер движения пузырьков газа в жидкости определяется критерием Рейнольдса, который определяется по формуле [13]:

$$Re = \frac{D \cdot w \cdot \rho}{\mu}, \quad (1)$$

где D – диаметр пузырька; w – скорость пузырька; ρ – плотность жидкости; μ – вязкость жидкости.

При значениях $Re \leq 1$ наблюдается ламинарный характер движения, скорость которого вычисляется по следующей формуле [14]:

$$w = g \frac{D^2 \cdot (\rho - \rho_a)}{18\mu}, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения; ρ_a – плотность газа.

Значениям $1 < Re < 10$ соответствует переходный режим, после которого устанавливается турбулентный характер движения при $Re > 10$ [15]. Скорость движения в данном режиме определяется по формуле:

$$w = \sqrt{\frac{2\sigma}{D \cdot (\rho - \rho_a)}}, \quad (3)$$

где σ – поверхностное натяжение.

Для базальта характерно значительное уменьшение вязкости при росте температуры [16]. Предложен ряд методик расчета вязкости базальтовых расплавов. Уравнение регрессии [17] имеет следующий вид:

$$\mu = A \cdot (T - 1100)^{-2.58}, \quad (4)$$

где A – коэффициент, зависящий от химического состава базальтовой породы, t – температура расплава.

В результате экспериментальных работ по определению высокотемпературной вязкости расплавов горных пород на вискозиметре, проведенных на кафедре технологии стекла и керамики БГТУ [18], установлено, что приведенная в уравнении (4) математическая модель обеспечивает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Таким образом, приняв вязкость расплава базальта $\mu = 18.0$ при температуре $T = 1300^\circ\text{C}$ [19], можно рассчитать вязкость для температур 1400°C , 1500°C , 1600°C и 1700°C . Полученные значения динамиче-

ской вязкости расплава базальта приведены в таблице 1.

Учитывая особенности характера движения пузырьков газа в жидкости и свойств расплава базальта при различных температурах, можно построить графики (рис. 3), показывающие зависимость скорости движения пузырьков в расплаве от их диаметра. На представленных графиках (рис. 3) экстремум соответствует смене режима движения пузырька. Видно, что скорость всплытия пузырька газа в ламинарном режиме растет по параболе при увеличении его диаметра. При этом, чем меньше вязкость расплава, тем круче парабола. В переходном режиме скорость убывает по гиперболическому закону. Характер движения пузырьков большого диаметра не представляет интереса, так как их диаметр будет превышать высоту слоя расплава в камере дегазации, которая составляет до 50 мм.

В производстве базальтовых композитов, в частности базальтовых супертонких волокон (БСТВ) и непрерывных базальтовых волокон (НБВ), особенно важно отсутствие даже минимальных, порядка 1 мкм [20], газовых включений и пустот в расплаве, поступающем на розлив. Исходя из графиков (рис. 3), скорость движения таких пузырьков крайне мала. Это обусловлено малой плотностью и большой вязкостью базальтового расплава. Создавая разрежение в камере дегазации можно увеличить диаметр содержащихся в расплаве пузырьков газа и увеличить их скорость. n – отношение скорости всплытия пузырьков в камере дегазации при созданном в ней разрежении к скорости при атмосферном давлении. Зависимость n от разрежения ΔP в камере дегазации представлена на графике (рис. 4). Зависимость имеет вид крутой гиперболы. Таким образом, при росте разрежения и приближении к вакууму значительно возрастает интенсивность дегазации расплава. При создании в камере дегазации низкого вакуума скорость процесса возрастает в 22 раза, в условиях среднего вакуума – в 102 раза. Исходя из этого, создание большого разрежения в камере дегазации расплава базальта с использованием вакуумных насосов является перспективным.

Таблица 1. Динамическая вязкость расплава базальта при различных температурах

Температура T , $^\circ\text{C}$	Динамическая вязкость μ , $\text{Па}\cdot\text{с}$
1300	18.0
1400	6.3
1500	3.0
1600	1.7
1700	1.1

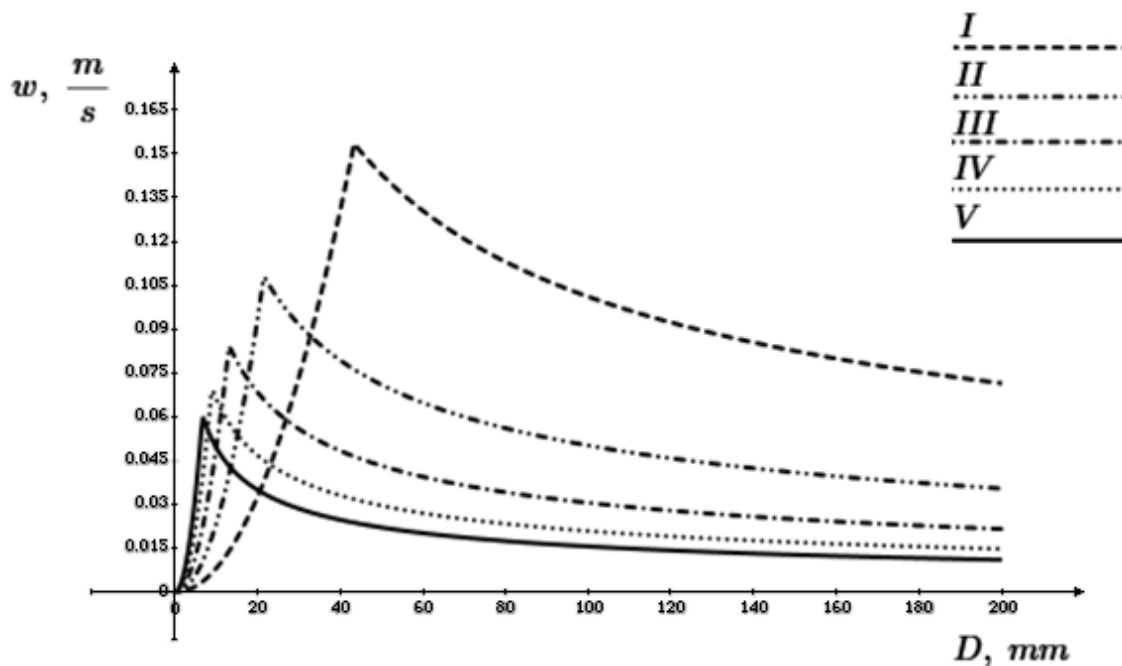


Рисунок 3. Графики зависимости скорости всплытия пузырька газа w от его диаметра D для расплавов базальта различной температуры, соответственно: I – 1300 °C; II – 1400 °C; III – 1500 °C; IV – 1600 °C, V – 1700 °C.

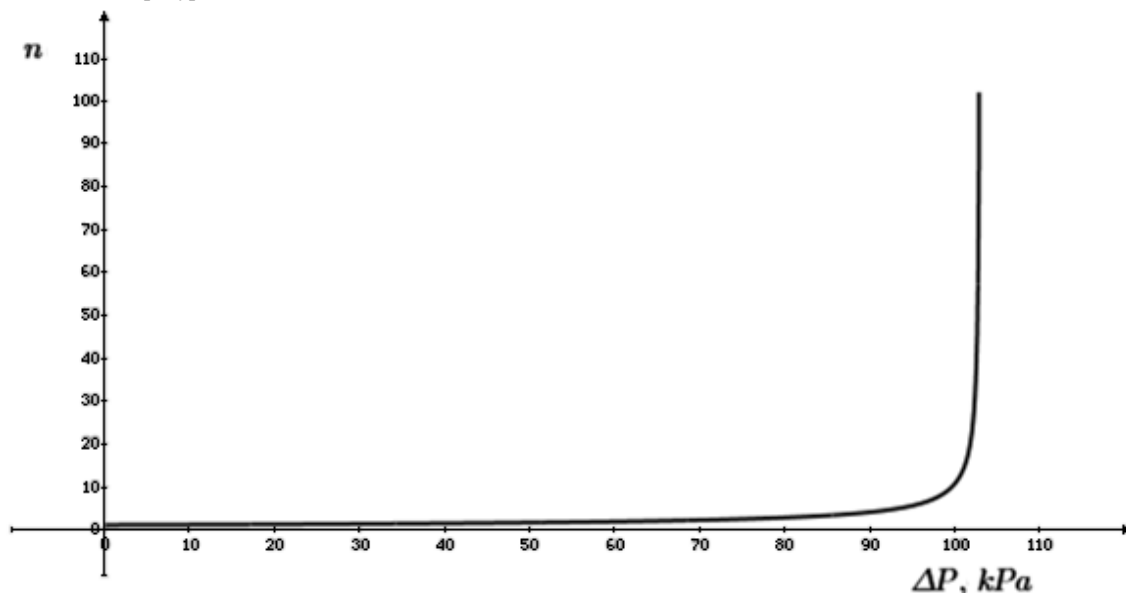


Рисунок 4. График зависимости отношения скоростей n от разряжения в камере дегазации ΔP .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация технологических процессов в промышленности – важная задача современной науки. В условиях сокращения природных запасов топлива и роста потребления ее важность возрастает многократно. Одним из направлений, обеспечивающих возможности энергосбережения, является интенсификация процессов получения расплава. На кафедре энергетики высокотемпературной технологии Национального исследовательского университета «МЭИ» проводятся работы по физическому моделированию процессов дегазации для проверки теоретических расчетов и предположений.

В разрабатываемом агрегате приняты различные меры, позволяющие уменьшить энергопотребление высокотемпературных процессов. Создание вакуума в камере дегазации приводит к росту скорости дегазации расплава в 20 – 100 раз, что позволяет уменьшить габариты установки. Таким образом, сокращаются тепловые потери в окружающую среду, уменьшаются требования к помещению, в котором установлен агрегат. Непрерывная работа дегазационной установки обеспечивает постоянный температурный режим, при котором нет необходимости подогревать установку для поддержания температуры между циклами.

С точки зрения процессов дегазации оптимальной является наивысшая температура расплава, так

как в таких условиях обеспечивается низкая вязкость. При снижении вязкости увеличивается скорость движения расплава в печи, эффективность работы дегазационной установки и степень гомогенизации расплава.

Таким образом, комплексная оптимизация и интенсификация высокотемпературных процессов согласно изложенным в работе методам позволяет предположить возможность значительного снижения энергопотребления в плавильных печах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 23.11.2009 N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // СПС КонсультантПлюс
2. **В.Я. Ушаков.** Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Томск: Известия Томского политехнического университета, 2011. Т. 319. №4. С. 5-13.
3. **Минпромторг** России [Электронный ресурс], URL: http://minpromtorg.gov.ru/press-centre/news/#!rossiyskiy_rynok_kompozitov_pokazyvaet_ezhegodnyy_rost_na_20, свободный. 5.05.2020.
4. **Металлургия** России [Электронный ресурс], URL: <https://www.urm-company.ru/about-us/blog/151-metallurgiya-rossii/>, свободный. 5.05.2020.
5. **Основы** производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. М.: Теплоэнергетик, 2002. 412 с.
6. **Г. Кнюппель.** Раскисление и вакуумная обработка стали. М.: Metallurgia, 1984. 416 с.
7. **А.М. Зборщик.** Современные процессы рафинирования стали. Донецк: ГВУЗ «Донецкий Национальный Технический Университет», 2010. 165 с.
8. **Непрерывная** разливка стали / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев и др. Донецк: ДонНТУ, 2002. 536 с.
9. **Внепечное** вакуумирование стали / А.Н. Морозов, М.М. Стрекаловский, Г.И. Чернов, Я.Е. Кацнельсон. М.: Metallurgia, 1974. 288 с.
10. **Сравнительная** эффективность дегазации стали при вакуумировании на установках RH и VD / В.В. Пивцаев, В.В. Эндерс, М.П. Гуляев // Сборник научных трудов специалистов Белорусского металлургического завода. Минск: Технология, 2009. 360 с.
11. **Патент** РФ № 2695188. Устройство изготовления непрерывных базальтовых волокон / К.В. Строгонов, М.Н. Назаров. // Бюл. изобрет. 2019. №21.
12. **Разработка** и физическое моделирование реактора плавления базальта / К.В. Строгонов, М.Н. Назаров, К.А. Коркоц // М.: Вестник МЭИ, 2020. №3. С. 25-30.
13. **Л.Г. Лойцянский.** Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
14. **В.Ю. Чанцев.** Определение параметров воздушно-пузырькового барботажа в воде // СПб.: Проблемы арктики и антарктики, 2017. №1. С. 39-45.
15. **И.Г. Маленков.** О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости // Новосибирск: Прикладная механика и техническая физика, 1968. №6. С. 130-134.
16. **Проведение** исследований и выбор базальтовых пород для производства непрерывных волокон. С.П. Оснос, М.С. Оснос // СПб.: Композитный мир, 2018. №1. с. 56 – 62
17. **О.С. Татаринцева.** Зависимость вязкости базальтовых расплавов от химического состава исходного минерального сырья // М.: Стекло и керамика, 2011. №10. С. 11-14.
18. **Технологические** свойства базальтовых расплавов / Е.Л. Воронкович, Л.Ф. Папко // Материалы 9-й Всероссийской научно-практической конф. Молодых ученых «Россия молодая», Кемерово: КузГТУ, 2017. С. 24-27.
19. **Свойства** расплавов основных магматических горных пород Украины и волокон на их основе / В.А. Дубровский, А.Ф. Махова, В.А. Рычко и др. // Сборник статей Волокнистые материалы из базальтов Украины. Киев: Техника, 1971. 278 с.
20. **С.П. Оснос.** О характеристиках базальтовых волокон и областях их применения // СПб.: Композитный мир, 2010. №3. С. 24-28.

И.В. Яковлев, Н.В. Авдокунин.

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

АННОТАЦИЯ

Предварительный анализ тепловых режимов ЦОД показал, что необходимость охлаждения аппаратуры центров приводит к существенным затратам энергетических ресурсов. В процессе охлаждения оборудования центров к охлаждающему воздуху подводится значительное количество теплоты, которая отводится в окружающую среду. Эта теплота представляет вторичный энергетический ресурс, который может быть использован различными способами. Одним из таких способов может быть применение теплового насоса, преобразующего теплоту низкого потенциала в теплоту, потенциал которой достаточен для отопления помещений ЦОД.

Целью работы было моделирование системы утилизации тепла вытяжного воздуха ЦОД с применением теплообменника - утилизатора и теплового насоса с целью использования теплоты в системе отопления офисной части ЦОД.

1. ВВЕДЕНИЕ

Представить современную жизнь без использования компьютерных систем невозможно. Их используют в различных сферах: государственных учреждениях, банках, в медицине, в образовании и т.д. Всю накопленную информацию необходимо правильно систематизировать, обрабатывать и хранить в определенных местах. В связи с этим и возникла необходимость в центрах обработки данных (ЦОД).

Центры обработки данных (ЦОД) представляют собой одни из наиболее энергоёмких потребителей. По состоянию на 2015 год потребление всеми ЦОД в мире составляло не менее 10% от общемирового потребления электрической энергии [1].

Потребление электрической энергии центрами обработки данных, учитывая постоянный рост мощностей, имеет тенденцию постоянного роста. По данным обзора энергосберегающих проектов в области энергопотребления ЦОД [1] потребление электроэнергии всеми ЦОД мира ежегодно увеличивается на 12%. Россия не исключение, например, по состоянию на 2013 год рост энергопотребления ЦОД составил 19%.

Почти 50% потребляемой ЦОД энергии тратится на охлаждение оборудования центров. Эта часть потребляемой ЦОД энергии, рассматривая её как вторичный энергетический ресурс, может быть полезно использована, например, на собственные

нужды центров или на теплоснабжение собственных структур или других близлежащих объектов теплоснабжения. Использование сбросной теплоты ЦОД служит в первую очередь решению задачи снижения уровня электропотребления ЦОД.

Мировой опыт использования сбросной теплоты ЦОД показывает, что возможны различные использования теплоты ЦОД:

- использование теплоты охлаждающей системы оборотного водоснабжения ЦОД в качестве источника низкопотенциальной теплоты для теплового насоса с дальнейшей её подачей в систему централизованного теплоснабжения объектов;

- использование сбросной теплоты вентиляционного воздуха теплоты в качестве источника низкопотенциальной теплоты для теплового насоса с дальнейшим её применением в системе централизованного теплоснабжения объектов жилищно-коммунального хозяйства;

- прямое использование сбросной теплоты ЦОД на собственные нужды, например, в системе подготовки воздуха для охлаждения оборудования.

Естественно масштаб применения сбросной теплоты определяется мощностью оборудования ЦОД. Это могут быть и собственные нужды ЦОД и потребности в централизованном теплоснабжении целых жилых районов.

За последнее десятилетие в мире реализован ряд успешных энергосберегающих проектов по утилизации сбросной теплоты ЦОД. В 2010-2015 гг. Например, в Финляндии внедрены проекты по использованию теплоты ЦОД в системах централизованного теплоснабжения городов Хельсинки, Эспоо, Мянтсяля [1]. В последнем случае в самом ЦОД потребление электроэнергии снизилось более, чем на 30%. И это не единственный пример. Британская компания AQL, предоставляющая телекоммуникационные услуги, в ходе полной реконструкции своего ЦОД (г. Лидс) в 2013 г. внедрила систему утилизации выделяемого ЦОД тепла, которое используется для отопления своего же конференц-зала на 300 мест [1].

Реализованные проекты показывают, что величина тепловой нагрузки от утилизации теплоты ЦОД находится на уровне не выше 10 Гкал/ч [1]. С ростом мощностей ЦОД возможности по использованию сбросной теплоты ЦОД будут только возрас-

тать.

В работе анализируется работа системы утилизации сбросной теплоты ЦОД на основе конденсационного теплообменника – утилизатора и теплового насоса. Полученную тепловую энергию предполагается использовать для отопления офисного помещения ЦОД. Предлагается методика оценки энергетического энергосберегающего эффекта от использования сбросной теплоты ЦОД.

2. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА ЦОД

Возможны следующие способы утилизации теплоты вытяжного воздуха ЦОД и использование утилизируемой теплоты:

- 1) передача теплоты вытяжного воздуха к приточному в рекуперативном или регенеративном теплообменнике с целью его предварительного подогрева;
- 2) передача теплоты вытяжного воздуха к приточному с применением схемы с промежуточным контуром и теплообменником с выпадением влаги;
- 3) передача теплоты от вытяжного воздуха к воде в системе отопления офисного помещения центра с использованием промежуточного контура и теплового насоса типа «антифриз – вода».

Применение той или иной схемы ограничено потребностью в нагреве наружного воздуха, поступающего в помещение ЦОД с целью охлаждения оборудования, или потребностью в тепловой энергии на нужды отопления офисного помещения ЦОД. В работе анализируется работа установки утилизации теплоты вытяжного воздуха ЦОД с целью отопления офисного помещения, принципиальная которой представлена на рис. 1.

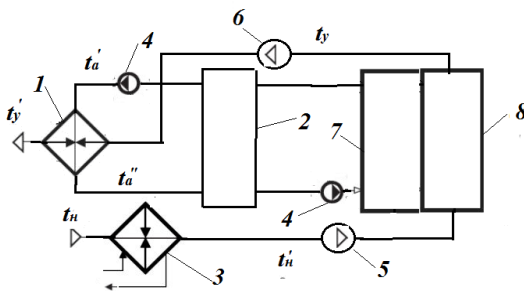


Рис. 1. Принципиальная схема утилизации теплоты вытяжного воздуха ЦОД. 1 – теплообменник – утилизатор; 2 – тепловой насос типа «антифриз – вода»; 3 – калорифер нагрева наружного воздуха; 4 – циркуляционный насос; 5 – приточный вентилятор; 6 – вытяжной вентилятор; 7 – машинное помещение ЦОД; 8 – офисное помещение ЦОД.

Дата-центр состоит из двух прилегающих помещений: машинный зал и офисная часть. В машинном зале находятся большое количество стоек с аппаратурой, которые выделяют теплоту и отдают ее охлаждающему воздуху. Температура удаляемого воздуха: $t_y=30^{\circ}\text{C}$ или $t_y=35^{\circ}\text{C}$.

Вытяжной воздух используется в качестве низкопотенциального источника теплоты для теплового насоса типа «антифриз – вода» (ТН). Для утили-

зации сбросного тепла необходимо предусмотреть теплообменный аппарат, встраиваемый в вытяжной воздуховод системы вентиляции ЦОД. Теплота от вытяжного воздуха с помощью промежуточного теплоносителя (антифриза) передается испарителю теплового насоса. Теплота промежуточного теплоносителя преобразуется в тепловом насосе и в конденсаторе передается воде, поступающей в бак аккумулятора. Из бака аккумулятора нагретая вода поступает в систему отопления офисной части помещения ЦОД.

В связи с тем, что тепловой насос может нагреть воду до небольших температур $45\text{-}55^{\circ}\text{C}$, его используют в системах отопления, в которых такая температура считается достаточной. Под такими системами подразумевается применение теплового насоса с теплым полом или фанкойлами. Стоит помнить, что воздушный тепловой насос имеет ограничение по используемой низкопотенциальной температуре, в связи с этим необходимо предусмотреть любой другой источник тепла (например, электрический котел).

Цель работы - оценка энергетической эффективности утилизации теплоты вытяжного воздуха ЦОД. В качестве критерия энергетической эффективности предлагается показатель снижения затрат условного топлива на производство энергоносителей, потребляемых ЦОД – в дальнейшем экономии условного топлива.

В случае использования теплоты вытяжного воздуха с применением теплового насоса длительность периода, за который рассчитывается экономия, ограничен температурой наружного воздуха 8°C (длительностью отопительного периода). Расчетный период может быть расширен на весь год, если в летнее время тепловой насос будет работать в режиме охлаждения воздуха.

Кроме того, работа теплового насоса требует затрат электрической энергии. Это означает, что эффект от применения теплового насоса в системе утилизации - экономия энергоресурсов ЦОД - следует представить в затратах условного топлива.

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ЦОД

В основе методики энергетические и материальные балансы помещений ЦОД, теплообменника – утилизатора и теплонасосной установки (ТНУ).

Тепловой баланс для машинного зала:

$$c_p G_n t_n + \Delta Q + Q_o^{M3} = c_p G_y t_y + Q_{пот}^{\Sigma}, \quad (1)$$

где G_n – расход приточного воздуха, кг/с; t_n – температура приточного воздуха, К; ΔQ – тепловыделение от стоек ЦОД, кВт; G_y – расход удаляемого воздуха, кг/с; t_y – температура удаляемого воздуха, К; $Q_{пот}^{\Sigma}$ – суммарные потери теплоты через ограждающие конструкции, кВт; c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха кДж/(кг·К); Q_o^{M3} – отопительная тепловая нагрузка машинного зала, кВт.

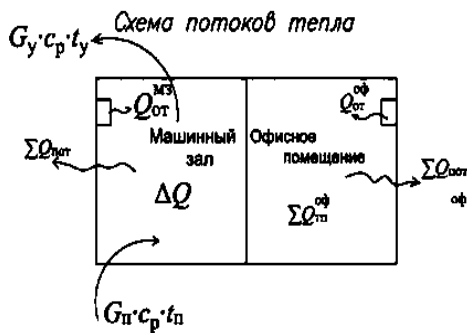


Рис. 2. Схема тепловых потоков машинного и офисного помещения цетра обработки данных.

При сбалансированной системе отопления, поддерживающей дежурную температуру в помещении машинного зала, вся теплота, выделяемая стойками с аппаратурой, снимается приточным вентиляционным воздухом:

$$c_p G_p t_p + \Delta Q = c_p G_y t_y, \quad (2)$$

Требуемый расход воздуха на охлаждение стоек с аппаратурой

$$G_p = \frac{\Delta Q}{c_p (t_y - t_p)}, \quad (3)$$

Отопительная нагрузка офисного помещения находится из теплового баланса

$$Q_o^{оф} = Q_{пот}^{\Sigma} - Q_{тп}^{\Sigma}, \quad (4)$$

где $Q_o^{оф}$ - расчетная отопительная тепловая нагрузка офисной части, кВт; $Q_{тп}^{\Sigma}$ - тепловыделения в офисной части, кВт; $Q_{пот}^{\Sigma}$ - суммарные потери теплоты в офисной части через ограждающие конструкции, кВт.

Тепловая мощность, передаваемая антифризу в теплообменнике - утилизаторе

$$Q_{ту} = W_{мин} \varepsilon (t_y - t'_a), \quad (5)$$

где ε - эффективность теплообменного аппарата; t'_a - температура антифриза на входе в теплообменный аппарат утилизатор, $W_{мин}$ - минимальная (для двух теплоносителей) расходная теплоемкость, кДж/(кг К).

Тепловой баланс ТНУ:

$$Q_{ТНУ} = Q_{исп} + P_{ТНУ} = Q_{исп} + \frac{Q_{ТНУ}}{\mu}, \quad (6)$$

где $Q_{ТНУ}$ - тепловая мощность, кВт, отводимая от конденсатора ТНУ; $P_{ТНУ}$ - электрическая мощность, потребляемая ТНУ, кВт; μ - коэффициент трансформации энергии.

Тепловая мощность теплообменника - утилизатора равна тепловой мощности подводимой к испарителю ТНУ:

$$Q_{ТУ} = Q_{исп} \quad (7)$$

Из уравнений (6)-(7) следует, что теплопроизводительность ТНУ - мощность, передаваемая от конденсатора ТНУ в систему отопления, кВт:

$$Q_{ТНУ} = W_{мин} \varepsilon (t_y - t'_a) \frac{\mu}{\mu - 1}. \quad (8)$$

Далее полагаем, что

- количества тепловой энергии, получаемой от ТНУ, достаточно для обеспечения отопительной нагрузки офисного помещения ($Q_o \leq Q_{ТНУ}$);

- температура воздуха, удаляемого из машинного зала, постоянна, что обеспечивается неизменным избыточным теплом и расходом воздуха;

- температура антифриза на выходе из теплообменника утилизатора постоянна и не зависит от температуры наружного воздуха;

- водяные эквиваленты теплоносителей удовлетворяют условию

$$c_p G_p \leq c_{pa} G_a, \quad (9)$$

Тогда расход тепловой энергии за отопительный период при теплоснабжении офисного помещения от ТНУ

$$Q_{ТНУ} = c_p G_p (t_y - t'_a) \frac{\mu}{\mu - 1} \sum_i^N n_i, \quad (10)$$

где $\sum_i^N n_i$ - продолжительность отопительного периода.

Экономия тепловой энергии ЦОД за отопительный период в предположении, что замещаемая из централизованной сети тепловая энергия, равна тепловой энергии, получаемой от ТНУ, составит

$$\Delta Q = Q_{ТНУ} = c_p G_p (t_y - t'_a) \frac{\mu}{\mu - 1} \sum_i^N n_i. \quad (11)$$

Потребление электрической энергии тепловым насосом за отопительный период:

$$Q_{ТНУ} = c_p G_p (t_y - t'_a) \frac{1}{\mu - 1} \sum_i^N n_i. \quad (12)$$

Экономия энергоресурсов с учетом затрат электрической энергии ТНУ:

$$\Delta Q_{эк} = \varepsilon c_p G_p (t_y - t'_a) \frac{1}{\mu(t'_a) - 1} [\mu(t'_a) b_Q - b_{\varepsilon}] \sum_i^N n_i, \quad (13)$$

где b_Q и b_{ε} - удельные расходы условного топлива на выработку единицы теплоты, кг у.т./кВт·ч, и электрической энергии, кг у.т./кВт·ч,

или

$$\Delta Q_{эк} = \varepsilon \Delta Q \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_p} F(\mu, b_Q, b_{\varepsilon}) \sum_i^N n_i. \quad (14)$$

Из анализа полученного соотношения видно, что при принятых допущениях экономия условного топлива при применении теплового насоса прямо пропорциональна мощности теплоступления от охлаждаемого оборудования и тепловой эффективности теплообменника - утилизатора. Зависимость экономии от коэффициента трансформации энергии и удельных расходов топлива на производство тепловой и электрической энергии представлена функцией $F(\mu, b_Q, b_{\varepsilon})$.

Экономия энергоресурсов удобно представить в виде удельного показателя - удельной экономии энергоресурсов в расчете на единицу количества тепловой энергии, утилизируемой в теплообменнике за отопительный период ($\varepsilon c_p G_p (t_y - t'_a) \sum_i^N n_i$), кг у.т./кВт·ч

$$b_{эк} = F(\mu, b_Q, b_{\varepsilon}) = \frac{1}{\mu(t'_a) - 1} [\mu(t'_a) b_Q - b_{\varepsilon}] \quad (15)$$

Зависимость удельной экономии энергоносителей от коэффициента трансформации и соотноше-

ния между удельными расходами условного топлива рис. 3. Видно, что при принятых удельных расходах $b_Q = 0,1278$ кг у.т./кВт·ч и $b_{Э} = 0,3445$ кг у.т./кВт·ч экономия энергоресурсов становится положительной при значении коэффициента трансформации энергии ТНУ больше 2,8. При меньших значениях коэффициента трансформации расход условного топлива на производство потребляемой электрической энергии превышает эффект от применения теплового насоса (экономия тепловой энергии).

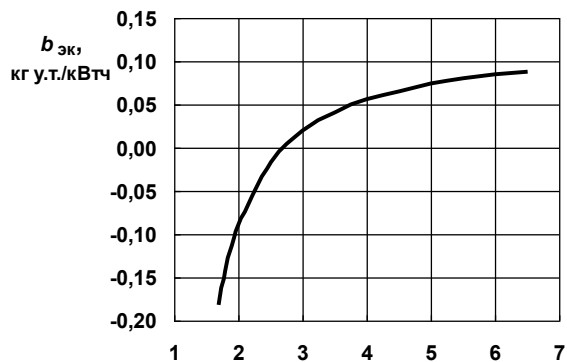


Рис. 3. Зависимость удельной экономии энергоресурсов в условном топливе, кг у.т./кВт·ч, от коэффициента трансформации энергии теплового насоса. Расчет по (15).

Коэффициент трансформации энергии одного из типов тепловых насосов типа «антифриз – вода» был аппроксимирован зависимостью вида

$$\bar{\mu}(t) = \frac{\mu(t)}{\mu_{\text{ном}}} = k \frac{T}{T_k - T} \frac{1}{\mu_{\text{ном}}}, \quad (16)$$

где T - температура источника теплоты (температура испарения), К; T_k - температура конденсации (температура воды, подаваемой в систему отопления). Характеристика теплового насоса в относительном виде позволяет представить осредненную зависимость $\mu(t)$ для тепловых насосов различной теплопроизводительности. На рис. 4 приведена обобщенная характеристика тепловых насосов типа ALTEL GWHP различной мощности по нагреву воды. Наилучшее приближение к данным производителя получено при значении корректирующего коэффициента $k = 0,45$ при среднем значении номинального коэффициента трансформации $\mu_{\text{ном}} = 2,86$.

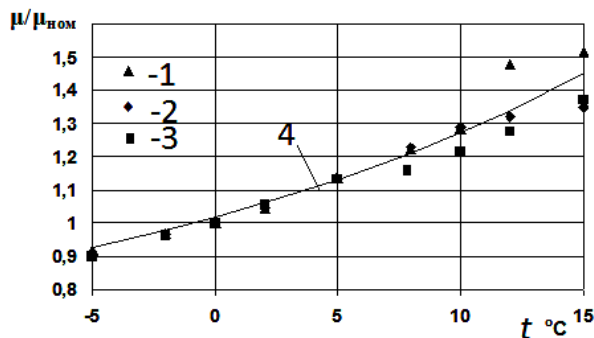


Рис. 4. Зависимость относительного коэффициента трансформации энергии ТНУ типа ALTEL GWHP [2] от температуры источника. 1 – GWHP 10 (12,3 кВт); 2 – GWHP 19 (24,7 кВт); 3 – GWHP 30 (37,4кВт); 4 – расчет (16).

В работе [3] приводятся результаты измерения теплотехнических параметров в системе утилизации теплоты вытяжного воздуха плавательного бассейна. Система аналогична рассматриваемой в данной работе. Теплота вытяжного воздуха передается посредством теплообменника и промежуточного контура к испарителю теплового насоса типа «антифриз – вода». Нагретая в тепловом насосе вода поступает в систему подготовки горячей воды для нужд бассейна. Применены тепловой насос Nibe. Приводимые в [3] опытные данные, полученные для различных режимов работы установки, обрабатывались в виде (17) - удельной экономии энергии в условном топливе за период длительностью n , часов.

$$b_{\text{эк}} = \frac{Q_{\text{ТНУ}} b_Q - P_{\text{ТНУ}} b_{\text{Э}}}{Q_{\text{ТНУ}} n}. \quad (17)$$

По опытным данным строилась зависимость $b_{\text{эк}}(\mu)$, представленная на рис. 5 точками. Эта зависимость сравнивалась с расчетом удельной экономии по предлагаемой модели (15).

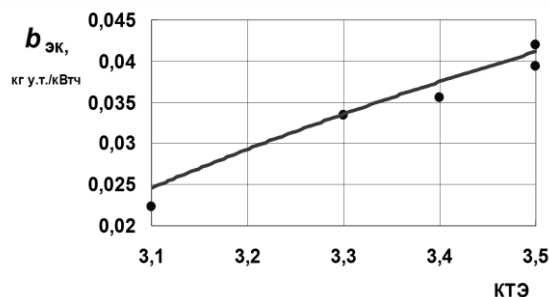


Рис. 5. Зависимость удельной экономии от коэффициента трансформации энергии. • - расчет по опытным данным [3]; ---- - расчет по формуле (15).

Сравнение опытных результатов [3] с расчетом по зависимости (15) показывает хорошее совпадение. Заметим, что в [3] положительной экономия становилась при значениях коэффициента трансформации энергии более 3, что тоже согласуется с результатами, представленными на рис. 3.

Практический интерес представляет исследование зависимости экономии от температуры антифриза в промежуточном контуре. Используя зависимости (14) и (16), можно рассчитать удельную экономию энергоресурсов в условном топливе в расчете на единицу количества тепловой энергии, выделяемой оборудованием ЦОД в течение расчетного периода (кг у.т./кВт·ч):

$$b'_{\text{эк}} = \frac{\Delta Q_{\text{эк}}}{\Delta Q \sum_i^n n_i} = \varepsilon \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_{\text{п}}} \frac{1}{\mu(t'_a) - 1} [\mu(t'_a) b_Q - b_{\text{Э}}]. \quad (18)$$

С учетом (15) формула для удельной экономии (19) может быть представлена в виде

$$b'_{\text{эк}} = \frac{\Delta Q_{\text{эк}}}{\Delta Q \sum_i^n n_i} = \varepsilon \frac{t_y - t'_a}{t_y - t_{\text{п}}} b_{\text{эк}} \quad (19)$$

Сравнивая результаты расчетов, приводимые на рис. 3 и 6, можно утверждать, что удельная экономия энергоносителей в расчете на единицу количества тепловой энергии, поступающей от оборудования ЦОД за рассматриваемый период, будет положительной при средней температуре антифриза не менее -1 °C ($\mu(\bar{t}_a) > 3$).

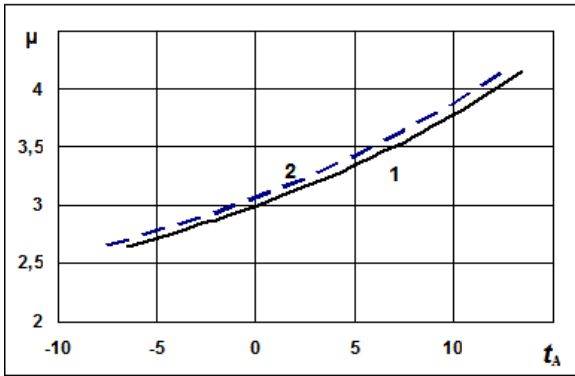


Рис. 6. Коэффициент трансформации в зависимости от средней температуры антифриза. Расчет по (16). 1 - $\Delta t_a = 3^\circ\text{C}$; 2 - $\Delta t_a = 5^\circ\text{C}$.

С учетом того факта, что режим охлаждения воздуха в теплообменнике – утилизаторе предполагается «сухим» (без выпадения влаги на поверхности теплообмена со стороны воздуха), рабочий диапазон температур антифриза следует ограничить из условия $t_a' < t_p$. Для заданных параметров воздуха на входе в теплообменник (t_y, d_y) температура точки росы определяется зависимостью от парциального давления водяного пара [4]:

$$t_p = 1,0496(\ln p_n)^2 - 0,073135(\ln p_n) - 42,6021 \quad (21)$$

где p_n – парциальное давление водяного, Па, при влагосодержании удаляемого воздуха d_y :

$$p_n = \frac{d_y p_6}{d_y + 622} \quad (22)$$

Барометрическое давление принималось равным $p_6 = 101325$ Па. По расчету с использованием уравнений (21)-(22) температура точки росы при параметрах воздуха $t_y = 30^\circ\text{C}$, $\phi_y = 28\%$ равна $t_p = 9,4^\circ\text{C}$. Это означает, что область рабочих режимов системы утилизации теплоты ЦОД при принятых параметрах воздуха и $\Delta t_a = 3^\circ\text{C}$ лежит в области

$$t_a' \geq 6,4^\circ\text{C}; \quad t_a'' \geq 9,4^\circ\text{C}; \quad \bar{t}_a \geq 7,9^\circ\text{C}, \quad (22)$$

при $\Delta t_a = 5^\circ\text{C}$

$$t_a' \geq 4,4^\circ\text{C}; \quad t_a'' \geq 9,4^\circ\text{C}; \quad \bar{t}_a \geq 6,9^\circ\text{C}, \quad (23)$$

Расчеты по зависимости (19) удельной экономии энергоресурсов представлены на рис. 7. Расчеты приведены в виде зависимостей удельной экономии от средней температуры антифриза. В расчетах значения величин, входящих в уравнение (19), задавались согласно табл. 1. Параметры приточного воздуха в системе вентиляции ЦОД приняты по требованиям [5].

Таблица 1. К расчету по формуле (18)

$t_y, ^\circ\text{C}$	30	$t_n, ^\circ\text{C}$	14	t_a'
$d_y, \text{г/кг}$	7,3	$d_n, \text{г/кг}$	7,3	$t_a' \geq 4,4^\circ\text{C}$
$\phi_y, \%$	28	$\phi_n, \%$	75	
$\Delta t_a, ^\circ\text{C}$				3 (5)

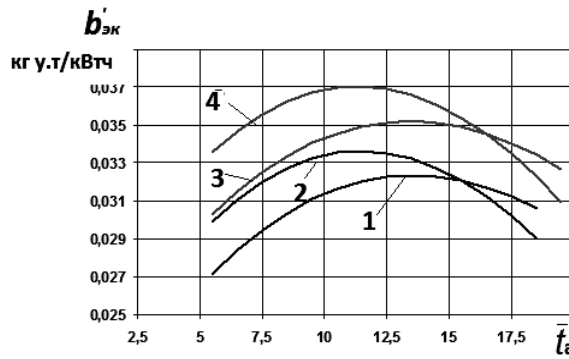


Рис. 7. Зависимости удельной экономии от средней температуры антифриза (19). 1 - $t_y = 30^\circ\text{C}$, $\Delta t_a = 3^\circ\text{C}$; 2 - $t_y = 35^\circ\text{C}$, $\Delta t_a = 3^\circ\text{C}$; 3 - $t_y = 35^\circ\text{C}$, $\Delta t_a = 5^\circ\text{C}$; 4 - $t_y = 30^\circ\text{C}$, $\Delta t_a = 5^\circ\text{C}$;

При фиксированной тепловой эффективности теплообменника - утилизатора и разности температур удаляемого и приточного воздуха снижение температуры антифриза приводит к росту разности ($t_y - t_a'$) и снижению значения функции $F(\mu, b_Q, b_3)$. Следовательно, зависимость удельной экономии энергоресурсов от средней температуры антифриза (19) носит немонотонный характер.

Таблица 2. Параметры воздуха и антифриза в точках максимума

$t_y, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_a, ^\circ\text{C}$	$t_a', ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_a, ^\circ\text{C}$	$(b'_{эк})_{\text{макс}}$, кг у.т./кВт·ч
30	3	12	13,5	0,0323
35	3	10	11,5	0,0336
30	5	10,5	12,5	0,351
35	5	12,5	10,5	0,0370

Расчеты по зависимости (19) (рис. 7) показали, что в рассматриваемой области существует оптимальное значение средней температуры антифриза, при которой энергосберегающий эффект будет максимальным. Параметры воздуха и антифриза в точках максимума на рис. 7 приведены в табл. 2.

При понижении температуры антифриза ниже точки росы ($t_a'' \leq 9,4^\circ\text{C}$) процесс теплопередачи в теплообменнике – утилизаторе сопровождается конденсацией влаги на поверхности теплопередачи со стороны воздуха. При этом теплосъем увеличивается за счет скрытой теплоты конденсации водяного пара из воздуха [6].

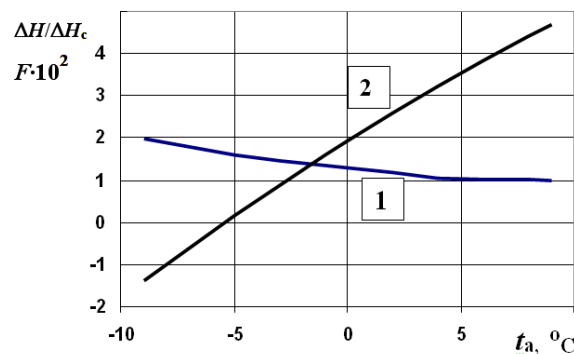


Рис. 8. Зависимости относительной мощности теплообменника - утилизатора (1) и удельной экономии $b'_{эк} \cdot 10^2$ (2) от средней температуры антифриза.

Были сделаны оценки изменения мощности теплообменника с выпадением влаги по сравнению с

максимальной мощностью «сухого» теплообменника при изменении температуры антифриза от точки росы до -1°C . Это изменение мощности можно представить (при неизменном расходе воздуха) в виде [7]:

$$\frac{\Delta H}{\Delta H_c} = \frac{H_y - H'_y}{H_y - H_y^{\text{мин}}}, \quad (24)$$

где $H_y^{\text{мин}}$ - энтальпия воздуха на выходе из теплообменника при температуре точки росы в «сухом» режиме его охлаждения, H'_y - энтальпия влажного воздуха на выходе из теплообменника в режиме выпадения влаги.

При изменении температуры антифриза от 9 до -1°C отношение (24) возрастает примерно в 1,5 раза. В то же время в указанном диапазоне температур $b_{\text{эк}}$ (18) уменьшается примерно в 3 раза (рис. 8). Более быстрый темп снижения $b_{\text{эк}}$ по сравнению с темпом роста тепловой мощности, передаваемой в теплообменнике, означает, что функция $b'_{\text{эк}}$ носит вид, монотонно убывающий при снижении температуры антифриза от температуры точки росы до -1°C . Это означает, что рабочий диапазон рассматриваемой системы утилизации теплоты ЦОД, включающей теплообменник утилизатор и тепловой насос, лежит в области температур, где может быть достигнут максимум экономии энергии (табл. 1 и 2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена принципиальная схема утилизации тепла вентиляционных выбросов с целью использования его в системе отопления офисного помещения. Система утилизации теплоты представлена теплообменником-утилизатором и тепловым насосом типа «антифриз – вода», объединенными промежуточным контуром с циркулирующим антифризом.

Представлены потоки теплоты в офисной части и в машинном зале. Составлены энергетические балансы всего здания, отдельных теплопередающих аппаратов системы утилизации теплоты вентиляционных выбросов и системы в целом.

Предложена методика расчета удельной экономии тепловой энергии за рассматриваемый период в результате замещения энергии, получаемой из тепловой сети. Показано, что положительная экономия энергии возможна при коэффициенте трансформации теплового насоса $\mu > 3$. Этот результат согласуется с результатами другой работы [3].

Проанализирована работа теплообменника -

утилизатора при переменной средней температуре антифриза и фиксированной разности температур на входе и выходе из аппарата. Для заданных параметров удаляемого воздуха получены оптимальные значения температуры антифриза, при которых экономия энергетических ресурсов ЦОД будет максимальной.

Сделаны оценки увеличения мощности теплообменника - утилизатора при работе в конденсационном режиме. Показано, что для принимаемых к расчету характеристик тепловых насосов оптимальными режимами работы системы утилизации будут режимы с температурой воздуха на выходе теплообменника - утилизатора не ниже температуры точки росы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТНУ — сокращенное наименование теплонасосной установки

ЦОД — сокращенное наименование центра обработки данных

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пузаков В.С.** Облачные технологии – энергоемкий потребитель или эффективный источник теплоснабжения / *Новости теплоснабжения*, №2 (198), 2017.
2. **Тепловые насосы** [Электрон. ресурс.] Режим доступа: <http://www.altagroup.ru/oborudovanie/teplovye-nasosy>, свободный
3. **Сопоставление** теоретической и реальной эффективности теплонасосной установки в системе горячего водоснабжения / И.В. Яковлев, А.Б. Гаряев, И.В. Парёхина, В.Ю. Самойленко // *Промышленная энергетика*, №5, 2015. С. 45-50.
4. **СН 512-78** Инструкция по проектированию зданий и помещений для электронно-вычислительных машин. М.: Стройиздат. 1979.
5. **Тарабанов М.Г.** *J-d* - диаграмма влажного воздуха : метод. Указания / М.Г. Тарабанов. – Волгоград, 2003.
6. **Гаряев А.Б., Яковлев И.В.** Утилизация теплоты вторичных энергетических ресурсов в конденсационных теплообменниках: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.-120 с.
7. **Исследование** эффективности теплообменника в системе утилизации теплоты вытяжного воздуха бассейна / И.В. Яковлев, Ханин А.В., Парёхина И.В. // *Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ – 2017»* Т. 2 . М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С. 276-280.

И.В. Яковлев, Д.В. Смоляков.

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ В СИСТЕМАХ МИКРОКЛИМАТА ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ

АННОТАЦИЯ

Глубокая утилизация с помощью конденсационных теплообменников позволяет извлечь максимальное количество теплоты из воздуха, удаляемого из помещений с повышенной влажностью.

В работе изучается влияние параметров теплоносителей на отводимую в конденсационном теплообменнике тепловую мощность.

Разработан алгоритм вычисления параметров воздуха после конденсационного теплообменника по его заданным начальным параметрам и средней температуре второго теплоносителя. Результаты расчетов сравниваются с опытными данными.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большое внимание уделяется утилизации вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Из года в год потребление энергетических ресурсов повышается, что сказывается и на затратах генерирующих компаний. Наиболее актуальной проблемой в наше время является сокращение потребления топлива - энергетических ресурсов. Ограниченность запасов ресурсов, постоянный рост цен на тарифы, такие факторы, как большое количество нерационально утилизированных вторичных ресурсов дает повод к глубокому анализу возможных решений данной задачи.

В качестве ВЭР может использоваться вытяжной вентиляционный воздух зданий. Особое внимание уделяется зданиям с повышенной влажностью, так как позволяет извлечь максимальное количество теплоты из удаляемого воздуха.

При охлаждении газов ниже точки росы на поверхности утилизатора теплоты происходит конденсация водяных паров и выделяется скрытая теплота парообразования. При этом значительно повышается коэффициент теплопередачи в этих теплообменниках. Требуемая площадь теплообменной поверхности (следовательно, габариты и стоимость оборудования) будут существенно зависеть от температуры конденсации паров, которая, в свою очередь, определяется схемой теплоутилизационной установки, температурами и расходами теплоносителей, а также влажностью удаляемого воздуха. Поэтому анализ и выбор схемы установки и режимных параметров представляет собой важную задачу.

Особое внимание уделяется утилизации тепла вытяжного воздуха в зданиях с повышенной влажностью, к которым относятся здания плавательных бассейнов [1-4].

Основным элементом систем утилизации теплоты влажного воздуха является конденсационный теплообменник – утилизатор (КТУ).

В работе анализируется работа КТУ в системе микроклимата бассейна с целью исследования влияния начальных параметров вытяжного воздуха и температуры антифриза в промежуточном контуре на отводимую от воздуха тепловую мощность, передаваемую в систему подогрева воды.

2. УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВЫТЯЖНОГО ВОЗДУХА В ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНАХ

В бассейнах с открытой поверхностью воды и дорожек испаряется большое количество воды, что приводит к переувлажнению воздуха и насыщению его химическими веществами, необходимыми для обработки воды.

Утилизируемое тепло может применяться по различным направлениям, например, для подогрева приточного воздуха в системе вентиляции бассейна (рис. 1) [5].

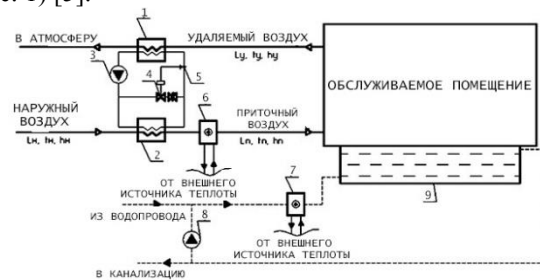


Рис. 1. Принципиальная схема системы микроклимата бассейна с утилизацией теплоты вытяжного воздуха и подогревом приточного. 1 – утилизатор теплоты удаляемого воздуха; 2 – первый подогрев приточного воздуха; 3 – циркуляционный насос; 4 – двухходовой клапан; 5 – измеритель температуры обратной линии; 6 – второй подогрев приточного воздуха; 7 – догрев воды в бассейне; 8 – циркуляционный насос; 9 – чаша бассейна.

Другое направление использования тепла вытяжного воздуха - подогрев воды в чаше бассейна или подогрев воды в системе горячего водоснабжения (рис. 2) [5-7]. Как показано в работе [5] такой способ использования тепла вытяжного воздуха является наиболее энергоэффективным. Такой путь

предполагает повышение потенциала низкотемпературного источника (вытяжного воздуха) с помощью теплового насоса. Схема была реализована в установке утилизации теплоты вытяжного воздуха в бассейне МЭИ [5-7].

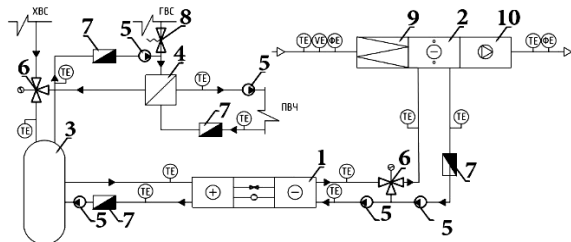


Рис. 2. Применение теплообменника – утилизатора вытяжного воздуха бассейна с целью подогрева воды в чаше бассейна и воды в системе горячего водоснабжения. 1 – теплонасосная установка; 2 – воздухоохладитель; 3 – буферный бак накопитель; 4 – промежуточный теплообменник; 5 – циркуляционный насос; 6 – смешивающий клапан с электроприводом; 7 – электромагнитный расходомер; 8 – соленоидный клапан; 9 – фильтр карманный; 10 – вентилятор. TE – термометр сопротивления платиновый; VE – преобразователь скорости потока; FE – ёмкостный датчик влажности воздуха.

Теплота влажного вытяжного воздуха передавалась промежуточному теплоносителю в теплообменнике – утилизаторе 2, а от промежуточного теплоносителя – к испарителю теплонасосной установки (ТНУ) 1. Теплота конденсации ТНУ посредством аккумуляторного бака 3 передается потребителям – установке подготовки горячей воды или воде в чаше бассейна. Оснащение установки: приборы измерения температур, расходов теплоносителей и относительной влажности воздуха в рабочих контурах.

Были проведены серии опытов с целью определения оптимальных параметров работы системы и реальных показателей работы ТНУ и КТУ в системе ГВС [5-7].

В процессе испытаний установки измерялись следующие параметры воздуха при прохождении тракта теплообменника – утилизатора: температура t_y и относительная влажность воздуха ϕ_y на входе в теплообменник, температура t'_y и относительная влажность воздуха ϕ'_y на выходе из теплообменника, расход воздуха. Измерялись также расход и температуры антифриза (пропиленгликолевой смеси) на входе и выходе из теплообменника – утилизатора (t'_a и t''_a).

Для измерения температур промежуточного теплоносителя (антифриза) и воды были задействованы платиновые термометры сопротивления типа КТС-Б (входят в состав теплосчетчика ТБН КМ-9). Расход воздуха измерялся преобразователем скорости потока VE, а относительная влажность – ёмкостным датчиком влажности воздуха.

Управление системой и сбор данных с измерительных приборов осуществлялась с помощью промышленного контроллера. Отображение, сохранение и архивирование данных для последующей обработки производилось SCADA-системой на автоматизированном рабочем месте (АРМ) диспетчера.

Для удобства работы диспетчера данные отображаются на мнемосхемах.

С целью изучения влияния параметров теплоносителей на отводимую в теплообменнике КТУ тепловую мощность варьировалась температура промежуточного теплоносителя путем изменения его расхода.

Параметры воздуха на входе в теплообменник определялись текущим температурным и влажностным режимом помещения бассейна.

На передаваемую в теплообменнике – утилизаторе тепловую мощность влияют параметры вытяжного воздуха (температура и относительная влажность) и средняя температура теплопередающей поверхности (опосредованно это влияние можно проследить через коэффициент выпадения влаги). Исследование влияния перечисленных факторов на приращение передаваемой тепловой мощности в теплообменнике – утилизаторе в режиме выпадения влаги – задача работы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Физическая модель процесса охлаждения воздуха в КТУ

Охлаждение вытяжного воздуха в теплообменнике утилизаторе возможно в двух режимах:

- при температуре воздуха на выходе из теплообменника выше температуры точки росы ($t'_y \geq t_p$) реализуется режим «сухого» теплообмена без выпадения влаги на поверхности теплообменника со стороны воздуха;

- при температуре воздуха на выходе из теплообменника выше температуры точки росы ($t'_y < t_p$) теплообменник работает в режиме конденсации влаги из воздуха, т.е. как конденсационный теплообменник (КТУ).

Область конечных состояний воздуха после КТУ в $H-d$ диаграмме может быть представлена в виде косоугольного треугольника, ограниченного с одной стороны линией относительной влажности 90%, с другой – касательной, проведенной из точки на диаграмме, отвечающей начальным параметрам воздуха (точка У на рис. 3), к линии насыщения. Третья сторона ограничивающей области – линия постоянного влагосодержания воздуха ($d_y = const$).

Вдоль этой линии изменяются состояния воздуха в режиме «сухого» теплообмена.

Изменение параметров воздуха в режиме выпадения влаги на диаграмме происходит вдоль линии У-У". Параметры воздуха в каждой точке этой линии должны удовлетворять уравнению тепломассопереноса при непосредственном контакте между воздухом и водой (конденсатом на поверхности теплопередачи):

$$\varepsilon = \frac{H - H_n}{(d - d_n)10^{-3}}, \quad (1)$$

где $H_{\text{п}}$ и $d_{\text{п}}$ - энтальпия и влагосодержание воздуха в приграничном слое у поверхности конденсата при парциальном давлении водяного пара в состоянии насыщения при температуре поверхности конденсата.

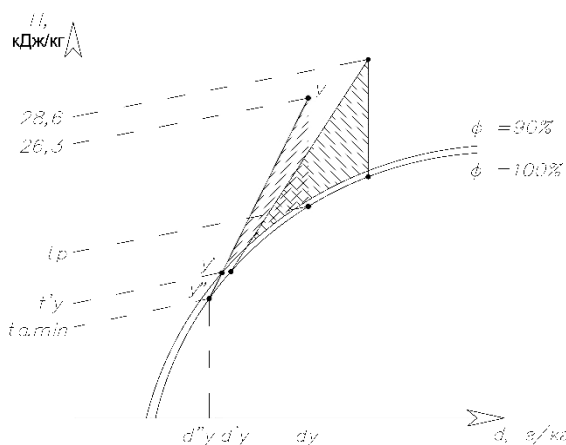


Рис. 3. Области изменения процессов воздуха в воздухоохладителе при различных начальных параметрах воздуха

Температура поверхности и параметры воздуха в приграничном слое изменяются вследствие тепло-массообмена между воздухом и конденсатом. Уравнение (1) представляет уравнение кривой, кривизна которой определяется интенсивностью изменения параметров воздуха в приграничном слое и взаимным течением теплоносителей (воздуха и антифриза).

Если предположить, что параметры воздуха в приграничном слое у поверхности конденсата постоянны, то уравнение (1) можно представить в виде (рис. 3) [8]:

$$\varepsilon = \frac{H_y - H_y''}{(d - d_y)10^{-3}} = \frac{H_y - H_y'}{(d - d_y)10^{-3}} = \text{const} \quad (2)$$

Уравнение (2) – уравнение прямой, соединяющей точки Y и Y'' на диаграмме рис. 3. Пренебрегая термическим сопротивлением стенки поверхности теплопередачи и слоя конденсата в первом приближении температуру поверхности конденсата можно задать, как среднюю температуру охлаждающего теплоносителя – антифриза.

При сделанных предположениях минимальная температура антифриза, при которой возможен процесс охлаждения воздуха с его осушением будет определяться положением точки касания линии Y-Y'' линии насыщения на диаграмме H-d (рис. 3). Минимальная температура антифриза может быть вычислена из уравнения касательной луча процесса, проведенного из точки, соответствующей параметрам воздуха на входе в теплообменник – утилизатор, к линии насыщения на H-d диаграмме.

Уравнение касательной в общем случае можно представить в виде

$$t(d) = t(d_y'') + t'(d_y'')(d - d_y''), \quad (3)$$

где $t(d)$ - температура воздуха с влагосодержанием d , $t(d_y'')$ - температура воздуха в точке касания с

влагосодержанием d_y'' ; $t'(d_y'')$ - производная функции $t(d)$ в точке касания. Зависимость температуры от влагосодержания на линии насыщения (функция $t_s(d_s)$) была получена путем аппроксимации расчетов по формулам, описывающих параметры состояния влажного воздуха:

$$t_s(d_s) = 0,7172 \ln^2(d_s) + 11,853 \ln(d_s) - 17,01 \quad (4)$$

Если физическая теплота конденсата, уходящего из КТУ, мала тепловой баланс КТУ может быть записан в следующем виде:

$$G(H_y - H_y') = G_a c_a (t_a'' - t_a'). \quad (5)$$

Здесь G – массовый расход воздуха, кг/с, H_y и H_y' – энтальпия воздуха на входе и выходе из КТУ соответственно, кДж/кг сухого газа, G_a – массовый расход антифриза, кг/с, c_a – теплоемкость антифриза, кДж/(кг К), t_a' и t_a'' температуры антифриза на входе и выходе из аппарата соответственно, °С.

Передаваемая в теплообменнике мощность в расчете на расход воздуха 1 кг/с, кДж/кг

$$q = H_y - H_y' = G_a c_a (t_a'' - t_a') / G \quad (6)$$

Наиболее простым и распространенным методом расчета КТУ является метод, основанный на понятии коэффициента влаговываждения. Этот метод строго справедлив только при постоянной температуре теплообменной поверхности. Однако этот метод применяют и при меняющейся температуре поверхности, если это изменение происходит в небольших пределах и если конденсация имеет место на всей поверхности теплообмена («сухие зоны» отсутствуют) [9]. Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха равен произведению коэффициента теплоотдачи в сухом режиме на коэффициент влаговываждения. Для расчета коэффициента влаговываждения используют выражение:

$$\xi = \frac{H_y - H_y'}{c_p (t_y - t_y')} \quad (7)$$

В инженерной практике в расчетах воздухоохладителей с выпадением влаги интерес представляет определение параметров воздуха на выходе из теплообменника при начальных заданных параметрах воздуха.

Условно процесс изменения параметров воздуха можно представить в H-d диаграмме в виде отрезка прямой Y-Y', так называемого луча процесса изменения параметров воздуха. Такое представление реального процесса изменения параметров воздуха условно правомерно при допущении о малом изменении температуры антифриза ($t_a' - t_a'' \rightarrow 0$) [9]. В полной мере такое представление процесса справедливо для теплообменников с фазовым превращением одного из теплоносителей, например, конденсаторов с воздушным охлаждением.

При заданных параметрах воздуха на входе в теплообменник направление луча процесса на поле H-d диаграммы задается значением средней тем-

пературы антифриза \bar{t}_a . В первом приближении среднее значение температуры антифриза можно представить как среднее арифметическое температур теплоносителя на входе и выходе из теплообменника. В идеальном процессе изменения параметров воздуха точка на диаграмме, отвечающая параметрам воздуха на выходе из теплообменника, представлена точкой пересечения изотермы \bar{t}_a и линии насыщения (точка Y'' на диаграмме рис. 4). В реальном процессе изменения параметров воздуха конечное значение относительной влажности воздуха (на выходе из теплообменника) будет меньше 100%.

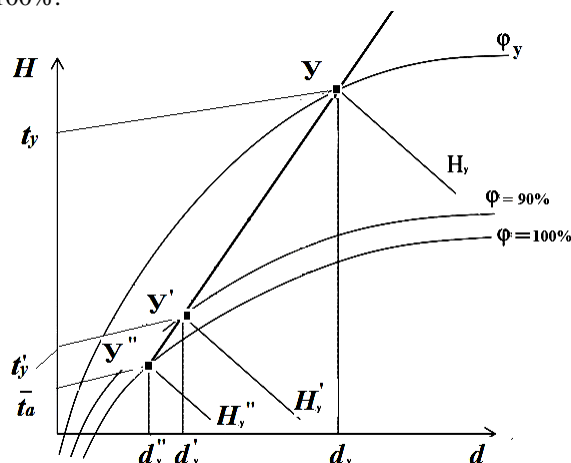


Рис. 4. Процесс охлаждения влажного воздуха в теплообменнике утилизаторе. $Y-Y'$ – реальный процесс охлаждения воздуха с влаговыпадением; $Y-Y''$ – идеальный процесс; $Y-Y''_m$ – касательная к линии насыщения.

Согласно существующим практическим рекомендациям относительная влажность воздуха на выходе теплообменника с выпадением влаги зависит от её начального значения. При начальной относительной влажности воздуха конечная влажность будет 90% [8]. Соответственно, параметры воздуха на выходе из теплообменника будут отвечать точке пересечения луча процесса и линии постоянной относительной влажности 90%.

Минимальная средняя температура антифриза будет соответствовать случаю касания луча процесса и линии насыщения. В этом случае теплосъём будет максимально возможным, так как все процессы осушения воздуха водой, а именно такой процесс имеет место в рассматриваемом случае, заканчиваются на линии насыщения (в идеальном случае). Этой ситуации соответствует процесс изменения параметров воздуха на рис. 4.

Была поставлена задача - разработать алгоритм вычисления параметров воздуха после конденсационного теплообменника по заданным начальным параметрам и температуре средней температуре второго теплоносителя. Вторая задача - сравнение результатов расчета с данными натурного эксперимента [5-7].

В связи с вышеизложенным были приняты допущения:

- температура воздуха на выходе из теплообменника ниже температуры точки росы, теплопередача в теплообменнике происходит с выпадением влаги;
- температура антифриза на выходе из теплообменника ниже температуры точки росы, что гарантирует отсутствие сухих зон;
- параметры воздуха в приграничном слое у поверхности конденсата постоянны;
- изменение температуры антифриза мало;
- относительная влажность воздуха на выходе из теплообменника принята 90%.

Принятые допущения позволяют использовать уравнения (2) и (5) и построение процесса изменения параметров воздуха в теплообменнике как показано на рис. 4.

При расчете параметров воздуха на выходе из теплообменника – утилизатора полагалось, что заданы:

- параметры влажного воздуха на входе в теплообменник t_y, d_y, H_y ;

- средняя температура антифриза \bar{t}_a ;
- значение относительной влажности воздуха ϕ'_y на выходе из теплообменника.

Энтальпия воздуха на выходе из теплообменника может быть найдена из решения системы нелинейных уравнений, описывающих состояние воздуха в процессе его охлаждения (6) - (10) [11], и зависимости давления от температуры на линии насыщения (11) [10]:

$$d_y'' = 622 \frac{P_s(\bar{t}_a)\phi_y''}{P_6 - P_s(\bar{t}_a)\phi_y''}, \phi_y'' = 1; \quad (8)$$

$$d_y' = 622 \frac{P_s(t'_y)\phi_y'}{P_6 - P_s(t'_y)\phi_y'}, \phi_y' = 0,88; \quad (9)$$

$$H_y'' = c_p \bar{t}_a + d_y'' 10^{-3} (r + c_{pn} \bar{t}_a); \quad (10)$$

$$H_y' = c_p t'_y + d_y' 10^{-3} (r + c_{pn} t'_y); \quad (11)$$

$$\frac{H_y - H_y'}{(d_y - d_y') 10^{-3}} = \frac{H_y - H_y''}{(d_y - d_y'') 10^{-3}}; \quad (12)$$

$$p_s(t) = \frac{16,57t - 115,72}{233,72 + 0,997t}, t = \bar{t}_a, t = t'_y. \quad (13)$$

Система уравнений (6)-(11) решалась методом последовательных приближений. По расчетам энтальпии влажного воздуха на выходе из теплообменника - утилизатора были построены зависимости удельной тепловой мощности теплообменника от средней температуры антифриза и температуры относительной влажности вытяжного воздуха.

3.2. Экспериментальные и расчетные результаты

Анализ опытных данных показал, что актуальны как «сухие» режимы, так и режимы с конденсацией влаги. Это наглядно иллюстрируется графиком на рис. 5. Графики представлены в виде зависимости относительного изменения начальной (на входе в КТУ) энтальпии вытяжного воздуха

$$q/H_y = (H_y - H'_y)/H_y \quad (14)$$

от начального ее значения H_y .

Причем режимы «сухого» теплообмена отвечают условию, что температура антифриза на выходе из теплообменника ниже температуры точки росы, что гарантирует отсутствие сухих зон. На рис. 5 видно, что в режимах с выпадением влаги относительное изменение начальной энтальпии вытяжного воздуха от начального ее значения существенно превышает ее изменение в режимах «сухого теплообмена».

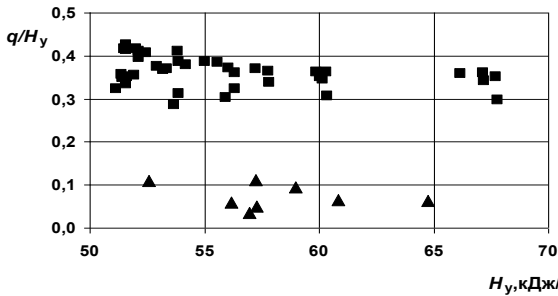


Рис. 5. Относительное изменение энтальпии воздуха в КТУ. ▲ – «сухой» режим; ● - режимы с выпадением влаги.

В дальнейших расчетах режимы «сухого» теплообмена не принимались к анализу.

Поскольку в натуральных опытах начальные параметры вытяжного воздуха определялись текущей ситуацией микроклимата бассейна, которая зависела от множества факторов, включая состояние наружного воздуха, загруженность бассейна, то параметры вытяжного воздуха (температура и относительная влажность) изменялись в определенных пределах. В результате анализа параметров вытяжного воздуха были выделены два характерных диапазона их изменения, осредненные значения которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры воздуха

$t_y, ^\circ\text{C}$	φ_y	$t'_y, ^\circ\text{C}$	φ'_y	$t_p, ^\circ\text{C}$	$H_c, \text{кДж/кг}$	$t_{\min}, ^\circ\text{C}$
26,3	0,49	12,7	0,9	14,6	41,4	0,96
28,6	0,50	16,9	0,8	17,0	48,2	1,28

Дальнейшие расчеты проводились для параметров воздуха на входе в теплообменник, соответствующих параметрам, приводимым в табл. 1.

Средняя температура антифриза изменялась в пределах $t_{\min} \div t_p$. Результаты расчетов обрабатывались в виде зависимостей относительного приращения удельной мощности КТУ

$$\frac{q - q_c}{q_c} = \frac{(H_y - H'_y) - (H_y - H_c)}{(H_y - H_c)} \quad (15)$$

от средней температуры антифриза t_a (рис. 6) и коэффициента влаговываждения ξ (рис. 7). Здесь H_c - энтальпия воздуха при температуре точки росы, $q = H_y - H'_y$ - удельная мощность, отводимая от

воздуха в режиме выпадения влаги; $q = H_y - H_c$ - максимальная мощность, отводимая от воздуха в «сухом» режиме.

По результатам расчетов установлено, что с понижением температуры антифриза отводимая в теплообменнике – утилизаторе тепловая мощность растет и приближается к некоторому предельному значению (рис. 6).

Это максимальное значение отводимой мощности определяется при минимально возможной температуре антифриза, которая может быть найдена графическим методом (рис. 3) или аналитически (уравнения (3)-(4)). Второй метод дает более точный результат ввиду большой крутизны линии насыщения при малых влагосодержаниях воздуха.

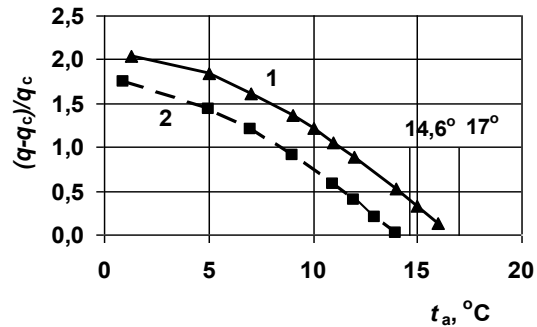


Рис. 6. Расчетное относительное приращение удельной мощности КТУ в зависимости от средней температуры антифриза. 1 – расчет при начальных параметрах воздуха $t_y = 28,6^\circ\text{C}$, $\varphi_y = 0,50$ 2 - расчет при $t_y = 26,3^\circ\text{C}$, $\varphi_y = 0,49$. Цифрами обозначены температуры точки росы.

Совместное решение уравнений (3)-(4) и (6)-(11) при заданной температуре и влагосодержании воздуха на входе в теплообменник (t_y, d_y) дает минимальное значение температуры антифриза (в точке касания луча процесса к линии насыщения) и минимальное значение энтальпии воздуха на выходе из теплообменного аппарата H'_m . Соответственно максимальный теплосъем в теплообменнике будет обеспечен при $H_y = H'_m$. Минимальные расчетные значения средней температуры антифриза приведены в табл. 1.

Экспериментальные данные обрабатывались в виде зависимости относительного приращения мощности КТУ (12) от коэффициента влаговываждения (5). Параметры воздуха на входе в КТУ укладывались в пределы, приводимые в табл. 1. Пример обработки данных приведен в виде табл. 2. Влагосодержание воздуха вычислялось по формуле (7), энтальпия - по формуле (9). Температура точки росы определялась по зависимости (13) [10]:

$$t_p = 1,0496[\ln(p_n)]^2 - 0,073135\ln(p_n) - 42,6021, \quad (13)$$

где p_n - парциальное давление водяного пара, Па

$$p_n = \frac{p_\sigma d_y}{622 + d_y}. \quad (16)$$

Давление насыщения водяного пара находилось по зависимости (11).

Таблица 2. Пример обработки экспериментальных данных

t_y	φ_y	t'_y	φ'_y	d_y	d'_y	t_p	H_y	H'_y	H_c
°С		°С		г/кг с.в.		°С	кДж/кг		
26,1	0,47	10,9	0,91	10,0	7,4	13,8	51,6	29,6	39
26,2	0,51	15	0,81	10,8	8,7	15	53,9	37	42,5
26,2	0,47	11,3	0,91	10,1	7,6	13,9	52	30,4	39,4
26,3	0,48	11,7	0,89	10,2	7,7	14,2	52,5	31,1	40,1
26,3	0,48	12,8	0,86	10,4	8,0	14,4	52,9	33	40,7

Сравнение экспериментальных данных с расчетами по приводимой выше методике приведено на рис. 7. Сравнение показывает удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментальными данными. Большинство точек на рис. 7 расположено между расчетными кривыми.

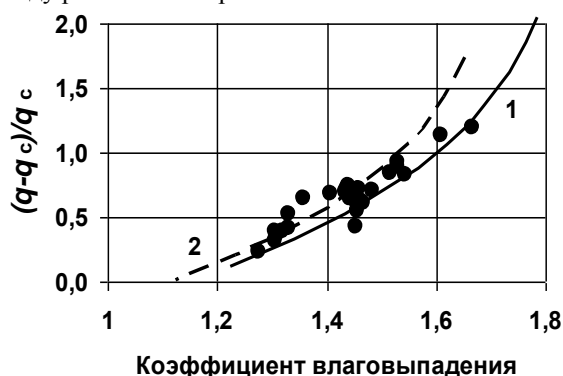


Рис. 7. Относительное приращение удельной мощности КТУ в зависимости от коэффициента влаговываждения. 1 – расчет при начальных параметрах воздуха $t_y = 28,6^\circ\text{C}$, $\varphi_y = 0,50$ 2 - расчет при $t_y = 26,3^\circ\text{C}$, $\varphi_y = 0,49$; • - экспериментальные данные [5-7].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе анализируется работа конденсационного теплообменника в системе утилизации теплоты вентиляционных выбросов бассейна. Система утилизации теплоты представлена конденсационным теплообменником-утилизатором и тепловым насосом типа «антифриз – вода», объединенными промежуточным контуром с циркулирующим антифризом.

Предложена физическая модель процесса охлаждения воздуха в конденсационном теплообменнике. Модель основана на применении уравнения тепломассопереноса при непосредственном контакте между воздухом и водой (конденсатом на поверхности теплопередачи), уравнений термодинамики влажного воздуха. Модель в рамках принятых допущений позволяет оценить удельную мощность, передаваемую в теплообменнике, при заданных начальных параметрах воздуха и средней температуре промежуточного теплоносителя - антифриза, а также максимальное достигаемое значение мощности.

Показано преимущество применения теплообменника – утилизатора в режиме выпадения влаги по сравнению с применением его в режиме «сухого» охлаждения воздуха. Представлены результаты расчетов зависимости относительного приращения удельной мощности КТУ в зависимости от средней температуры антифриза и коэффициента влаговываждения.

Результаты расчетов сравнивались с ранее полученными результатами опытного исследования характеристик теплообменника в системе утилизации теплоты вытяжного воздуха бассейна МЭИ. Сравнение показало удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных и возможность применения предлагаемой модели для оценок удельной мощности, передаваемой в конденсационном теплообменнике.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- t – температура воздуха, °С;
- t_a – средняя температура антифриза, °С;
- G – массовый расход теплоносителя, кг/с
- d – влагосодержание воздуха, г/кг с.в.;
- φ – относительная влажность воздуха, доли (%);
- H – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг
- p_s – давление насыщения водяного пара, Па;
- P_6 – барометрическое давление, Па;
- c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха, кДж/кг·К;
- $c_{pп}$ – удельная изобарная теплоемкость водяного пара, кДж/кг·К;
- r – теплота парообразования воды, кДж/кг;
- ξ – коэффициент влаговываждения;
- q – удельная мощность теплообменника, кДж/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кокорин О.Я.**, Королев В.Г. Применение воздушных тепловых насосов в зданиях плавательных бассейнов и катков// АВОК – 2013. - №1 – С. 62 – 68
2. **Peng Sun**, Jing Yi Wu, Ru Zhu Wang, Yu Xiong Xu. Analysis of indoor environmental conditions and heat pump energy supply systems in indoor swimming pools//Energy and Buildings. – 2011. - №43 – С. 1071 – 1080.
3. **Johansson L.**, Westerlund L. Energy savings in indoor swimming-pools: comparison between different heat recovery systems// Applied Energy. – 2001. №70 - С. 281-303.
4. **Chung-Kuan Kung**, Wen-Shing Lee. Optimization of heat pump system in indoor swimming pool using particle swarm algorithm.//Applied Energy. – 2008 – С. 1647-1653.
5. **Самойленко В.Ю.** Оптимизация систем утилизации теплоты воздуха, удаляемого из помещений с повышенным влаговыведением // Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. М.: 2013
6. **Исследование** эффективности теплообменника в системе утилизации теплоты вытяжного воздуха бассейна / И.В. Яковлев, Ханин А.В., Парёхина И.В. // Современные задачи инженерных наук: сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ – 2017» Т. 2 . М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С. 276-280

7. **Сопоставление** теоретической и реальной эффективности теплонасосной установки в системе горячего водоснабжения / И.В. Яковлев, А.Б. Гаряев, И.В. Парёхина, В.Ю. Самойленко // Промышленная энергетика, №5, 2015. С. 45-50.

8. **Нестеренко А.В.** Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха, А.В. Нестеренко. – М.: Высшая школа, 1971.

9. **Гаряев А.Б., Яковлев И.В.** Утилизация теплоты вторичных энергетических ресурсов в конденсационных теплообменниках: учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.-120с.

10. **Тарабанов М.Г.** *J-d* – диаграмма влажного воздуха: метод. указания / М.Г. Тарабанов. – Волгоград, 2003.

11. **Яковлев И.В., Горелов М.В., Горячева Е.М.** Процессы влажного воздуха в системах вентиляции и кондиционирования. М.: Издательство МЭИ. 2017.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 2

*Энергосбережение
при транспортировке энергии*

Е.Г. Гашио, Е.Ю. Каткова, Д.Е. Попов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена разработке и проектированию гибридной системы энергоснабжения для северных климатических условий на примере поселка Соловецкий на основе нетрадиционных возобновляемых источников энергии и топливных элементов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Западные страны доказывают, что в рыночной ситуации тяжело добиться постоянного энергоснабжения при существовании энергосистемы с преимущественно мощными энергоустановками. Нынешняя направленность развития мирового рынка энергетики подтверждает развитие автономных источников тепло- и электроэнергии, работающих на различном топливе. Исторически так сложилось, что некоторые потребители в нашей стране расположены далеко от систем централизованного энергоснабжения. Это и является причиной автономизацией производства энергетики.

Для распределенной энергетики достижимо значительное повышение эффективности выработки электроэнергии на органическом топливе с использованием гибридных электростанций (ГибЭС).

Низкий уровень выбросов и практически отсутствие загрязняющих веществ в установках на основе топливных элементов (ТЭ), отсутствие выделения парниковых газов. Такие установки выделяют лишь водяной пар, который не загрязняет окружающую среду.

Целью настоящей работы является определение целесообразности и эффективности использования комбинированной гибридной системы для обеспечения режима автономного снабжения тепловой и электрической энергией удаленных (островных) потребителей в северных климатических условиях.

2. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В связи с высокой потребностью в создании экологически безопасного транспорта и энергоустановок, работающих с высоким КПД, появилась потребность в развитии ТЭ в областях космической техники, транспорта и энергетики и необходимостью охраны окружающей среды. В настоящее время развитие установок на основе ТЭ идет в нескольких

направлениях. Это создание стационарных электростанций на основе ТЭ (как для централизованного, так и для децентрализованного энергоснабжения), энергетических установок транспортных средств, а также источников питания портативных и переносных устройств [1].

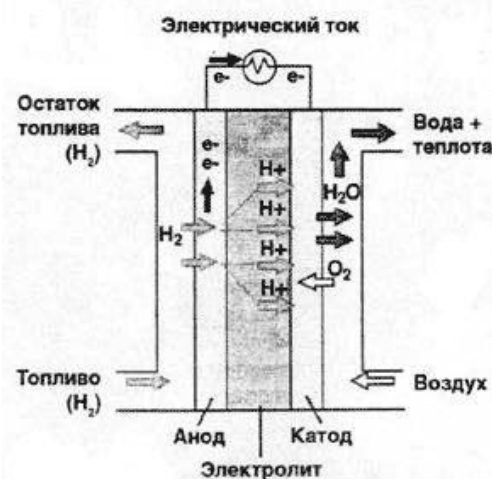


Рис. 1. Простейшая схема ТЭ на примере водородно-кислородного элемента.

Таблица 1. Примеры использования ТЭ в различных областях

Область применения	Мощность
Стационарные установки	5-400 кВт
Транспорт	25-150 кВт
Портативные установки	1-50 кВт
Портативные устройства	1-500 Вт

В ТЭ вместо горения происходят электрохимические реакции, поэтому им необходимо легкоокисляемое вещество, такое как водород. Высокотемпературные ТЭ могут также использовать монооксид углерода (СО). Это делает их более гибкими к топливу и более эффективными за счет применения доступных видов топлива, таких как природный газ, пропан и др. H_2 и CO можно получить из природного газа и других видов топлива, например, посредством паровой конверсии [2].

Твердоокисидные топливные элементы (ТОТЭ) и топливные элементы на расплавленном карбонате

(РКТЭ) имеют ряд преимуществ при их использовании в ГибЭС. Однако в стационарных установках мощностью (0,5÷400 кВт) используют ТОТЭ, поскольку они имеют более высокую температуру уходящих газов, электролит прост и надежен в эксплуатации, и не требуется организовывать сложные схемы циркуляции жидкой фазы. Кроме того, ТОТЭ позволяют применять внутреннюю паровую конверсию топлива, при которой все топливо преобразуется полностью в водород и монооксид углерода, пригодные для электрохимических реакций в ТЭ [3].

3. ОБЪЕКТ

3.1. Основные сведения

Для определения целесообразности и эффективности использования комбинированной ГибЭС для обеспечения режима автономного снабжения тепловой и электрической энергией рассмотрим на примере Соловецкого архипелага, находящегося в Белом море.

Поселок расположен в строительном-климатическом районе ПА. Климат морской с продолжительной мягкой зимой, с частыми оттепелями и коротким прохладным летом. Частые атлантические циклоны обуславливают значительную облачность и большое количество осадков в течение всего года. Абсолютный минимум температур достигал -37°C , абсолютный максимум $+30^{\circ}\text{C}$. Расчетные температуры для проектирования отопления и вентиляции соответственно равны -34°C и -14°C . Продолжительность отопительного периода составляет 266 дней.

Соловецкий историко-культурный комплекс входит в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Население острова по данным на 2018 год составляло 931 человек, однако в течение года Соловки активно посещают туристы и паломники.

3.2. Тепло- и электроснабжение острова

В настоящий момент электроснабжение поселка осуществляется от дизельной электрической станции (ДЭС). Режим работы дизель-генераторов следующий: два ДГ рабочие и один ДГ резервный. В нормальном режиме мощность энергосистемы составляет

$$2 * 1 \text{ MВт} * 0.8 = 1.6 \text{ MВт}, \quad [1]$$

где 0.8 – коэффициент загрузки ДГ.

Централизованным теплоснабжением в поселке Соловецкий обеспечены потребители жилищно-коммунального сектора южной части острова. В северной части поселка и на территории Соловецкого кремля в основном отопление печное.

Теплоснабжение обеспечивается ТЭС. В котельной установлены два водогрейных котла «Квант», тепловой мощностью по 2 МВт каждый. Топливо: дизельное и отработанное масло дизелей.

Тепловая схема котельной предусматривает:

- приготовление сетевой воды на нужды отопления с температурой $(90-70)^{\circ}\text{C}$ по закрытой схеме теплоснабжения;

- использование тепла дымовых газов ДГУ для покрытия части отопительной нагрузки. Система утилизации тепла гарантированно создает 0,49 Гкал/ч.

Тепловые нагрузки потребителей в поселке Соловецкий с учетом потерь в тепловых сетях составляют:

- отопление – 2,63 МВт (2,26 Гкал/ч);
- горячее водоснабжение и вентиляция отсутствуют.

Общий износ электросетей уже превышает 60%, а на отдельных участках – 80%, в том числе износ энергооборудования трансформаторных подстанций. В связи с этим технические потери в электрических сетях значительно превышают нормативные, и за 2011 год составили 698,93 тыс. кВт *ч. Износ тепловых сетей - 50%.

Ввиду особого экологического и культурного статуса Соловецкого архипелага, актуальность энергосбережения поселка не нуждается в дополнительном обосновании.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

4.1. Факторы выбора схемных решений

- Экологичность;
- Экономичность;
- Визуальная эстетика, ввиду отношения Соловецкого историко-культурного комплекса в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

4.2. Определение нагрузок

Среднесуточная активная мощность в зимний период составляет 1440 кВт, в летний – 721 кВт. При этом следует учитывать, что туристический сезон на Соловках приходится на июнь-август, и электропотребление гостиниц и связанных с ними объектов летом выше, чем зимой. Из приведенных данных следует, что значительная часть потребляемой электроэнергии (не менее 50%) в зимний период расходуется на электроотопление, включенное постоянно.

Электроотопление не является экономически выгодным, так как КПД ДГУ не превышает 40%. В результате большая часть энергии сжигаемого топлива расходуется впустую. За счет постепенного перевода объектов в поселке на отопление от тепловых сетей можно снизить электрическую нагрузку в зимний период на 30-40%, что позволит сэкономить существенные средства на закупке и доставке дизельного топлива.

Для энергоснабжения поселка, в качестве основного оборудования, возможно размещение ветровой и солнечной установок и топливного элемента.

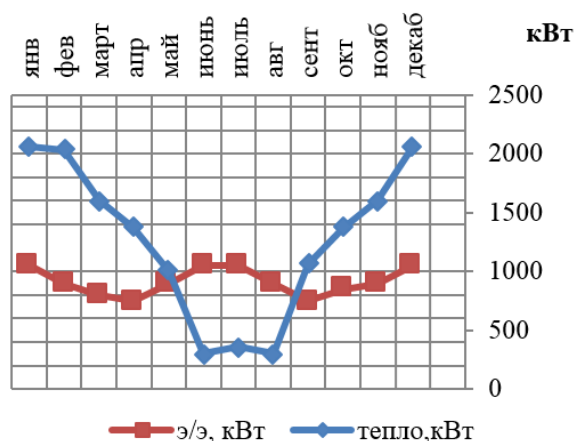


Рис. 2. График тепловой и электрической нагрузки для острова Соловецкий на данный момент

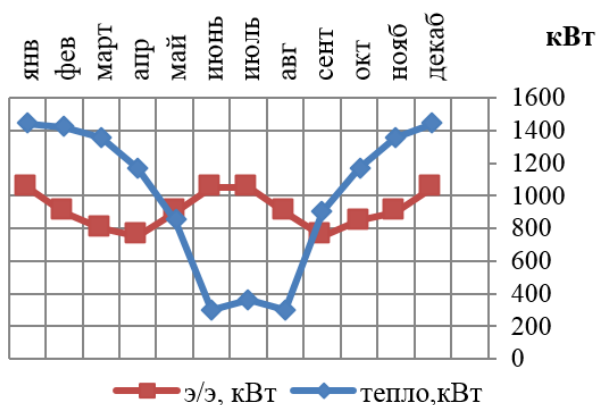


Рис. 3. График тепловой и электрической нагрузки для острова Соловецкий с применением энергосберегающих мероприятий

Среднесуточная нагрузка на ГВС:

$$Q_{\text{сут}}^{1000} = \frac{100}{24} \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 1 = 208 \text{ тысяч } \left[\frac{\text{ккал}}{\text{ч}} \right] = 0.24 \text{ [МВт]}, \quad [2]$$

где $\frac{100}{24}$ — норма расхода воды на человека в час, $\left[\frac{\text{л}}{\text{ч} \cdot \text{чел}} \right]$; 50 — температура горячей воды, $^{\circ}\text{C}$; 1000 — количество человек, потребляющие горячее водоснабжение; 1 — коэффициент, для перевода в ккал, $\left[\frac{\text{ккал}}{\text{л} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right]$.

$$Q_{\text{сут}}^{1500} = \frac{100}{24} \cdot 50 \cdot 1500 \cdot 1 = 312.5 \text{ тысяч } \left[\frac{\text{ккал}}{\text{ч}} \right] = 0.36 \text{ [МВт]} \quad [3]$$

Из расчета, что на 1000 человек тепловая нагрузка составляет $2 \left[\frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right]$, а ГВС в пике $0.3 \div 0.35$, то нагрузка на отопление с мая по сентябрь составит $1.7 \left[\frac{\text{Гкал}}{\text{ч}} \right] = 1.98 \text{ [МВт]}$.

В результате проведенных энергосберегающих мероприятий, можно снизить нагрузку в поселке в весенне-осенний период на 15%, а в зимний — 30%.

4.3. Энергия солнца

Производство электроэнергии с помощью фотогальванических панелей является одним из наиболее перспективных направлений в области возобновляемых источников энергии. Благодаря большим пер-

спективам и высокому уровню инвестиций, количество исследований в области солнечной энергетики в последние годы значительно выросло, так же как и количество публикаций в журналах.

Опубликованные работы на тему солнечной энергии и фотогальванических панелей рассматривают способы получения энергии, ее преимущества и недостатки, текущую ситуацию на рынке, затраты и технологии.

Соловецкие острова находятся в 250-300 км от Архангельска. Таким образом, интенсивность солнечного излучения схожа в сравнении с городом Архангельском.

В городе Архангельск 76 солнечных дней в году. В виду короткой продолжительности солнечного периода, устанавливать солнечную установку не целесообразно. Однако в изготовлении солнечных коллекторов используется кремниевая tandemная тонкопленочная технология, что позволяет преобразовывать тепловую энергию от рассеянного солнечного света.

Перспективы использования солнечной энергии:

- Неограниченный объем энергии
- Выработка электроэнергии не загрязняет атмосферу
- Система выработки такой энергии является безопасной и высоконадежной
- Материалы возможно перерабатывать и использовать повторно
- Легкость в обслуживании оборудования
- Использование электричества отдаленно в сельских районах
- Быстрая окупаемость модулей
- Надёжность энергоснабжения.

4.4. Энергия ветра

Максимум среднемесячных скоростей для Соловецкого архипелага приходится на холодное время года и совпадает с сезонным пиком потребления тепловой и электрической энергии.

Площадка для расположения установки выбирается исходя из условия удаленности от культурно-исторических объектов, близости дорог, а также открытости местности. Удаленность от поселка помогает не нарушать визуальное восприятие культурных памятников, сохранять тишину для комфортного проживания жителей поселка. Уже существующие дороги облегчат осуществление монтажа ветроустановок. Так как Соловецкие острова включены в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, то вырубка лесов на территории недопустима. Также лесной массив, расположенный в непосредственной близости от ветроустановок, создает турбулентные потоки, которые значительно снижают эффективность их работы.

Перспективы использования энергии ветра:

- стоимость одного ветряка оценивается в 3 раза ниже, чем солнечная установка такой же мощности;
- ветер дует днём и ночью, зимой и летом, в дождь и снег, а солнце светит реже, особенно в северных регионах России;
- во время затяжных дождей и в пасмурную погоду солнечные установки теряют свою мощность в 5-ти кратном размере;

- КПД солнечных установок с каждым годом эксплуатации уменьшается.

4.5. Элементы системы

В данной гибридной системе энергоснабжения для покрытия тепловой и электрической нагрузок в разное время года, используется следующее оборудование:

- Топливные элементы (40 шт по 5 кВт)
- Ветровые электрические установки (6 шт по 150 кВт)
- Солнечные электростанции (10 шт по 14 кВт)
- Солнечные коллекторы (207 шт по 1.5 кВт)

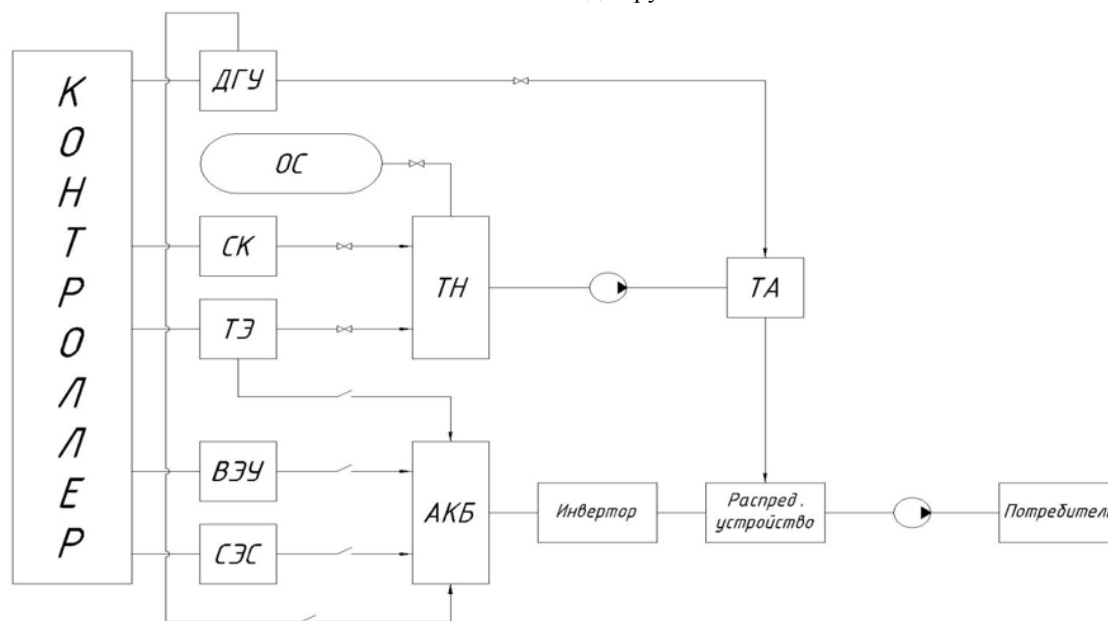


Рис. 4. Спроектированная гибридная система энергоснабжения для острова Соловецкий в общем виде.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья посвящена актуальной на сегодняшний день проблеме – развитию автономных источников энергоснабжения. В работе разработаны и спроектированы ГибЭС на базе ТОТЭ и рассмотрен вопрос их эффективного применения для поселка Соловецкий. Поскольку топливные элементы изготовлены из разных материалов и имеют разную температуру, у каждого типа ТЭ своя область применения, свои особенности и преимущества, но всех их отличает большой потенциал эффективности и низкое экологическое воздействие.

Хорошая скорость ветра в течение года дает возможность устанавливать (вертикально-осевые) ВЭУ.

Из-за небольшого количества солнечных дней в году установка СЭС не целесообразна. Однако возможна установка СЭС на рассеивающих солнечных панелях в качестве эксперимента.

К сожалению, полностью отказаться от ДГУ не представляется возможным.

ГибЭС на основе ТЭ являются высокоэффективными, а также приносят пользу как владельцу, так и окружающей среде. Есть возможность аккумулирования энергии.

Энергосбережение заключается во внедрении большого количества ВЭУ и ТЭ в схему и минималь-

- Дизельные генераторные установки и их система утилизации тепла.

Для каждого сезона представлен свой набор оборудования для покрытия электрической и тепловой нагрузок в рациональных пропорциях.

4.6. Технико-экономическая оценка

Общие затраты ГибЭС, по предварительным оценкам, составляют 845 043 900 рублей. Высокая стоимость обусловлена дороговизной топливного элемента, тем не менее это дешевле качественного электроотопления и модернизации устаревших тепловых сетей, которые обойдутся более 10 миллиардов рублей.

ное использование ДГУ. Таким образом, КПД установки увеличивается, а общие затраты снижаются.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ГибЭС — гибридных электростанций;
- КПД — коэффициент полезного действия;
- ТЭ — топливный элемент;
- ТОТЭ — твердооксидные топливные элементы;
- РКТЭ — топливные элементы на расплавленном карбонате;
- ДЭС — дизельная электрическая станция;
- ДГУ — дизель генераторные установки;
- ТЭС — тепловая электростанция;
- ГВС — горячее водоснабжение;
- СК — солнечный коллектор;
- СЭС — солнечная электростанция;
- ВЭУ — ветроэнергетическая установка;
- АКБ — аккумуляторная батарея;
- ТН — тепловой насос;
- ТА — теплообменный аппарат;
- э/э — электроэнергия;
- т/э — тепловая энергия;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов Н.В., Коровин Н.В. Твердополимерные электролиты для топливных элементов // Электрохимическая энергетика. 2003. Т. 3. № 1. С. 3.
2. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. – М: МЭИ, 2005. – 280 с.
3. Нефедкин С.И. Автономные энергетические установки и системы: учеб. пособие. – М: МЭИ, 2018. – 220 с.

А.С. Демиденко, Г.В. Шведов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК 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. Выполнено сопоставление полученных графиков нагрузки с графиками из различных литературных источников. Получено, что конфигурация современных графиков нагрузки жилых домов существенно отличается от приведенных в литературных источниках.

1. ВВЕДЕНИЕ

В наши дни вопросы исследования и расчета электрических нагрузок жилых зданий приобретают особую актуальность в связи с тем, что происходит изменение стиля и уровня жизни людей: наблюдается интенсивный рост городов и городского населения, сопровождающийся интенсивной электрификацией промышленно-производственной сферы, домашних и коммунального хозяйств. Длительные наблюдения за различными потребителями и элементами систем электроснабжения предоставили возможность получить их типовые графики нагрузки, используемые инженерами для расчетов на стадии проектирования. Однако в связи с изменением состава электроприемников и их характеристик у бытовых потребителей требуется уточнение типовых графиков и их показателей. Изменение графиков бытовых потребителей ведет к изменению в энергосистеме, так как именно бытовая потребитель задает её режим работы.

У населения изменяется структура и количество бытовых приборов: с одной стороны, появляются новые электроприёмники, с другой стороны, у некоторых электроприёмников уменьшается энергоёмкость. Происходит изменение электропотребления.

Однако в большинстве учебной и научно-технической литературе приведены типовые графики и их показатели, полученные в 70-90-е годы, когда бытовых приборов было существенно меньше, а уровни благосостояния населения и информатизации их квартир были гораздо ниже.

В работе предпринята попытка актуализировать графики нагрузки жилых зданий.

Объектом исследования является типовой панельный 17-этажный жилой дом на 471 квартиру, в котором установлены электрические плиты.

В качестве исходных данных использованы результаты фактических измерений автоматизированной системы коммерческого учёта электроэнергии на вводных распределительных устройствах рассматриваемого здания. Электрическая нагрузка фиксировалась непрерывно каждые 30 минут в виде показаний счетчика электрической энергии.

2. ТИПОВЫЕ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Процесс изменения электрической нагрузки во времени отражается суточным графиком электрической нагрузки.

Форма суточного графика нагрузки изменяются в широких пределах в зависимости от таких базовых факторов, как время года и день недели. Графики жилых домов отличаются друг от друга в зависимости от числа присоединенных квартир и способу приготовления пищи.

Графики нагрузки характеризуются следующими показателями:

а) коэффициент неравномерности графика нагрузки

$$\alpha = \frac{P_{\text{нм}}}{P_{\text{нб}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{нм}}$ — наименьшая нагрузка, $P_{\text{нб}}$ — наибольшая нагрузка;

б) коэффициент заполнения ($k_{\text{з.г.}}$) или плотности (β) графика нагрузки

$$k_{\text{з.г.}} = \beta = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{нб}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ср}}$ — средняя нагрузка;

в) коэффициент формы графика нагрузки ($k_{\text{ф}}$)

$$k_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{ср}}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ск}}$ — среднеквадратичная нагрузка.

В научно-технической литературе, например [1], 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 [2] приведен типовой график нагрузки харктерного

потребителя селитебных территорий городов. В справочнике [3] приведен суточный график нагрузки жилого дома с электроплитами, на котором уже разделены рабочий и выходной дни. В [4] приведен график, где уже для выходных дней построены отдельно графики субботы и воскресенья. Данные графики представлены на рис. 1–2.

3. АКТУАЛИЗИРОВАННЫЕ СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Поскольку в литературных источниках рассматриваются графики нагрузки за зимние сутки (зимой наблюдается максимум нагрузки), то анализировались измерения только за декабрь и январь месяцы за несколько лет, так как в эти месяцы продолжительность светового дня примерно одинаковая, а, следовательно, будет примерно одинаковой и конфигурация графика нагрузки.

Типовые графики, как правило, строятся в виде усредненных из ряда графиков по средним получасовым нагрузкам. С помощью них можно анализировать работу элементов сети или групп потребителей, выбрать необходимый режим работы агрегатов, степень использования оборудования и возможность целесообразного распределения нагрузок между источниками питания. Но в литературных источниках приведены графики с осреднениями не только за полчаса, но и за 1 и 2 часа.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием MS Excel. На основе первичного анализа графиков принято решение выделять графики рабочих дней, субботы и воскресенья (рис. 3–5). Показатели для полученных актуализированных суточных графиков с различными осреднениями, рассчитанные по выражениям (1)–(3) сведены в табл. 1–3.

Из рис. 3 видно, что с увеличением интервала осреднения пропадают утренние и дневные максимумы и провалы исчезают: на графике с двухчасовым осреднением по сравнению с получасовым осреднением после ночного провала, который стал в разы продолжительнее, наблюдается только рост нагрузки до вечернего максимума. График становится грубее: на нем не отражены все характерные точки и периоды суточного графика.

Сравним графики субботы (рис. 4) и воскресенья (рис. 5) с интервалом осреднения 30 минут. Ночной минимум наблюдается в интервале с 3:30 до 4:00, провал немного ниже в воскресенье. У субботы есть небольшой по продолжительности утренний максимум с 12:30 до 13:00. Вечерний максимум в субботу продолжительнее и начинается с 17:30 по 18:30, а максимум в воскресенье – с 18:30 по 19:00. До полуночи нагрузка сильнее падает в субботу.

Более значительно изменяются графики выходных дней с осреднением за два часа. Ночной провал в субботу длится уже четыре часа – с 2 до 6 ч. В воскресенье ночной минимум не изменяется по продолжительности и наблюдается с 4 до 6 ч. С Утренний максимум нагрузки уже не наблюдается.

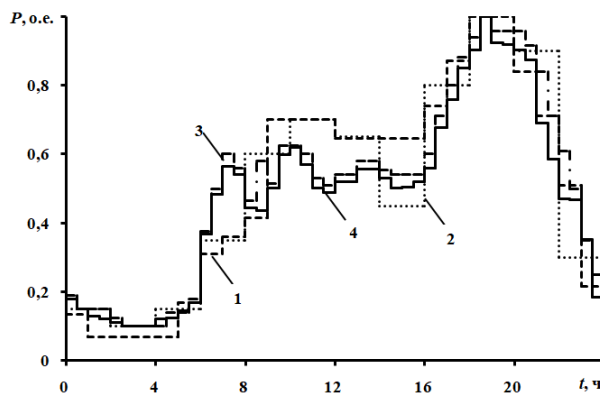


Рис. 1. Типовые суточные графики нагрузки рабочих дней жилых зданий с электроплитами с различными осреднениями (1 из [1]; 2 из [2]; 3 из [3]; 4 из [4]).

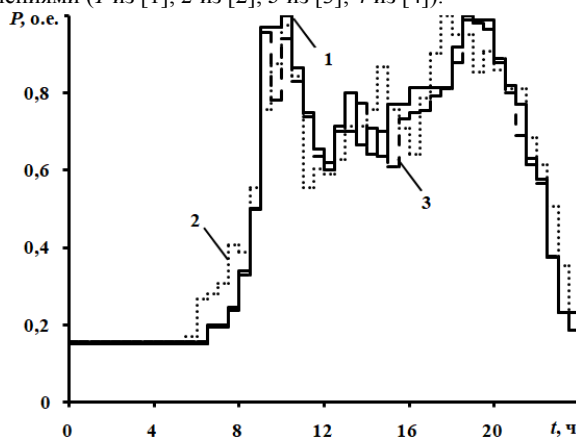


Рис. 2. Типовые суточные графики нагрузки жилых зданий с электроплитами (1 – выходного дня из [3]; 2 – субботы из [4]; 3 – воскресенья из [4]).

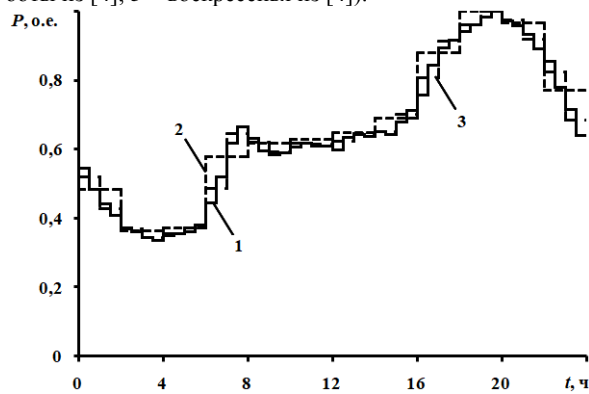


Рис. 3. Суточные графики нагрузки рабочих дней жилого здания с электроплитами с осреднениями (1 – за 30 минут; 2 – за 1 час; 3 – за 2 часа).

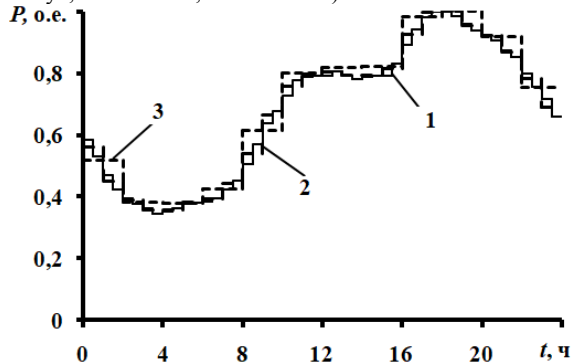


Рис. 4. Суточные графики нагрузки субботы жилого здания с электроплитами с осреднениями (1 – за 30 минут; 2 – за 1 час; 3 – за 2 часа).

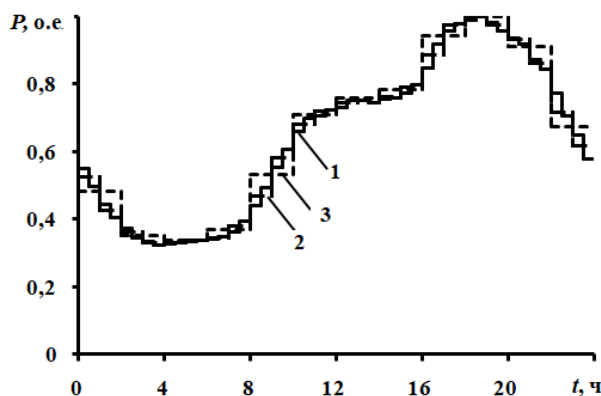


Рис. 5. Суточные графики нагрузки воскресенья жилого здания с электроплитами с осреднениями (1 – за 30 минут; 2 – за 1 час; 3 – за 2 часа).

Таблица 1. Показатели суточных графиков нагрузки рабочих дней жилых зданий с электроплитами

Суточный график		Показатель		
		α	β	k_{ϕ}
Полученный, с интервалом осреднения	30 минут	0,336	0,647	1,046
	1 час	0,343	0,653	1,046
	2 часа	0,363	0,666	1,044
из [3] с осреднением 30 минут		0,100	0,511	1,129
из [4] с осреднением 30 минут		0,101	0,479	1,134
из [1] с осреднением 1 час		0,070	0,510	1,161
из [2] с осреднением 2 часа		0,100	0,513	1,150

Таблица 2. Показатели суточных графиков нагрузки субботы жилых зданий с электроплитами

Суточный график		Показатель		
		α	β	k_{ϕ}
Полученный, с интервалом осреднения	30 минут	0,345	0,681	1,048
	1 час	0,357	0,686	1,048
	2 часа	0,379	0,702	1,047
из [4] с осреднением 30 минут		0,155	0,548	1,135
из [3] с осреднением 30 минут		0,150	0,540	1,163

Таблица 3. Показатели суточных графиков нагрузки воскресенья жилых зданий с электроплитами

Суточный график		Показатель		
		α	β	k_{ϕ}
Полученный, с интервалом осреднения	30 минут	0,323	0,643	1,060
	1 час	0,330	0,646	1,059
	2 часа	0,338	0,654	1,058
из [4] с осреднением 30 минут		0,155	0,524	1,155
из [3] с осреднением 30 минут		0,150	0,540	1,163

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОСТРОЕННЫХ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ С ТИПОВЫМИ

4.1. Графики рабочих дней

Сравним построенный график с осреднением за 30 минут с графиками, из [3], [4]. Сравнимые графики построены на одних осях на рис. 6. В [1] приведен суточный зимний график уже с часовым осреднением, поэтому попарно сравним его и построенный (рис.7). На рис. 8 приведены графики с осреднением за 2 часа.

Ночной минимум наблюдается на всех рассматриваемых графиках нагрузки, но провалы на построенных графиках с осреднениями за полчаса и час делятся заметно меньше, чем на графиках, взятых из справочной литературы соответственно. А на графике с двухчасовым осреднением иначе: на построенном графике провал длится на два часа дольше, чем на сравниваемом с ним графике из [2].

Наименьшие нагрузки на построенных графиках превышают нагрузку на сравниваемых графиках практически в 3,5 раза. Такая большая разница мощностей связана с тем, что графики из [1–4] были построены до 1990 г, когда ночью мог потреблять электроэнергию только холодильник. Увеличение электропотребления в современных квартирах в ночное время связано с тем, что произошло насыщение электроприборами, которые люди оставляют на зарядку. К ним относятся смартфоны, ноутбуки. Некоторые предпочитают оставлять компьютеры в «спящем» режиме, продолжая потреблять электроэнергию. В последнее десятилетие люди активно начали использовать в быту электроприборы с таймером, позволяющие реализовать функцию «отложенный старт». Так отпадает необходимость личного присутствия на кухне, чтобы включить программу готовки или осуществить запуск стиральной или посудомоечной машины. Если установлен двухставочный тариф, то можно сэкономить денежные средства, переводя технику в ночной режим работы. Многие жители Москвы переведены на такой тариф, так как он не требует сложных систем учета электроэнергии.

На всех графиках рис. 6 наблюдается утренний максимум, который на типовых графиках из [3] и [4] совпадает по времени с 7 до 7:30 утра, а на построенном графике максимум выше и длится с 7:30 до 8:00 утра. На графике из [1] рис. 7 утренний максимум наблюдается позже и длится гораздо дольше. А на построенном графике с двухчасовым осреднением уже не наблюдается утренний максимум. На графике из [2] наблюдается характерный для типовых суточных графиков утренний максимум, который длится с 10 до 12 утра.

В наше время по утрам в приготовлении завтрака задействованы такие электроприборы, как электрические чайники, кофеварки, тостеры, соковыжималки, блендеры и др. Перед походом на работу или в учебные заведения для создания презентабельного и ухоженного вида люди используют фены, плойки, утюжки для волос. Все вышеперечисленные электроприборы и увеличивают утренний максимум. На [3] и [4] с 8:00 до 8:30 наблюдается значительное снижение мощности после утреннего максимума, причем на построенном графике спад нагрузки менее резкий.

В наши дни люди начинают просыпаться с 6 утра. Начала рабочего дня смещены, чтобы уменьшить утренний час пик в московском метро. По утрам люди покидают свои дома в разное время, поэтому после утреннего максимума нагрузки нет значительных провалов мощности.

На графике из [3] рис. 6 наблюдается второй утренний максимум. Однако с 9:30 до 10:00 на графике из [4] наблюдается рост нагрузки, а с 10:00 до 10:30 - второй утренний максимум. На построенном графике с получасовым осреднением наблюдается рост нагрузки и с 10:30 до 11:00 наблюдается второй утренний максимум. А на графиках из [3] и [4] в это время уже наблюдается спад нагрузки.

На построенных графиках небольшой дневной провал наблюдается только с получасовым интервалом. На графике из [2] рис. 8 имеется дневной провал в интервале с 14 до 16 ч, а на полученном графике в это время нагрузка, наоборот, возрастает. Это вызвано тем, что после обеда люди продолжают массово использовать хозяйственные и культурно-бытовые приборы, которых не было тридцать лет назад в каждой квартире в таком количестве, как в наши дни.

Вечерний максимум на графиках из [3] и [4] длится с 18:30 до 19:00, а на построенном с получасовым осреднением – с 19:30 до 20:00.

Вечерний максимум на построенном графике с часовым осреднением длится с 19 до 20 ч, а на графике [1] – с 18 до 20 ч. В наше время люди возвращаются в квартиры позже, так как в Москве увеличена продолжительность рабочего дня, на дорогу домой люди все больше тратят времени.

На основе количественных показателей графиков нагрузки (коэффициенты, приведенные в табл.1) можно заключить, что новые графики нагрузки стали более равномерными и заполненными, так как коэффициенты формы немного уменьшились, коэффициенты неравномерности и плотности увеличились.

В целом полученные графики рабочих дней заметно отличаются от типовых графиков из [1–4].

4.2. Графики субботы

Сравниваются графики с получасовым осреднением (рис. 9): график субботы, график субботнего дня, взятый из [4], а также график выходного дня из [3].

Характер отличия в ночной период сравниваемых графиков субботы сопоставим с графиками рабочих дней. Утренний максимум наблюдается на графиках из [3] и [4] с 10:00 до 10:30 утра, причем на графике из [3] наблюдается максимальная мощность за сутки. На графике из [4] также в этот период очень высокая, нехарактерная для типового суточного графика рабочих дней, нагрузка.

На графиках из [3] и [4] наблюдаются провалы после утренних максимумов, а на полученном в ходе исследования графике происходит только увеличение нагрузки с ночного провала до 13:00. У полученного графика фактически нет ярко выраженного утреннего максимума. Причины в том, что в выходной день некоторые просыпаются позже, чем в рабочие дни, поэтому наблюдается плавный рост нагрузки.

Графики из [3] и [4] между собой похожи, но с построенным графиком существенно различаются.

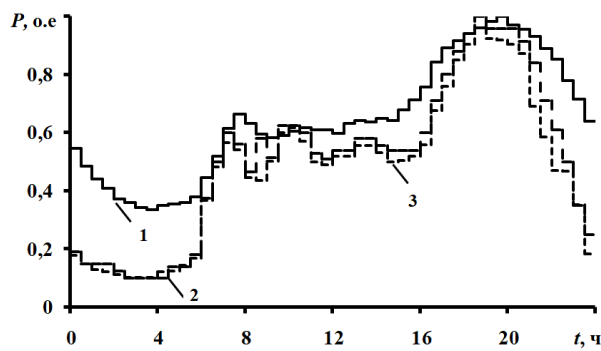


Рис. 6. Суточные графики нагрузки рабочих дней с осреднением 30 минут (1 – построенный; 2 – из [3]; 3 – из [4])

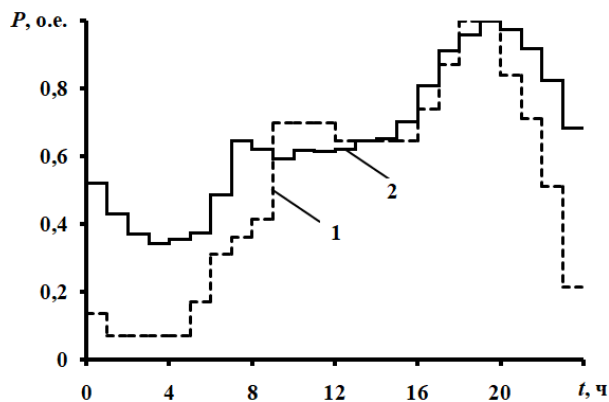


Рис. 7. Суточные графики нагрузки рабочих дней с осреднением 1 час (1 – построенный; 2 – из [1])

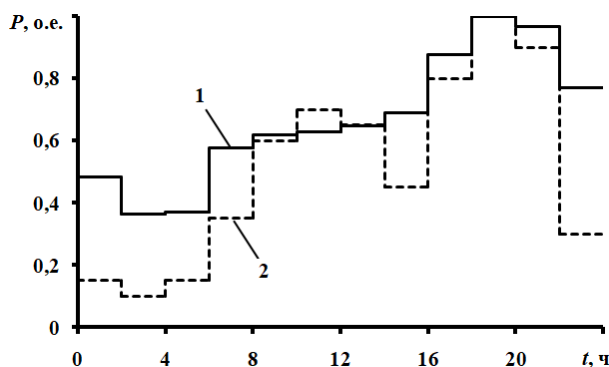


Рис. 8. Суточные графики нагрузки рабочих дней с осреднением 2 часа (1 – построенный; 2 – из [2])

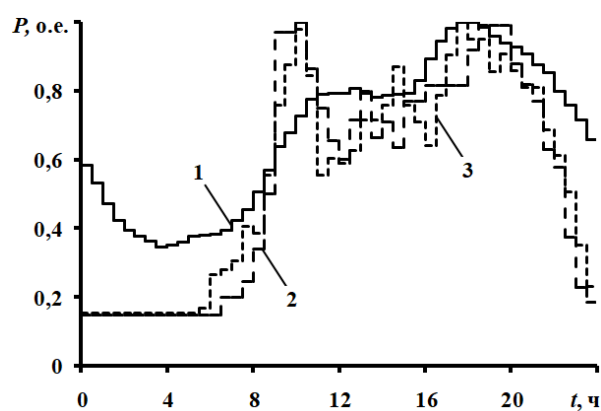


Рис. 9. Суточные графики нагрузки субботы с осреднением 30 минут (1 – построенный; 2 – из [3]; 3 – из [4])

4.3. Графики воскресенья

Сравниваются графики с получасовым осреднением (рис. 10): график воскресенья, график воскресного дня, взятый из [4] и график выходного дня из [3].

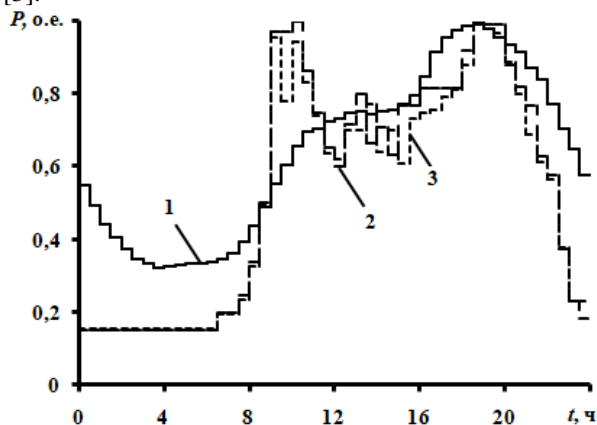


Рис. 10. Суточные графики нагрузки воскресенья с осреднением 30 минут (1 – построенный; 2 – из [3]; 3 – из [4])

У построенного графика не наблюдается явно выраженного утреннего максимума в отличие от графиков из [3] и [4]. Характеры отличия сравниваемых графиков воскресенья в утренний и дневной периоды сопоставимы с графиками субботы.

Вечерний максимум у построенного графика и у графика из [4] наблюдается с 18:30 до 19:00, а у графика из [3] наблюдается максимум с 18:30 до 20:00. Вечерний максимум стал более плавным, как и у субботнего дня.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования получены следующие основные результаты и выводы.

Выявлено, что актуализированные суточные графики нагрузки многоквартирного жилого здания с электроплитами значительно отличаются от типовых из [1–4] как по величине характерных минимумов и максимумов, так и по продолжительности характерных периодов для суточного графика нагрузки.

Установлено, что с увеличением интервала осреднения на графиках рабочих дней пропадают утренние и дневные максимумы, провалы исчезают.

Сравнив графики рабочих дней с получасовым осреднением, отмечено, что наименьшая нагрузка на построенном графике превышает нагрузку на сравниваемых типовых графиках практически в 3,5 раза. На актуализированном графике наблюдается более плавный спад нагрузки после утреннего максимума, чем на сравниваемых с ним.

Сравнив графики рабочих дней с часовым осреднением, видно, что наименьшая мощность актуализированного графика превышает в 4,9 раза мощность типового графика из [1]. Утренний максимум на построенном графике наблюдается на несколько часов раньше, чем максимум на типовом графике.

Сравнив графики рабочих дней с двухчасовым осреднением, установлено, что на построенном графике отсутствуют утренний максимум и дневной провал, какие наблюдаются на графике из [2].

Выявлено, что на типовых графиках рабочих дней с различными осреднениями вечерний максимум начинался раньше, а дальнейший спад нагрузки до полуночи на них значительно сильнее, чем на соответствующих построенных графике. Однако на актуализированных графиках выходных дней вечерние максимумы начинаются в основном раньше, чем на сравниваемых типовых графиках из научно-технической литературы.

На построенных графиках нагрузки выходных дней не наблюдаются явно выраженные утренние максимумы нагрузки, характерные для них и по величине близкие к вечернему максимуму нагрузки рабочих дней. Исследование показало, что наименьшая мощность графиков выходных дней почти в два раза превышает мощность сравниваемых с ними типовыми графиками. Отмечено, что на графиках выходных дней нет дневных провалов.

Замечено, что при сравнении графиков субботы и воскресенья с получасовым осреднением у субботы, в отличие от воскресенья, есть небольшой по продолжительности утренний максимум. Вечерний максимум субботы более продолжительный.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что актуализированные графики заметно отличаются от типовых графиков и их показателей, полученных в 70-90-е годы, когда бытовых приборов было существенно меньше, а уровни благосостояния населения и информатизации их квартир были гораздо ниже.

Наименьшая мощность на полученных графиках при различных осреднениях находится в диапазоне от 0,33 до 0,38 о.е., средняя мощность – от 0,64 до 0,67 о.е., коэффициент формы – от 1,04 до 1,06. Приведенные в работе данные характерны для крупных городов. В небольших городах, где существенную роль играет сменная работа трудящихся, графики нагрузки могут значительно отличаться от рассмотренных выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Козлов В.А.** Городские распределительные электрические сети / В.А. Козлов. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982. – 224 с.
2. **Шведов Г.В.**, Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети: учебное пособие / Г.В. Шведов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 268 с.
3. **Справочник** по проектированию электроснабжения городов / В.А. Козлов, Н.И. Билик, Д.Л. Файбисович. Л., 1986.
4. **Тульчин, И.К.** Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И.К. Тульчин, Г.И. Нудлер.-М.: Энергоатомиздат, 1990. –480 с.

С.А. Дронов, А.В. Федюхин, В.Э. Панарин, А.С. Черных, Ю.В. Яворовский, В.Г. Хромченков, А.В. Мартынов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГРП МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ДГА В СРЕДЕ ASPEN HYSYS

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию вопросов энергосбережения в газотранспортных и газораспределительных системах. В программном пакете Aspen HYSYS авторами разработана модель автономного источника электроснабжения ГРП малой мощности. Представлена краткая последовательность моделирования в данном программном пакете. Определена зависимость электрической мощности детандер-генераторного агрегата от расхода природного газа.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы вследствие повышения спроса на различные энергоресурсы, большое внимание к себе привлекает проблема рационального использования энергии, что в свою очередь влечет за собой и проблемы, связанные с энергосбережением в различных сферах энергетической деятельности, в том числе и в системах транспорта и распределения природного газа, а также использования нетрадиционных источников энергии. Говоря о программах энергосбережения, следует отметить, что одной из ключевых мер по энергосбережению является рациональное использование вторичных энергоресурсов (ВЭР). Особое внимание следует уделить как энергосбережению, так и увеличению энергоэффективности транспортируемого природного газа, чему способствует Федеральный Закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 N 261-ФЗ (последняя редакция).

В нашей стране создана и функционирует самая обширная и масштабная газотранспортная и газораспределительная сети в мире. На долю ПАО «Газпром» приходится около 70% объемов добычи газа в стране. Протяженность лишь магистральных сетей составляет 160 тысяч километров, помимо этого ПАО «Газпром» имеет в совокупности огромное количество газораспределительных организаций. При

транспортировке природного газа по магистральным трубопроводам, давление в них должно составлять несколько десятков атмосфер, чаще всего около 7,5 МПа. Потребителю же требуется природный газ с давлением существенно ниже, чем в магистральном газопроводе, поэтому часть давления транспортируемого газа редуцируется на ГРС от значения 7,5 МПа до 1,2÷1,5 МПа, далее происходит повторное понижение давления газа на ГРП от 1,2 МПа до 0,2 МПа.

Сброс давления на классических ГРС и ГРП происходит с помощью дроссельных устройств, в которых безвозвратно теряется и никак не используется весь потенциал перепада давлений природного газа.

Одним из решений задачи энергосбережения в системах газоснабжения – это использование детандер-генераторного агрегата (ДГА), устанавливаемого вместо дросселирующих устройств на ГРП или ГРС, в этом случае детандер будет являться генератором так называемой бестопливной электроэнергетики, получаемой в электрогенераторе.

Детандер-генераторные агрегаты, являющиеся утилизаторами избыточной энергии транспортируемого природного газа на ГРС или ГРП, также могут применяться и в роли газового двигателя. Возможная эксплуатация ДГА возможна не только в схемах ГРС или ГРП, а также и на компрессорных станциях. К явному положительному аспекту применения данного способа редуцирования природного газа можно отнести то, что газ после прохождения через детандер, в котором он используется лишь в качестве рабочего тела, поступает далее по газопроводам к потребителю, он не сжигается, следовательно, наблюдается полное отсутствие вредных выбросов в окружающую среду. С каждым годом детандеры становятся все более и более перспективной областью для исследований, но, к сожалению, рынок ДГА малой мощности (менее 5 кВт) пока слабо развит в сравнении с ДГА мощностью от 1,5÷7 МВт.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛЕЗНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГРП С ПРИМЕНЕНИЕМ ДГА

2.1. Обзор существующих способов

редуцирования природного газа на ГРП и ГРС с выработкой энергии

В 1947 г. академик М.Д. Миллионщиков предложил идею использования высокого давления газа в магистральных газопроводах для выработки электрической энергии. Европейские страны (Германия, Италия и др.) и США уже в течение нескольких десятилетий используют этот источник почти бесплатной энергии, в то время как в России данную технологию начали осваивать в 90-е годы прошлого столетия. Первый в России детандер-генераторный комплекс мощностью 10 МВт, состоящий из двух ДГА, введен в эксплуатацию в 1994 г. на ТЭЦ-21 Мосэнерго. Подобные агрегаты работают сегодня на Среднеуральской ГРС в России, Лукомльской ГРС в Белоруссии, Днепропетровской ГРС-7 в Украине. Введены в эксплуатацию два ДГА по 5 МВт (ДГА-5000) Рязанской ГРС (производство - ОАО «Криокор») и ЭТДА-1500 в ОАО «Сода» (г. Стерлитамак, Башкирия). Успешный опыт использования ДГА в России, Украине и Белоруссии, а также более чем 40-летний опыт их применения в Западной Европе и Америке вызвал оживление интереса рынка к этой технологии. Это относится не только к мощным ДГА на магистральных газопроводах, но и к небольшим агрегатам, устанавливаемым на ГРС и ГРП распределительных сетей, где редуцирование газа осуществляется при невысоких давлениях (например, с 1,8 или 1,2 до 0,3 МПа). Исследования, проведенные в ООО «Газпром энерго», показали, что на ГРС ПАО «Газпром» могут быть установлены турбогенераторы суммарной мощностью около 550 МВт. При этом среднегодовая мощность почти 80 % от общего числа установок находится в пределах от 0,3 до 4,0 МВт, 15 % – от 4,0 до 9,0 МВт и 5 % – от 10,0 до 17,0 МВт [1].

В СССР турбодетандеры применяли с 1985 года на крупных ГРС и компрессорных станциях [1], а в России с 1994 года на ТЭЦ-21 и ТЭЦ-23, Среднеуральской и Рязанской ГРЭС.

Преимуществами турбодетандерных генераторов высокой мощности являются: низкая удельная стоимость установленной мощности в сравнении с газо- и паротурбинными энергетическими установками; экономия газа до 60 % на 1,0 кВт вырабатываемой электроэнергии; высокое КПД проточной части от 70 % до 80 %; отсутствие вредных выбросов в атмосферу и малые сроки окупаемости от 2,5 до 5,0 лет.

Недостатками является: высокие расходы газа ДГА (от 20000 нм³/ч); сильное охлаждение газа на выходе из детандера (на 45...70°C); высокие эксплуатационные издержки вследствие сложности оборудования; необходимость стабилизации частоты вырабатываемой электроэнергии в условиях колебаний

давлений и расходов газа через ДГА [2]. Указанные особенности делают эффективным применение ДГА на промыслах [3], где температура газа, выходящего из скважины, достаточно высокая, а переохлаждение газа в ДГА используется как одна из операций низкотемпературной сепарации, или на тепловых электростанциях, где потребление газа достаточно стабильное и имеются источники дешевого тепла для его подогрева [4].

В настоящее время ведутся разработки турбодетандеров мощностью до 50 кВт, как наиболее целесообразных для питания электроприемников ГРС, однако, примеры их широкого использования практически отсутствуют [5]. Недостатками турбодетандеров мощностью до 50 кВт являются: относительно высокая стоимость и сложность конструкций; высокие частоты вращения роторов; чувствительность к возможному выпадению конденсата; необходимость стабильного расхода через детандер и высокого давления [6].

Существуют разработки детандеров с более редкими видами роторно-поршневых объемных машин, которые разрабатывались в 1980-1990 гг. в институтах НАМИ, ВНИИМотопром, в специальном конструкторском бюро роторно-поршневых двигателей ОАО «АВТОВАЗ» [7]. Применение таких детандеров в качестве привода генератора в ДГА для электроснабжения объектов газовой промышленности является нецелесообразным ввиду высокой сложности и стоимости изготовления.

Рассмотренные выше примеры подразумевают приоритетное использование расширительных машин объемного типа в качестве привода в ДГА, в частности роторных детандеров.

2.2. Актуальность использования ДГА в газораспределительных системах

Российская Федерация занимает первое место в мире среди стран по площади, которая составляет 17 125 191 км², а также находится в списке мировых лидеров по добыче природного газа. Наша Родина богата залежами полезно-ископаемых ресурсов, в числе которых находится природный газ. В особенности им богата Западная Сибирь, в ней находятся около 90% запасов природного газа. По статистике Министерства Энергетики Российской Федерации в 2018 году общая добыча природного и попутного нефтяного газа возросла на 5% и тем самым стала рекордным за всю историю газодобычи РФ (725,5 млрд. м³).

Для транспорта «голубого топлива» тому или иному потребителю существуют газораспределительные станции (ГРС), газораспределительные пункты (ГРП), компрессорные станции (КС) и т.д., которые в совокупности образуют единую газотранспортную систему (ГТС). На данный момент можно заметить, что уровень потребления и добычи природного газа в нашей стране растет год от года, данный факт негативно сказывается на затратах энергии и средств, направленных на подготовку газа,

а также на его транспортировку. Следовательно, появляется необходимость в повышении не только энергоэффективности, но и экономичности систем газотранспорта и газопотребления. Прогнозы ученых гласят, что к 2030 году потребление газа в мире увеличится в 2 и более раза, по сравнению с нынешним значением.

Множество газораспределительных объектов расположено в разных уголках нашей страны. Для их стабильного функционирования им необходима электроэнергия, которая в большинстве случаев доставляется по привычным нам воздушным линиям электропередач (ВЛЭП). В зависимости от удаленности ГРП и области его присоединения к стационарной электросети, стоимость строительства ВЛЭП будет увеличиваться с каждым километром. Стоимость 1 км ВЛЭП оценивается в 10 млн. рублей, но окончательная цена может быть и выше. Дополнительные финансовые затраты приходится на плату за присоединение к электрической сети, которые варьируются от технической возможности и составляют около 1 млн. рублей за кВт установленной мощности. Для работы электрооборудования, находящегося на ГРП, необходимо также закупать электроэнергию. На ГРП основными потребителями электроэнергии являются:

- а) системы освещения и электрообогрева;
- б) охранная и пожарная системы безопасности;
- в) приборы управления запорно-регулирующей арматурой.

В совокупности, перечисленные выше электроприемники, суммарно потребляют мощность менее 5 кВт, их номинальное напряжение не превышает 28 В. При питании электроприемников от электросети переменного тока с фазным напряжением 220В и линейным 380В, используются различные понижающие преобразователи, необходимые для их функционирования. В них в виде тепла рассеивается избыточная энергия.

В связи с различными факторами, техническими или природными, снабжение электроэнергией (например, ГРП) может быть прервано или же электроэнергия будет низкого уровня качества. ГРП, потребляющий электроэнергию от автономного источника питания будет иметь ряд преимуществ. При создании такого рода системы электроснабжения, необходимо создать перечень требований, которым бы она подчинялась:

- 1) простота в обслуживании;
- 2) автономность;
- 3) ресурс работы более 5 лет без перерывов;
- 4) независимость качества получаемой электроэнергии от внешних условий среды.

В газовой промышленности в роли автономного источника электроснабжения может выступать широкий спектр технического оборудования.

Классификация автономных источников электроснабжения для газовой промышленности представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация автономных источников электроснабжения для газовой промышленности

Одним из направлений энергосбережения, а также повышения уровня надежности систем газоснабжения, которое становится все более актуальным и интересным для исследований, является применение автономных источников электроснабжения в ГТС. В роли такого источника может выступать детандер-генераторный агрегат, устанавливаемый на ГРП вместо дросселирующего устройства. В детандер-генераторном агрегате происходит снижение значений температуры и давления газа, его кинетическая энергия преобразуется в механическую энергию вращения ротора, соединенного с валом генератора, в котором и вырабатывается электроэнергия. После ДГА газ продолжает путь к потребителю. Важно заметить, газ при этом не сжигается, что позволяет полностью исключить вероятность загрязнения окружающей среды вредными выбросами.

Несмотря на положительные стороны возможной эксплуатации ДГА вместо дросселирующего устройства, важно понимать и недостатки данной расширительной машины, которые накладывают невозможность ее использования в определенных условиях. Погодные условия в летний и зимний периоды отличны вследствие географического расположения нашей страны. В разное время года значения параметров давления газа в газопроводе, а также его расход и температура отличаются значительно. Переменчивость параметров газа в зависимости от времени года побуждает применение на ГРС детандеров малой мощности (0,5÷5 кВт) для покрытия собственных нужд здания.

2.3. Инновационность применения ДГА в системах газораспределения и анализ рыночных трендов в данной области

В отличие от турбоагрегатов, ДГА с приводом от роторного детандера может служить для выработки электроэнергии при его использовании на газопроводе с незначительным отбором газа $\approx 100\div 200 \text{ нм}^3/\text{ч}$ и с давлением газа на входе порядка 0,08 МПа. Для уменьшения потерь электроэнергии в процессе ее преобразования и повышения надежности всей системы, целесообразно применять низковольтный генератор, который будет обеспечивать питание потребителей электроэнергии на ГРП постоянным напряжением от 12 до 24 В (так как почти все электроприемники – низковольтные), что позволит отказаться от понижающих преобразователей и другого

вспомогательного оборудования. При необходимости низковольтный генератор можно объединить в параллельную работу с аккумуляторными батареями.

В настоящий момент ведутся разработки в области автономного электроснабжения в ГТС на основе различных устройств такой же мощности. Наиболее распространены варианты электроснабжения детандерными электроагрегатами с приводом генератора от турбины либо от микротурбины. Но серийного применения в системах газораспределения нет. На объекте, где необходимо снабжать электроэнергией низковольтную аппаратуру с незначительным энергопотреблением (телеметрия и АСУТП) в роли автономного источника электроэнергии применяются нетрадиционные источники энергии:

- а) солнечные батареи;
- б) установки, работающие от энергии ветра;
- в) совместное использование солнечных батарей и ветроустановок.

Данные источники электроэнергии, которые эксплуатировались на различных объектах с довольно малым энергопотреблением (чаще всего дорожная инфраструктура) не зарекомендовали себя в роли надежного и бесперебойного автономного источника электрической энергии, так как их эффективность напрямую зависит от географического и климатического факторов, что заставляет сделать вывод о нецелесообразности использования данных технологических решений для их применения на объектах транспорта и распределения природного газа. Из выше перечисленных возможных решений задачи внедрения автономных источников электроэнергии в ГТС, наибольшее внимание акцентируется на детандер-генераторных агрегатах, что и делает данную область актуальной на сегодняшний день.

Установками подобного рода занимаются различные предприятия, в числе которых находится ООО «Дельта П» (Москва), данным предприятием создаются и вводятся в эксплуатацию детандер-генераторные установки, применяемые на ГРП с диапазоном мощностей 0,1÷5 кВт.

3. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ДГА В ГРП

3.1. Обзор принципиальных схем включения ДГА для выработки электроэнергии

В газотранспортной системе Российской Федерации находятся множество газораспределительных станций и газораспределительных пунктов, служащие для изменения параметров транспортируемого природного газа от параметров, которые присущи ему при нахождении в магистральной сети до параметров, необходимых потребителю. В зависимости от их географического расположения, на том или ином ГРП применяются различные источники электроснабжения, чаще всего это газотурбинные установки, но также встречаются и объекты, на которых электрическую энергию получают при помощи как возобновляемых источников энергии, так и при помощи автономных источников электроснабжения, работающие на полезном использовании вторичных энергоресурсов.

Примером такого источника служит детандер-генераторный агрегат.

Применение детандер-генераторного агрегата в той или иной схеме на объекте прежде всего зависит от условий его эксплуатации и от конструктивных особенностей агрегата. Выбор схемы включения ДГА в ГРП также зависит от целей и задач, для решения которых он применяется.

Наиболее распространенные варианты включения ДГА в ГРП имеют теплообменный аппарат, находящийся перед ДГА, который предварительно подогревает газ перед его подачей в детандер-генераторную установку. Такой подогрев газа можно реализовать с использованием энергии топлива или при помощи низкопотенциальных источников теплоты, в этом случае сжигания топлива не происходит и поэтому детандер-генераторные установки, работающие по такой схеме, получили название «бестопливные» [8].

Бестопливные установки на базе ДГА описаны в [9–10]. Изучение различных схемных решений, показало, что способов включения ДГА в схему ГРП существует достаточное количество, как стандартных, так и модифицированных. В большинстве случаев детандер-генераторный агрегат принято располагать параллельно с дросселирующим устройством, такой способ позволяет редуцировать давление природного газа с применением и ДГА и дросселирующего устройства, что также повышает надежность системы в целом. Следует отметить, что помимо схем с применением теплообменного аппарата перед ДГА, бывают и технические решения, исключающие предварительный подогрев газа на входе в ДГА. Принципиальная схема одной из таких установок представлена на рис. 2.

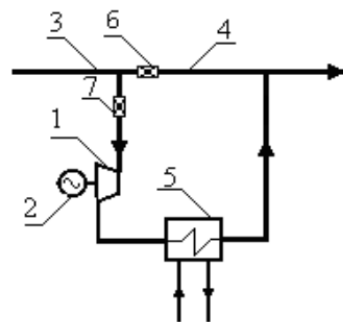


Рис. 2. Принципиальная схема детандер-генераторной установки без предварительного подогрева газа: 1-детандер; 2-электрогенератор; 3-газопровод высокого давления; 4-газопровод низкого давления; 5-теплообменный аппарат; 6, 7-дросселирующее устройство.

В данной схеме дросселирующее устройство 7 необходимо для предварительного дросселирования потока газа на входе в детандер, так как при условии его отсутствия температура газа по окончании процесса расширения может достигать значения -80°C , которое недопустимо по нормам эксплуатации оборудования. За счет предварительного дросселирования снижается давление газа и температурный перепад в ДГА. Достижение требуемой температуры газа после ДГА в -30°C осуществляется при помощи теплообменного аппарата 5, подогревая природный газ, с его помощью предусмотрено получение холода для потре-

бителя. Применение такой схемы включения ДГА целесообразно на ГРС или ГРП с незначительным отношением входного и выходного давлений. Однако, такое решение неэффективно с экономической точки зрения, что и побуждало разрабатывать схемы, в которых подогрев газа осуществляется перед ДГА.

3.2. Разработка принципиальной схемы включения детандера в ГРП

Типовые схемные решения бестопливных установок на базе ДГА включают в себя системы подогрева газа, дополнительные контуры для получения холода, вспомогательное оборудование в виде воздушных турбин и воздушных компрессоров, теплообменных аппаратов. Подобного рода технологические решения негативно сказываются на стоимости как оборудования отдельно, так и всей системы в целом. Применение большого количества оборудования в схеме усложняет эксплуатацию, а также обслуживание. В совокупности надежность системы снижается. Также следует отметить, что такие установки рассчитаны на большую мощность. Подобные схемы также требуют под свое расположение довольно обширную площадь. В связи с этим актуально направление разработки принципиальной схемы включения ДГА малой мощности в ГРП, которая полностью бы решала все поставленные задачи, была максимально простой, экономичной, но в то же время и эффективной.

Так как в рамках исследования в данной работе лежит цель изучения возможности включения в схему ГРП ДГА малой мощности, то для разработки принципиальной схемы включения были сформулированы следующие предпосылки: в схему ГРП включается ДГА малой мощности, следовательно, перепад температур на входе и выходе из агрегата будет незначительный, что позволяет отказаться от различных схем подогрева газа, в которых присутствуют различные вспомогательные агрегаты и установки.

Часто используемой является схема включения ДГА параллельно штатному регулятору давления. Такая схема подразумевает применение ДГА в условиях низкой неравномерности отбора газа потребителями, а также включает в себя все недостатки, присущие традиционным регуляторам давления.

Также применяют схему включения ДГА после традиционного РД, но до отвода импульсной трубки командного давления регулятора (рис. 3).

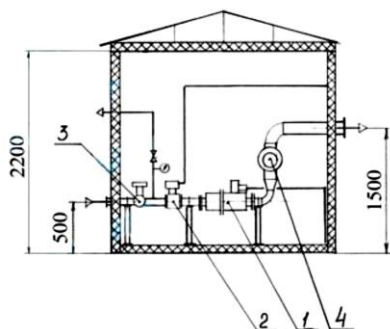


Рис. 3. Схема включения ДГА последовательно за регулятором давления газа: 1 – турбодетандер; 2 – регулятор давления; 3 – предохранительный запорный клапан; 4 – предохранительный сбросной клапан.

Такой подход позволяет снизить отрицательное влияние пониженной температуры на РД, однако, подразумевает использование ДГА малой мощности [11]. Этой схеме также присущи все недостатки, связанные с использованием традиционных РД. Кроме того, отсутствует возможность механической стабилизации частоты вращения детандера в случае значительных неравномерностей отбора газа потребителями.

Существуют различные автоматические системы регулирования ДГА, в основе которых, так или иначе, лежат принципы разделения и переключения потоков. Однако, такие системы более сложные и имеют значительные габариты, определяемые использованием турбинных расширительных машин и высокими расходами газа. Для включения образца роторного ДГА малой мощности в схему ГРП наиболее рациональным будет решение, показанное на рис. 4. На базе данного схемного решения создается математическая модель блока ДГА в среде Aspen HYSYS.

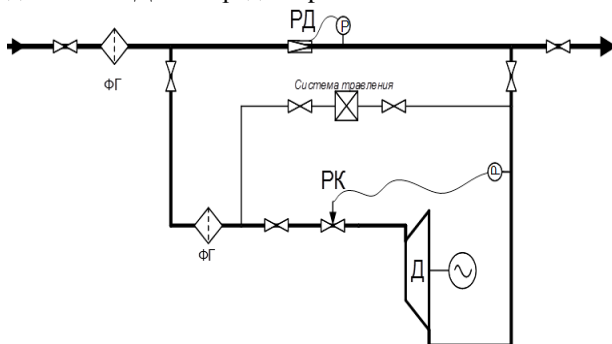


Рис. 4. Математическая модель ДГА.

На рис. 4 видно, что детандер подключен через байпасную линию, подача природного газа на которую регулируется двумя клапанами. Основной поток газа при этом идет через основную линию. При полной зарядке аккумулятора срабатывает автоматика, подача природного газа в детандер перекрывается, и он останавливается.

4. СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЛОКА ДГА В СРЕДЕ ASPEN HYSYS,

4.1. Статическая модель блока ДГА, работающая в летний период

Для оценки теоретической возможности полезного использования перепада давлений природного газа с целью получения электроэнергии при помощи ДГА малой мощности, используется среда Aspen HYSYS. Aspen HYSYS представляет собой программный пакет, позволяющий моделировать процессы в стационарном и динамическом режимах, который широко применяется как в отечественной, так и в мировой науке для решения широкого спектра задач.

Данный программный продукт обуславливает свою популярность удобством и простотой создания технологических схем любой направленности, а также их автоматизированным расчетом. Для расчета технологических схем и процессов, происходящих внутри того или иного аппарата, в HYSYS со-

держится широкий набор термодинамических пакетов, выбор которых зависит от рабочего тела, используемого в определенном этапе технологического процесса.

Схема, представленная на рис. 4, была адаптирована под среду HYSYS и показана на рис. 5.

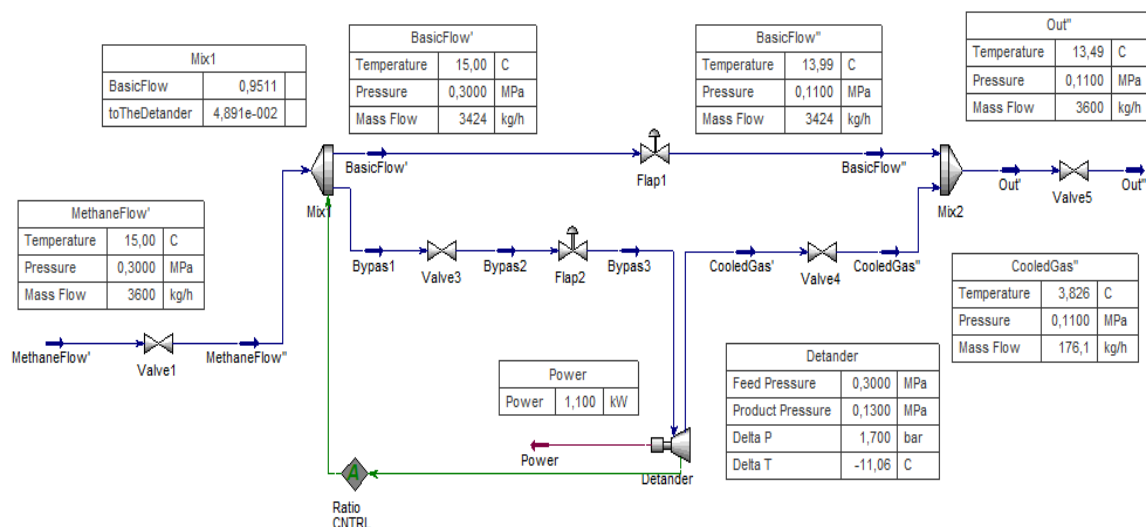


Рис. 5. Установка для генерации электроэнергии на базе роторного ДГА малой мощности в среде Aspen HYSYS.

Составляющие схемы на рис. 5 с их описанием сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Условные обозначения элементов схемы в Aspen HYSYS

№	Обозначение элемента на схеме	Описание элемента
1		Материальный поток рабочего тела (природный газ, углеводороды, воздух, дымовые газы, вода и др.) с присвоенным ему названием
2		Компонент запорной арматуры (задвижка), положение: open/close
3		Смеситель, предназначенный для разделения/смешения материальных потоков
4		Компонент регулирующей арматуры (регулирующий клапан)
5		Расширительная машина. задается перепад давлений в агрегате, его адиабатический/политропный КПД или требуемая получаемая мощность.
6		Инструмент под названием ADJUST, позволяющий определить значение задаваемого параметра с помощью любого второго параметра с учетом их взаимосвязи.

Входное давление P природного газа на входе в ГРП составляет 0,3 МПа, температура $t=15^{\circ}\text{C}$ и объемный расход V равен $5000\text{ м}^3/\text{ч}$. Так как природный газ в большей части состоит из метана, в модели

было принято следующее допущение: в качестве рабочего тела выбирается метан (CH_4), тогда для определения массового расхода газа воспользуюсь формулой: $G=V\cdot\rho$, где $\rho=0,72\text{ кг/м}^3$ – плотность метана. Тогда: $G=V\cdot\rho=5000\cdot0,72=3600\text{ кг/ч}$.

В данной схеме также принято, что давление P двух потоков, входящих в Mix2 равно 0,11 МПа (значение давления газа в жилых зданиях). Относительно этого значения рассчитывается гидродинамическое сопротивление в задвижке Valve4 и регуляторе Flap1.

Процесс моделирования состоит из ряда последовательно выполняющихся операций. Прежде чем приступить к созданию модели, пользователю необходимо выбрать состав материального потока. Для этого при загрузке программы в стартовом окне с левой стороны необходимо выбрать пункт Component List и пользователю предоставляется окно с веществами. В специальном окне выбирается вещество Methane (исходя из допущения, принятого ранее).

После выбора пользователем необходимого вещества в соответствующем окне, следующим шагом является выбор термодинамического пакета в пункте Fluid Package, с помощью которого среда HYSYS произведет полный комплекс расчетов. Каждый термодинамический пакет или их группа предназначены для расчета определенных веществ. Так как для построения исследуемой модели в качестве рабочего тела был выбран метан, поэтому из набора термодинамических пакетов выбирается пакет Peng-Robinson. Данный термодинамический пакет один из рекомендуемых для расчета углеводородов.

По окончании этапа выбора термодинамического пакета, пользователю открывается доступ к рабочей области среды HYSYS. Рабочая область пред-

ставляет собой однотонный фон, на который необходимо помещать все необходимые элементы и материальные/энергетические потоки. (Рис. 5).

В рамках созданной модели, требуемая мощность ДГА равна 1,1 кВт. Относительно этого значения элемент RatioCNTRL позволяет определить, какую долю от основного потока газа с соответствующими параметрами необходимо направить на линию к ДГА. Как видно на рис. 5, доля потока, направляемого в ДГА равно 0,04891, что составляет 4,891% от основного.

С помощью созданной модели можно посмотреть, как будет изменяться соотношение долей разделенного в Mix2 потока газа, в зависимости от требуемой величины электрической мощности, сгенерированной в ДГА. На рис. 6 представлен график зависимости мощности N , вырабатываемой в ДГА от доли основного потока, направленной на линию к ДГА, созданный при помощи встроенного в HYSYS инструмента Case Studies.

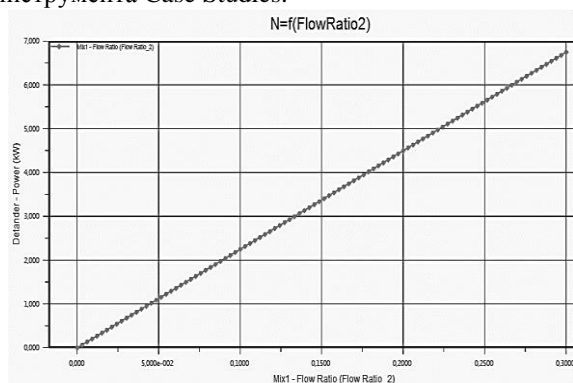


Рис. 6. График зависимости мощности N , вырабатываемой в ДГА от доли основного потока, направленной на линию к ДГА.

Из рис. 6 видно, что при увеличении количества газа, направляемого на ДГА, вырабатываемая им мощность увеличивается по линейной зависимости. Полученное из графика значение доли от основного потока газа, направляемой на ДГА, соответствует значению, полученное инструментом ADJUST. Это показывает, что для решения одной конкретной задачи, HYSYS предоставляет несколько вариантов ее решения, так как среда Aspen HYSYS имеет на борту огромное количество различных инструментов, предназначенных для решения широкого спектра задач.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были приобретены практические навыки работы в среде Aspen HYSYS, с помощью которой создана математическая модель блока ДГА малой мощности, включаемого в схему ГРП. Для заданных параметров газа при помощи инструментов ADJUST и Case Studies определена часть потока, равная 4,891%, которую необходимо подавать на ДГА для выработки необходимого количества электроэнергии.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ГРП – газорегуляторный пункт;
 ГРС – газораспределительная станция;
 ГТС – газотранспортная система;
 КС – компрессорная станция;
 ДГА – детандер – генераторный агрегат;
 РД – регулятор давления;
 АСУТП – автоматизация систем управления тепловыми процессами;
 P – давление природного газа, МПа;
 t – температура природного газа, °С.
 V – объемный расход природного газа, м³/ч;
 G – массовый расход природного газа, кг/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов И.В. Концепция развития энергетики ОАО «Газпром» на основе применения собственных электростанций // Газовая промышленность. – №11. – 2003. – С. 101.
2. Кулагина О.В. Использование избыточной энергии давления природного газа на небольших газораспределительных станциях // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. – Томск. – 2013. – С. 263-264.
3. Кротович В.А. Опыт создания автономной системы электропитания для газовой промышленности // Веб-сайт Тов. "ДП УКРГАЗТЕХ". – 2018. – Режим доступа: http://www.dgt.com.ua/news/oil-gas/udk_621_362/udk_621_362.pdf
4. Зарницкий Г.Э. Теоретические основы использования энергии давления природного газа. – М.: Недра, 1968. – 297 с.
5. Кулагина О.В. Использование избыточной энергии давления природного газа на небольших газораспределительных станциях // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. – Томск. – 2013. – С. 263-264.
6. Фокин Г.А. Методология создания автономных турбинных источников электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.04.02 / Фокин Григорий Анатольевич. – СПб., 2015. – 456 с.
7. Ренин Л.А. Возможности использования энергии давления природного газа на малых газораспределительных станциях // Энергосбережение. – №3. – 2004. – С. 34-39.
8. Агабабов, В.С. Бестопливные детандер-генераторные установки: учебн. пособие / В.С. Агабабов, А.В. Корягин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
9. Способ работы детандерной установки и устройство для его осуществления: пат. 2150641 Рос. Федерация: МПК F25B11/02, F01K27/00 / Агабабов В.С.; заявитель и патентообладатель МЭИ (ТУ). – № 99113159/06, заявл. 15.06.1999; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. – 3 с. с ил.
10. Агабабов В.С. Установка для производства электроэнергии на базе ДГА, воздушных турбины и компрессора / В.С. Агабабов, Е.В. Джураева, А.Ю. Архарова // Вестник МЭИ. – 2007. – № 2.
11. V. Karasevich, V. Li, R. Kashlaev, A. Feduykhin. Autonomic energy supply of distributed/isolated villages in Russia by using combination of LNG/CNG/LPG/diesel and renewable energy. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 643 (2019) 012047.

Я.А. Загороднев, Г.В. Шведов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАЧНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена определению энергопотребления жилого дома в пасмурные и ясные дни через построение и сравнение графиков нагрузки жилого многоэтажного многоквартирного дома в летний и зимний период. Показана зависимость электропотребления и конфигурации суточного графика нагрузки жилого многоквартирного дома от степени облачности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных показателей при планировании работы энергетической системы является прогнозирование уровня электропотребления. Необходимо точно прогнозировать потребление электроэнергии, но на него большое влияние оказывают метеорологические факторы: температура наружного воздуха, освещенность, влажность, скорость ветра. Они во многом определяют сезонные колебания и суточную неравномерность графиков потребления. Наиболее сильное влияние на потребление электроэнергии оказывает температура и освещенность.

В данной работе рассматривается, как облачность влияет на электропотребление современного многоэтажного многоквартирного жилого дома.

Объектом исследования был выбран двадцати трехэтажный панельный жилой дом с электрическими плитами в городе Москва.

Исходными данными являлись значения потребленной энергии за каждые тридцать минут в периоды с 1 декабря 2018 года по 31 января 2019 года и с 1 июня по 31 июля 2019 года.

2. ВЫДЕЛЕНИЕ ГРУПП ДНЕЙ С ПРИМЕРНО ОДИНАКОВЫМ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Для определения метеорологических показателей облачности за необходимый период времени, был осуществлен анализ архива погоды [1]. В нём также были представлены температура окружающего воздуха и скорость ветра. Эти факторы могут помочь объяснить сильное различие в графиках нагрузки при одинаковой облачности.

Естественная освещенность земной поверхности определяется солнечным излучением, поступающим на землю, и зависит от угла падения солнечных лучей. Угол падения определяется временем года или положением земли на около солнечной орбите, а также от широты местности. Атмосфера поглощает большую часть излучения. Остальную, поступающую на землю солнечную радиацию, делят на два вида: прямая и рассеянная. Облачность бывает двух видов: сплошная и переменная. При переменной облачности половину неба занимают облака, а другая половина ясная. При сплошной облачности все небо занимают облака [2].

Для исследования разделим дни на три группы: ясные, со сплошной облачностью, с переменной облачностью.

Для жилых зданий, согласно [3], электропотребление в значительной степени различается в выходные и будние дни. Основное различие приходится в основном на утренний и дневной периоды времени, когда степень естественной освещенности будет существенно влиять на электропотребление.

В этих условиях необходимо разделить все дни ещё на две группы: выходные и будние дни.

К рассмотрению принято электропотребление четырех месяцев в году – это два летних месяца июнь и июль и два зимних – декабрь и январь. В эти месяцы попарно примерно одинаковые температура окружающего воздуха и, что самое главное, примерно одинаковая продолжительность светового дня.

3. ГРАФИКИ НАГРУЗКИ ИССЛЕДУЕМОГО ЖИЛОГО МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА

До начала обработки измеренных данных по электропотреблению было предположено следующее влияние облачности на электропотребление жилого здания.

В летний период времени при облачности должен увеличиться утренний пик, так как он наступает в период с 8.00 до 9.30. Вечерний максимум должен наступать раньше, а его продолжительность увели-

чится. А выходные дни будут характеризоваться повышенным электропотреблением во второй половине дня.

В зимний период необходимо учесть, что на широте Москвы сумерки наступают примерно в 16.30. Поэтому зимние графики нагрузки в облачный день должны иметь большее значение утреннего максимума и высокие значения во второй половине дня, а на значение вечернего максимума облачность не будет оказывать какое-либо влияние.

Построим усредненные суточные графики нагрузки в рабочие и выходные дни отдельно для ясных дней, дней с переменной и сплошной облачностью (рис. 1–4).

На графиках рабочих дней видно, что в дни с переменной или сплошной облачностью утренний максимум и дневное снижение различаются не сильно. В вечерний период времени в облачные дни рост потребления мощности начинается на два часа раньше. Максимум потребления при сплошной облачности наступает также на два часа раньше. Продолжительность максимума нагрузки увеличивается. В дни с переменной облачностью максимум наступает в то же время, что и в ясные дни.

В выходные дни сохраняется похожая с будними днями динамика потребления электроэнергии жилого дома. Утренний пик наступает в одно и то же время, а дневное снижение в потреблении электроэнергии нет. В дневное время в облачные дни потребление выше, чем в ясные дни, что говорит о влиянии нагрузки освещения. В облачные дни не наблюдается явного вечернего максимума. Потребление в вечернее время немного увеличивается по сравнению с дневным потреблением. Тогда как в ясную погоду максимум прослеживается примерно в 22-00.

Так как в зимнее время в 8-00 ещё темно, а сумерки наступают примерно в 17-00, то облачность не влияет на значение утреннего и вечернего максимума. Поэтому в будние дни зимнего периода усреднённые графики нагрузки жилого дома при ясной погоде и погоде со сплошной облачностью различаются только потреблением в дневное время. В ясную погоду и в дни с переменной облачностью температура окружающего воздуха оказывалась более низкой, чем в дни со сплошной облачностью. Вследствие, в дневное время потребление электроэнергии в ясные дни отличается незначительно, чем электропотребление в дни со сплошной облачностью. А в дни с переменной облачностью график нагрузки лежит выше, чем в ясные дни, что говорит о повышенном потреблении на нагрузку освещения.

В зимний период времени графики нагрузки выходных дней при облачной и ясной погоде отличаются незначительно. Так как утренний максимум наступает в более позднее время (примерно в 11-00), а вечерний пик слабо выражен из-за большого энергопотребления в дневное время, то энергопотребление осветительных приборов в выходные дни вносит несущественный вклад в общее потребление.

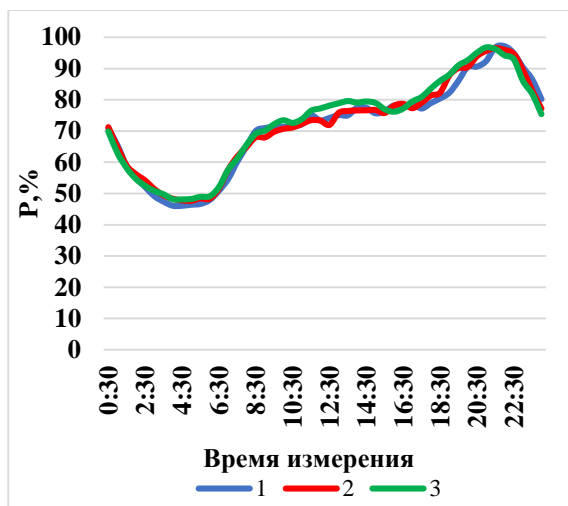


Рис. 1. Усреднённый график нагрузки жилого дома в летний период будних дней: 1-ясные дни, 2-дни с переменной облачностью, 3- дни со сплошной облачностью.

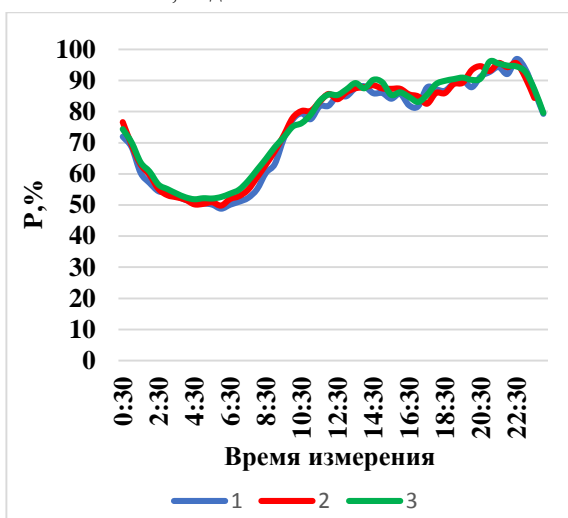


Рис. 2. Усреднённый график нагрузки жилого дома в летний период выходных дней: 1-ясные дни, 2-дни с переменной облачностью, 3- дни со сплошной облачностью.

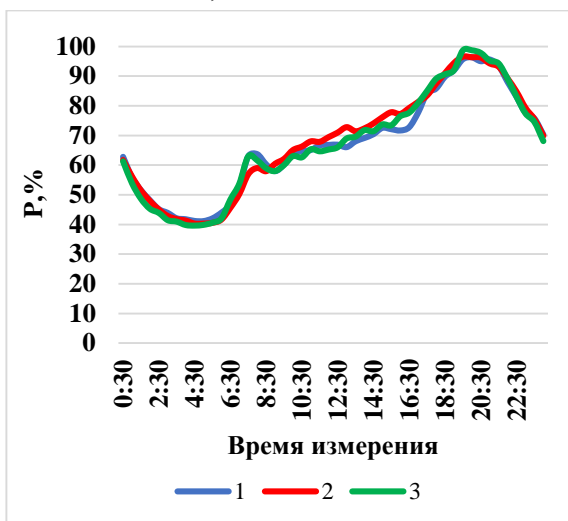


Рис. 3. Усреднённый график нагрузки жилого дома в зимний период будних дней: 1-ясные дни, 2-дни с переменной облачностью, 3- дни со сплошной облачностью.

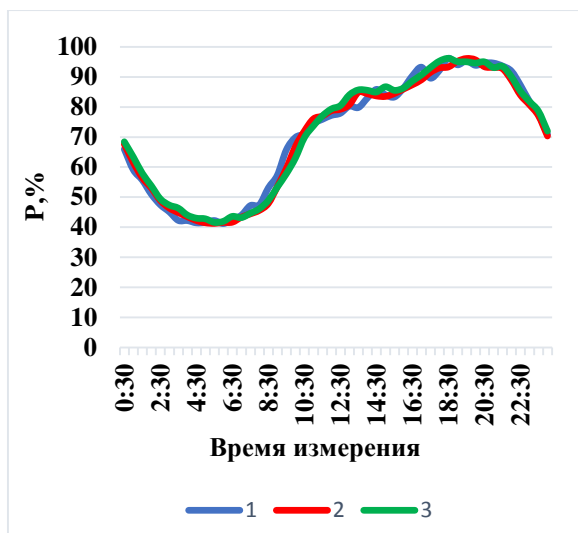


Рис. 4. Усреднённый график нагрузки жилого дома в зимний период выходных дней: 1-ясные дни, 2-дни с переменной облачностью, 3- дни со сплошной облачностью.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значение потребляемой мощности в ясные и облачные дни отличается незначительно, так как световой день продолжительный, то нагрузка освещения играет не самую значительную роль в потреблении электроэнергии. Поэтому в летний период облачность не сильно влияет на изменение в суточном графике нагрузки.

В зимний период облачность влияет на величину и продолжительность утреннего максимума. Но потребление электроэнергии осветительными приборами не самое значительное в общем графике нагрузки. Вследствие чего другие метеорологические факторы сильнее влияют на конфигурацию графика нагрузки.

Проанализировав суточные графики нагрузки многоквартирного жилого дома, выявили, что электропотребление дома слабо зависит от естественной освещенности. Современные квартиры оснащены большим количеством разнообразных электроприемников. Это не только осветительные и бытовые электроприборы, но и общедомовые электроприемники. Так как количество бытовых приборов в квартирах увеличивается каждый год, а среди осветительных приборов лампы накаливания заменяются другими более экономичными типами ламп, то доля освещения в электропотреблении квартиры уменьшается. По данным [4] на 2000 год, в жилом доме с электроплитами на долю освещения приходилось

20% от общего электропотребления. Поэтому включение осветительных приборов в облачные дни изменяет график нагрузки в небольшом диапазоне.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование влияния облачности на электропотребление жилого многоквартирного дома в летний и зимний периоды. Изучив материалы [4] выяснили, что для жилого дома с электрическими плитами необходимо рассматривать будние и выходные дни отдельно, так как графики нагрузки сильно отличаются. Облачность должна оказывать большое влияние на нагрузку освещения.

В летний период облачность влияет на потребление в течение всего дня. В дни со сплошной облачностью значение утреннего максимума, дневного потребления и вечернего максимума было больше, чем в ясные дни и дни с переменной облачностью. Продолжительность вечернего максимума в ясные дни оказалось меньше примерно на 2 часа.

В зимний период облачность влияет только на величину дневного потребления. Дневное потребление в облачную погоду больше, чем потребление в ясную погоду. Так как световой день очень короткий, то облачность не влияет на значения вечернего максимума. В будние дни облачность также не влияет на значение утреннего максимума, а выходные дни утренний пик наступает примерно в 11-00, поэтому его величина в облачные дни больше, чем в ясные.

Выявили, что влияние облачности на электропотребление жилого многоквартирного дома с электрическими плитами не имеет большого значения. Это происходит из-за того, что нагрузка освещения вносит небольшой вклад в электропотребление жилого дома. А также влияние температуры более значимо, поэтому при сильном увеличении температуры, суточный график нагрузки может изменяться очень сильно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php>.
2. **Атмосфера** земли / Х.П. Погосян - М.: Просвещение, 1970 г.
3. **Электроснабжение** городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети / Г. В. Шведов - М.: Издательский дом МЭИ, 2012 г.
4. **Системы** электроснабжения / Г.В. Шведов, Т.А. Шестопалова. – М.: Изд-во МЭИ, 2018 г.

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПОТОЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИПСОКАРТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ**АННОТАЦИЯ**

В данной работе произведен обзор современных систем охлаждения жилых помещений на базе потолочных гипсокартонных панелей. Описана методика определения результирующего теплового потока от охлаждающих панелей к телу человека. Экспериментальное исследование работы системы потолочного охлаждения показало свою эффективность на реальном объекте (частный жилой дом в Московской области). В ходе эксперимента температура внутреннего воздуха в исследуемом помещении понизилась на 2 °С. Экспериментальные данные позволили создать математическую модель данной системы в Ansys Fluent.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для охлаждения помещений системы потолочного охлаждения используют третий элементарный способ теплопередачи, а именно – радиационный теплообмен (или инфракрасное охлаждение). Сначала лучистая энергия от панелей падает на внутренние ограждающие конструкции комнат и на мебель. А затем данные предметы начинают охлаждать внутренний воздух данного помещения. Также поток холода непосредственно влияет на человека и его самочувствие, если он находится под ним.

Системы инфракрасного отопления и охлаждения - наиболее оптимальные системы для жилых домов и общественных зданий, построенных по технологии пассивного домостроения. Источником теплоснабжения и охлаждения этих зданий является тепловой насос.

В большинстве офисных зданий есть много больших окон. Летом, когда солнце светит, офисное пространство нагревается, и люди внутри чувствуют себя некомфортно. А холод от классических сплит-систем на многих людей оказывает плохое влияние и можем привести к простуде. Холод же от охлаждающих панелей «мягкий» и сравним с холодом, который испытывает человек, который находится в пещере.

Системы потолочного охлаждения условно можно разделить на два вида. Первый – локальные панели, которые расположены только над рабочим местом человека. В основном, данные системы строят на базе листов из поливинилхлорида, внутри которых в минеральной вате проложены пластиковые трубы с циркулирующим в них холодоносителем (как правило, воды из геотермальной скважины теплового насоса). Второй – общие или центральные панели, которые расположены на всем потолке помещений. Иногда на стенах помещений. Второй вариант позволяет не только оказывать непосредственное

влияние на самочувствие человека за счет воздействия радиационных потоков холода, но и позволяет значительно снизить температуру внутреннего воздуха в летний период. Данное решение особенно актуально для двухэтажных энергоэффективных или пассивных жилых домов, в которых теплый воздух с первого этажа через лестничный марш поднимается на второй этаж и перегревает его.

Для оценки эффективности охлаждающих панелей необходимо исследовать взаимодействие тепловых потоков за счет излучения и конвекции между панелью и частями тела человека. Также оценить конвективные температуры воздуха в различных точках помещения по высоте. Экспериментальные исследования эффективности систем потолочного охлаждения выполнялись в индивидуальном жилом доме, построенном в Московской области.

**2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ.
СПРОЕКТИРОВАННАЯ СИСТЕМА
ПОТОЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Общая площадь дома 205 м², жилая площадь 167 м², площадь участка 1 264 м². Данный дом строился по технологиям «Passive House», поэтому форму дома выполнили по внешним размерам в форме близкой к кубу, сократив тепловые потери здания через наружные поверхности. Длина здания 12 м., ширина 11 м., высота до конька крыши – 10 м. Крыша двухскатная, площадь крыши с южной стороны 130 м². Данная площадь предназначена для установки солнечных коллекторов. На южной стороне сделана навесная веранда.

Высота потолков: подвал – 2,3 м., первый этаж и второй этаж – 3,0 м.

Утепление крыши выполнено древесным волокном Steico Zell толщиной 30 см, а также негорючим материалом URSA PureOne толщиной 15 см. Расчетный коэффициент термического сопротивления крыши составил 12 м²·°С / Вт [1]. Окна и деревянные двери выбирались на основе тендера из десяти вариантов. В результате были выбраны окна фирмы Deckeunink с утепленным профилем Eforte и двухкамерным стеклопакетом, заполненным аргоном. Коэффициент термического сопротивления стеклопакетов составил 1,67 м²·°С / Вт, а профиля – 1,05 м²·°С / Вт [2].

Система потолочного охлаждения и обогрева состоит из гипсокартона Гургос армированного фиброволокном и труб Уропор Рех-Рех диаметром 9,9 мм. Трубы встроены в панели без утеплителя. Толщина одной панели 15 мм. Размер одной панели

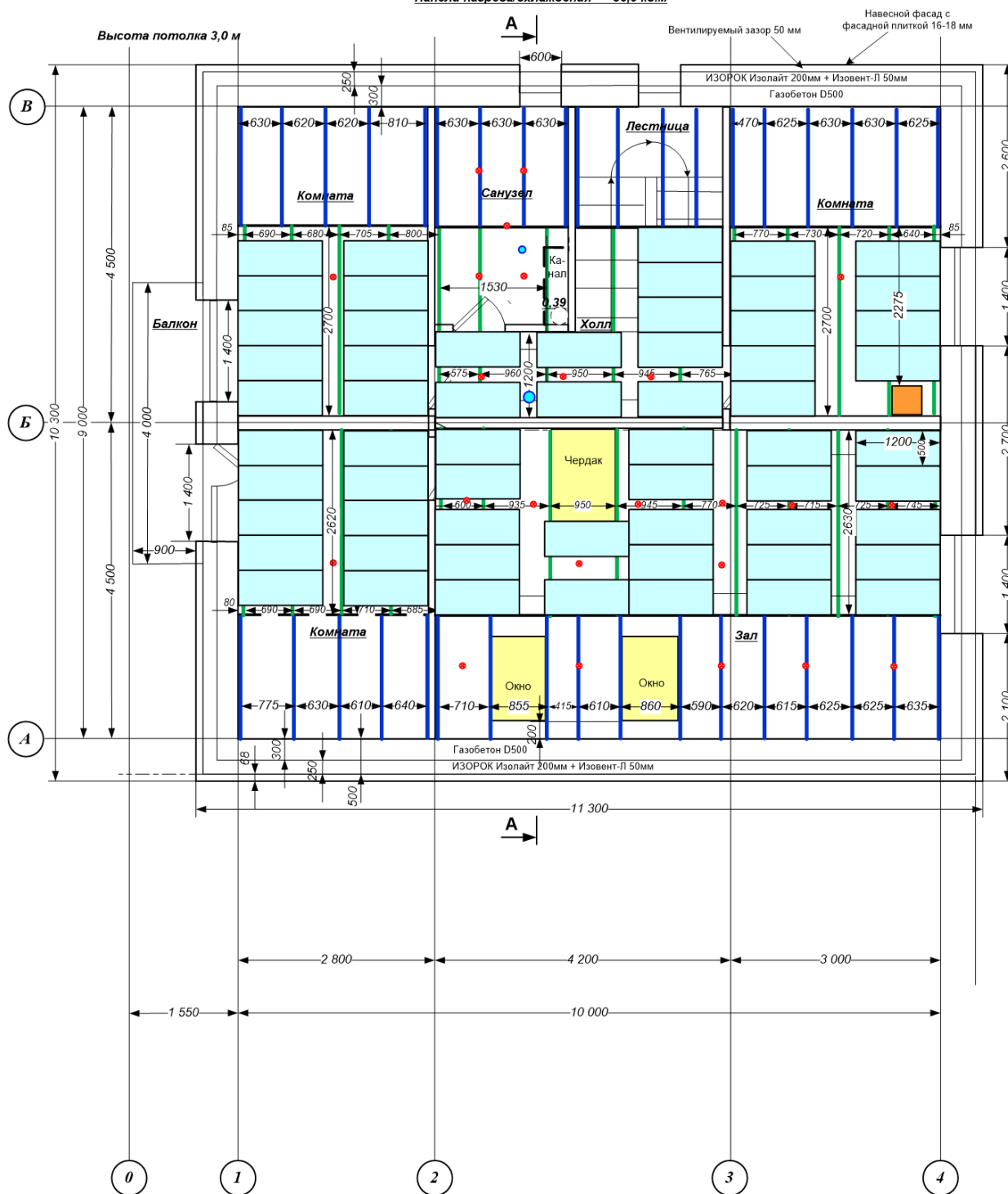
1200x500мм. Количество панелей на втором этаже – 60 шт. Таким образом суммарная площадь панелей на втором этаже дома – 36 м². На втором этаже дома три спальни, коридор с лестничной клеткой, санузел и большая гостиная. В спальнях установлено по 9 панелей, в гостиной 22 панели, над лестницей и в коридоре 9 панелей. Схема расположения панелей на втором этаже приведена на рисунке 1.

Для экспериментального исследования данных систем была выбрана одна из спален второго этажа, в которой установлено 9 охлаждающих панелей и одна приточная решетка 100x200. Расход приточного воздуха 60 м³/час. Эксперимент был выполнен в сентябре 2019 г.

План потолка 2-го этажа

Площадь потолка 2-го этажа – 88,25 кв.м, в т.ч.:
 Горизонтальный потолок – 50,10 кв.м
 Наклонный потолок – 38,15 кв.м
 Количество панелей нагрева – 60 шт.
 Панели нагрева/охлаждения – 36,0 кв.м

- Потолочные светильники
- Диафрагмы вентиляции



Площадь 2-го этажа – 80,57 кв.м

Рис. 1. Схема расположения охлаждающих панелей на втором этаже

3. РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА

Рассматриваются три поверхности (Рисунок 2): 1 – часть тела человека; 2 – охлаждающая пластина; 3 – комнатные стены.

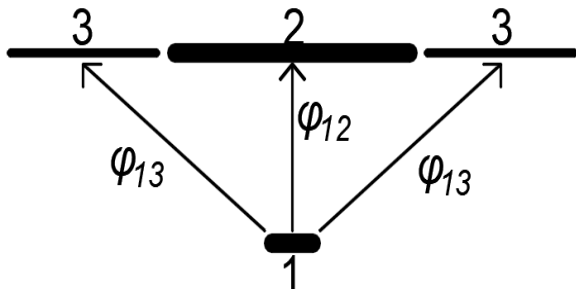


Рис.2. Расчетная схема

Чтобы определить поток тепла через излучение, необходимо сначала определить угловые коэффициенты от головы человека к охлаждающим пластинам, от пластины к голове человека и от пластины к внутренним стенам помещения (а также к окружающим предметам). Затем рассчитываются тепловые потоки от головы к пластине, от головы к потолку и определяется суммарное значение лучистого теплового потока. Конвективный тепловой поток от человека к окружающему воздуху в помещении рассчитывается по закону теплоотдачи Ньютона. Зная конвективный и лучистый тепловые потоки определяется общий тепловой поток.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Температура воды на выходе из насосной группы системы потолочного охлаждения составила $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура воды на выходе из насосной группы для охладителя воздуха – $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура приточного воздуха $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ (максимально низкое значение, которое удалось получить), температура поверхности коллектора на входе в систему распределения воды по панелям второго этажа – $17,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура поверхности коллектора на выходе из системы распределения воды по панелям второго этажа – $19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для измерения температуры воздуха по высоте помещения и внутри приточного адаптера системы вентиляции использовались беспроводные датчики температуры. Температура воздуха измерялась в разных точках помещения: в центре (на уровне пола, на расстоянии 217 см от пола и на удалении 10 см от потолка), в открытом дверном проеме (60 см , 150 см , 206 см от пола).

Эксперимент производился с $14:00$ до $17:00$. График изменения температуры в разных точках комнаты в процессе эксперимента приведен на рисунке 3.

В результате эксперимента температура внутреннего воздуха в комнате уменьшилась на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ с $23,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловизионный снимок 4 панелей приведен на рисунке 4.

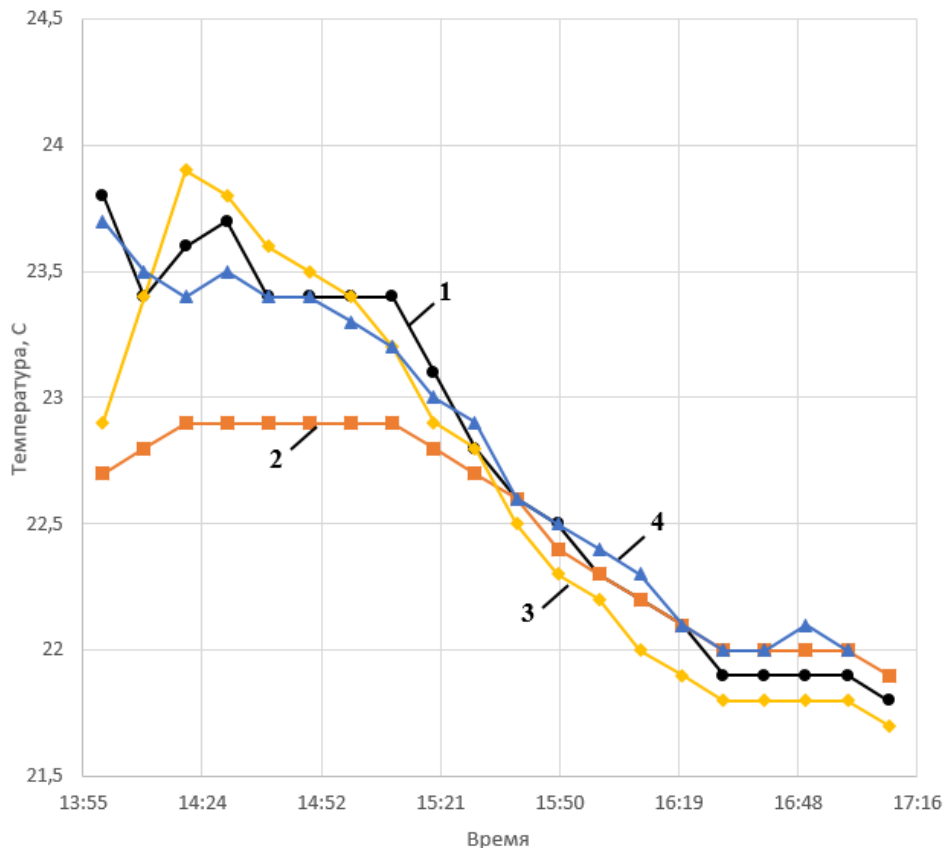


Рис.3. Изменение температуры воздуха в разных точках помещения: 1 – температура в центре комнаты (217 см от пола); 2 – температура воздуха у стены (не в зоне панелей); 3 – температура в центре комнаты (10 см до потолка); 4 – температура над входной дверью (206 см от пола)

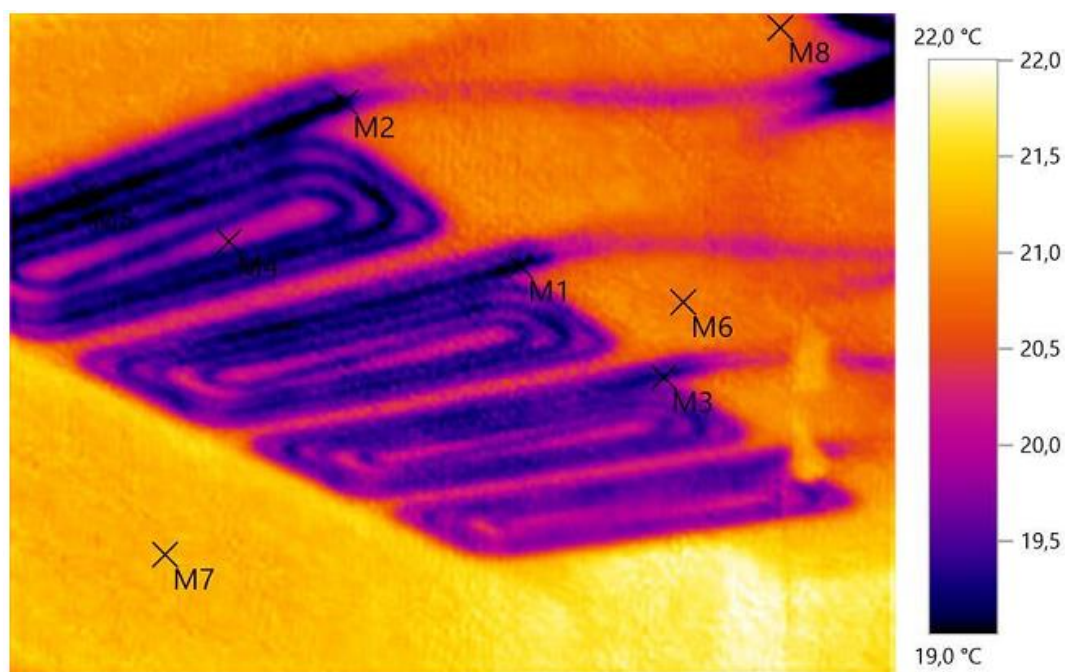


Рис.4. Тепловизионный снимок

5. ВЫВОДЫ

Экспериментальное и расчетное исследование системы потолочного охлаждения на основе гипсокартонных панелей показало эффективность данной системы для их применения в пассивных домах. Экспериментальные данные использованы в математической модели, построенной в Ansys Fluent для задания краевых условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Говорин А.В., Султангузин И.А.** Энергоэффективный жилой дом с минимальным потреблением энергии от внешних сетей (Ашукино, Московская область) / Мат. II Климатического Форума городов России «Возобновляемая энергетика: будущее рядом». — М.: ВДНХ, 2018. С. 18–21.
2. **Султангузин И.А., Кругликов Д.А., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Баргеньев А.И., Хромченков В.Г.** Применение BIM, BEM и CFD технологий для проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал С.О.К., 2019. №9. С. 36–42.

С.А. Куделина, Г.В. Шведов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

АНАЛИЗ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

АННОТАЦИЯ

В данной статье раскрывается актуальность проблемы уточнения существующих баз данных, приведённых в нормативных документах, которые используются при расчете электрических нагрузок общественных зданий. Для трех общественных зданий различного назначения проведены расчеты электрических нагрузок на вводе в здание по методу коэффициента спроса и методу удельных нагрузок. На основе полученных данных выполнен анализ результатов расчетных электрических нагрузок для общественных зданий.

1. ВВЕДЕНИЕ

Корректное определение расчетных нагрузок является основой для проектирования систем электроснабжения. Расчетные электрические нагрузки на уровне 0,38 кВ систем электроснабжения городов рассчитываются для осуществления технологического присоединения объекта к электрическим сетям, а также для выбора защитных электрических аппаратов, которые влияют на надежность сети и безопасность эксплуатации объекта.

При определении расчетных нагрузок используются данные по удельным нагрузкам, коэффициентам использования и спроса, которые были получены в результате обширного сбора статистической информации по общественным зданиям ещё в 1960-1980-х годах. С того времени состав электроприемников в общественных зданиях значительно изменился. Значительно возросло количество микропроцессорной и бытовой техники, используемой не только в домохозяйствах, но и в общественных зданиях.

Эти факторы приводят к тому, что имеющаяся база данных становится неспособной обеспечить требуемую точность расчетов и вносит погрешность в конечные результаты. Однако, уточнение собранных в прошлом веке данных сейчас практически не происходит.

Целью данной статьи является анализ результатов нагрузок на первом иерархическом уровне систем электроснабжения (шины вводных распределительных устройств зданий), полученных на основе существующих методов, изложенных в действующих нормативных документах (СП 256.1325800.2016 и РД 34.20.185-94).

2. ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Для определения расчетных электрических нагрузок на шинах ВРУ общественных зданий используются, как правило, СП 256.132800.2016 и РД 34.20.185-94.

До 2017 года действовал свод правил СП 31-110-2003. С 3 марта 2017 года действует СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа». При этом СП 31-110-2003 «Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий» не был отменен никаким нормативным актом, поэтому может использоваться только в части, не противоречащей СП 256.1325800.2016.

РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» вступил в силу с 01.01.1995, поправки и изменения к основному документу были введены от 29.06.1999. Действует по настоящее время.

В РД 34.20.185-94 расчет электрических нагрузок общественных зданий проводится по методу удельных нагрузок. Удельные расчетные электрические нагрузки представлены в таблице 2.2.1 [1] и зависят от назначения здания. В СП 256.1325800.2016 проводится более подробный расчет нагрузок, используется метод коэффициента спроса.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета электрических нагрузок из многообразия общественных зданий было выбрано три разнородных общественных здания, для которых расчетные нагрузки с наибольшей вероятностью будут отличаться.

Исходные данные для каждого из зданий – это количество и тип электроприемников, их номинальные мощности и коэффициент мощности, которые указываются в паспортах электрооборудования и, как правило, выдаются в задании на электроснабжение. Количество электроприемников в общественных зданиях достигает нескольких сотен, а порой и тысяч, в связи с этим электрооборудование объединяется в группы по назначению. Для каждой группы указывается установленная мощность электроприемников.

Таблица 1. Исходные данные о количестве и установленной мощности электроприемников в музыкальной школе

№	Наименование потребителей	Количество ЭП	Установленная мощность P_y , кВт	Коэффициент мощности $\cos\phi$
1	Рабочее освещение	2136	43,6	0,96
2	Аварийное освещение	624	13,3	0,96
3	Фасадное освещение	184	10,2	0,90
4	Электрооборудование пищеблока	св. 5	94,7	0,87
5	Мастерские (станки)	св. 5	25,4	0,67
6	Компьютеры и другие устройства	св. 5	84,9	0,80
7	Концертный зал (технология)	св. 30	79,9	0,93
8	Мультимедийные системы классов	св. 20	17,8	0,86
9	Электросушители для рук	св. 5	40,0	0,98
10	Вентиляция	9	64,9	0,83
11	Насосы	5	13,4	0,87
12	Кровельные воронки с электроподогревом	св. 30	1,0	0,75
13	Кондиционирование	117	272,0	0,84
14	Отопление и тепловые завесы	5	25,1	0,98
15	Пароувлажнители	8	234,8	0,98
16	Лифтовые установки	3	24,8	0,65
17	Тепловой пункт	6	28,7	0,93
18	Слаботочные устройства	св. 30	33,2	0,75
19	Клапаны огнезадерживающие (ОЗК)	св. 20	2,3	0,75
20	Эвакуационное освещение	180	3,8	0,96
21	Насосная установка пожаротушения	1	5,5	0,85
22	Пожарная сигнализация	св. 50	3,6	0,75
23	Противодымная вентиляция	св. 5	228,4	0,85

4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТА НАГРУЗОК МУЗЫКАЛЬНОЙ ШКОЛЫ

4.1. Расчет электрических нагрузок в соответствии с СП 256.1325800.2016

Методика расчета заключается в том, что электроприемники разбиваются на группы по характеру работы и назначению. В соответствии с таблицами в СП 256.1325800.2016 для общественных зданий определяются понижающие коэффициенты спроса для каждой группы. Далее определяется режим наибольших нагрузок, по которому рассчитывается максимальный ток рабочего режима для кабелей, питающих здание. При определении коэффициентов спроса есть противоречия, которые не решаются однозначно. Некоторые группы электроприемников подходят под несколько категорий, указанных в СП 256.1325800.2016.

Расчетная мощность группы электроприемников находится по формуле:

$$P_p = K_c \cdot P_y, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент спроса; P_y – установленная мощность группы электроприемников, кВт.

Полученные данные по коэффициентам спроса и расчетной мощности электроприемников каждой группы представлены в таблице 2.

Расчетную электрическую нагрузку питающих линий и вводов в рабочем и аварийном режимах при совместном питании силовых электроприемников и освещения следует определять по формуле:

$$P_p = K \cdot (P_{p.o} + P_{p.c} + K_1 P_{p.x.c}), \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий несовпадение расчетных максимумов нагрузок силовых электроприемников, включая холодильное оборудование и освещение, принимаемый по таблице 7.11 [2];

K_1 – коэффициент, зависящий от отношения расчетной электрической нагрузки освещения к нагрузке холодильного оборудования холодильной станции, принимаемый по примечанию 3 к таблице 7.11 [2];

$P_{p.o}$ – расчетная электрическая нагрузка освещения, кВт;

$P_{p.c}$ – расчетная электрическая нагрузка силовых электроприемников без холодильных машин систем кондиционирования воздуха, кВт;

$P_{p.x.c}$ – расчетная электрическая нагрузка холодильного оборудования систем кондиционирования воздуха, кВт.

Определяется расчетная электрическая нагрузка освещения $P_{p.o}$, нагрузка силовых электроприемников без холодильных машин $P_{p.c}$ и нагрузка холодильного оборудования $P_{p.x.c}$ на уровне ВРУ здания. Расчетная электрическая нагрузка освещения состоит из сумм нагрузок п.п. 1-3 и 20 таблицы 2. Нагрузка силовых электроприемников без холодильных машин состоит из нагрузок п.п. 4-9, 11, 12, 14, 16-18. Нагрузка холодильного оборудования систем кондиционирования воздуха состоит из нагрузок п.п. 10 и 15 для зимнего режима и п.п. 10 и 13 для летнего режима. Нагрузка на кондиционирование учитывается только в летнем режиме.

Понижающие коэффициенты K и K_1 определяются по отношению нагрузки освещения к нагрузке силовых электроприемников и к нагрузке холодильного оборудования соответственно.

Таблица 2. Данные по коэффициентам спроса и расчетным нагрузкам электроприемников в музыкальной школе

№	Наименование потребителей	Установленная мощность P_y , кВт	Коэффициент спроса	Расчетная нагрузка P_p , кВт
1	Рабочее освещение	43,6	0,81	35,3
2	Аварийное освещение	13,3	1	13,3
3	Фасадное освещение	10,2	1	10,2
4	Электрооборудование пищеблока	94,7	0,75	71,0
5	Мастерские (станки)	25,4	0,2	5,1
6	Компьютеры и другие устройства	84,9	0,4	34,0
7	Концертный зал (технология)	79,9	0,35	12,3
8	Мультимедийные системы классов	17,8	0,9	16,0
9	Электросушители для рук	40,0	0,15	6,0
10	Вентиляция	64,9	0,725	47,1
11	Насосы	13,4	0,8	10,7
12	Кровельные воронки с электроподогревом ¹	1,0	1	1,0
13	Кондиционирование	272,0	0,54	146,9
14	Отопление и тепловые завесы ¹	25,1	0,8	20,1
15	Пароувлажнители ¹	234,8	0,75	176,1
16	Лифтовые установки	24,8	0,8	19,8
17	Тепловой пункт	28,7	1	28,7
18	Слаботочные устройства (СС)	33,2	1	33,2
19	Клапаны огнезадерживающие (ОЗК) ²	2,3	1	2,3
20	Эвакуационное освещение	3,8	1	3,8
21	Насосная установка пожаротушения ²	5,5	1	5,5
22	Пожарная сигнализация ²	3,6	1	3,6
23	Противодымная вентиляция ²	228,4	1	228,4

Примечания:

- ¹ – нагрузка в летнем режиме не учитывается.
- ² – нагрузка учитывается только в режиме пожара.

Таблица 3. Расчет электрических нагрузок питающих линий для музыкальной школы

№	Режим	$P_{p.o.}$, кВт	$P_{p.c.}$, кВт	$P_{p.x.c.}$, кВт	$\frac{P_{p.o.}}{P_{p.c.}}$	$\frac{P_{p.o.}}{P_{p.x.c.}}$	K	K ₁	$P_{p\Sigma}$, кВт
1	Зимних нагрузок	62,6	257,9	223,2	0,243	0,280	0,95	0,75	463,5
2	Летних нагрузок	62,6	236,8	194,0	0,264	0,323	0,95	0,72	417,1

Далее определяется режим наибольших нагрузок для нахождения максимального расчетного тока и выбора сечения кабелей, питающих здание. Для этого рассчитываются нагрузки в зимнем и летнем режимах и выбирается наибольшая. Результаты расчетов электрической нагрузки питающих линий и вводов в режимах летних и зимних нагрузок приведены в таблице 3

За максимальную расчетную активную нагрузку питающих линий $P_{p\Sigma}$ для музыкальной школы из таблицы 3 принимается нагрузка в режиме наибольших нагрузок. Для музыкальной школы $P_{p\Sigma}$ равна 463,5 кВт.

Коэффициент мощности принимается в соответствии с таблицей 7.12 [2]. Полная мощность питающих линий на вводе в здание рассчитывается по формуле:

$$S_{p\Sigma} = \frac{P_{p\Sigma}}{\cos\varphi} = \frac{463,5}{0,95} = 487,9 \text{ кВА} \quad (3)$$

Максимальный расчетный ток на вводах в здание рассчитывается по формуле:

$$I_p = \frac{S_{p\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{487,9}{\sqrt{3} \cdot 0,380} = 741,3 \text{ А}, \quad (4)$$

где U – напряжение трехфазной сети, кВ.

4.2. Расчет электрических нагрузок в соответствии с РД 34.20.185-94

Расчет электрических нагрузок по методу удельных нагрузок проводится в соответствии с РД 34.20.185-94. По таблице 2.2.1 [1] выбирается удельная нагрузка общественного здания и умножается на единицу количественного показателя. Для учреждений образования с электрифицированными столовыми удельная нагрузка составит 0,25 кВт/учащийся. Электрическая нагрузка питающих линий и вводов определяется по формуле:

$$P_{p\Sigma} = P_{уд} \cdot n = 0,25 \cdot 150 = 37,5 \text{ кВт}, \quad (5)$$

где $P_{уд}$ – удельная нагрузка, кВт/количество учащихся; n – число учащихся.

В таблице 2.2.1 [1] приведены коэффициенты мощности, следовательно, полная нагрузка, потребляемая зданием, рассчитывается по формуле (3):

$$S_{p\Sigma} = \frac{37,5}{0,95} = 39,5 \text{ кВА}$$

Максимальный расчетный ток на вводах в здание рассчитывается по формуле (4):

$$I_p = \frac{39,5}{\sqrt{3} \cdot 0,380} = 60,0 \text{ А}$$

Таблица 4. Данные расчетов полной мощности и расчетного тока общественных зданий

№	Здание	СП 256.1325800.2016		РД 34.20.185-95		Разница расчетных мощностей, %
		Расчетная полная мощность $S_{p\Sigma}$, кВА	Расчетный ток I_p , А	Расчетная полная мощность $S_{p\Sigma}$, кВА	Расчетный ток I_p , А	
1	Музыкальная школа	487,9	741,3	39,5	60,0	1135
2	Продовольственный магазин	146,1	222,0	234,4	356,1	60,4
3	Проектная организация	212,4	322,7	130,3	198,0	63,0

5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

В таблице 4 представлены данные расчетов полной мощности и расчетного тока, полученных по методу коэффициента спроса (СП 256.1325800.2016) и методу удельных нагрузок (РД 34.20.185-94).

Оба метода являются приближенными, поэтому их применение рекомендуется для предварительного определения расчетных электрических нагрузок на стадии проектного задания. Но ввиду своей простоты методы коэффициента спроса и удельных нагрузок нашли широкое применение в проектировании систем электроснабжения городских электрических сетей.

Нельзя выявить общую тенденцию занижения или завышения полной расчетной мощности, вычисленной с помощью укрупненного метода удельных нагрузок, по сравнению с расчетами по СП 256.1325800.2016. В случае музыкальной школы расчетная нагрузка, найденная по РД 34.20.185-94, меньше на 1135%, чем нагрузка, найденная по СП 256.1325800.2016. Для проектной организации разница нагрузок составляет 63,0%. Для продовольственного магазина нагрузка, рассчитанная по РД 34.20.185-94, больше на 60,4%.

Расхождение результатов расчетных нагрузок для музыкальной школы достигает колоссальных значений. Предполагается, что удельные показатели нагрузки для школ, приведенные в РД 34.20.185-94, не учитывают нагрузку систем кондиционирования, так как в 70-80-х годах прошлого века системы кондиционирования не были так распространены в образовательных учреждениях, как в настоящее время. Возможно неучитывание и других систем, так как с тех пор значительно возросло количество интерактивных досок, компьютеров и другой микропроцессорной техники.

Для проектной организации также как и для музыкальной школы наблюдается превышение значения нагрузки, найденной по СП 256.1325800.2016, над нагрузкой, найденной укрупненным методом. Для продовольственного магазина значение нагрузки, найденной по РД 34.20.185-94, наоборот, превышает значение нагрузки по СП 256.1325800.2016.

Предполагается, что оборудование современных магазинов более энергоэффективно по сравнению с тем, которое использовалось 30-40 лет назад. Современные холодильные установки способны дольше сохранять низкую температуру внутри камеры, что делает установку более эффективной.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были определены расчетные нагрузки на шинах ВРУ для трёх разнородных общественных зданий по методу коэффициента спроса и методу удельных нагрузок. Из анализа результатов очевидно, что различия между нагрузками достигают колоссальных значений. Ожидалось, что значения, рассчитанные по укрупненным удельным нагрузкам (в соответствии с РД34.20.185-94), превысят значения, полученные по СП 256.1325800.2016. Однако, такая динамика прослеживается лишь для продовольственного магазина. Для остальных общественных зданий нагрузка, рассчитанная по укрупненным удельным показателям, наоборот, меньше, чем значения нагрузок, рассчитанных в соответствии с СП 256.1325800.2016.

Полученные результаты говорят о необходимости уточнения справочной базы данных используемых нормативных документов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

СП – свод правил
 РД – руководящий документ
 ВРУ – вводное распределительное устройство

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СП 256.1325800.2016** «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа», Москва, 2016
2. **РД 34.20.185-94** «Инструкция по проектированию городских электрических сетей», Москва, Энергоатомиздат, 1999
3. **Шведов Г.В.** Электроснабжение городов: электропотребление, расчетные нагрузки, распределительные сети: учебное пособие М.: Издательский дом МЭИ, 2012, С. 91-145

С.С. Маринина, Ю.В. Яворовский, И.А. Султангузин

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

СОЛНЕЧНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ

АННОТАЦИЯ

Целью настоящего доклада является исследование схемы системы отопления и горячего водоснабжения, работа которых обеспечивается с помощью теплового насоса, использующего в качестве источника теплоты солнечные коллекторы и льдоаккумулятор. Рассчитан баланс льдоаккумуляторной установки, построен график распределения солнечной энергии, использующейся в схеме, а также график соотношения энергии из различных источников для работы теплового насоса. Произведен расчет коэффициентов замещения системы отопления и горячего водоснабжения, а также сезонного коэффициента производительности.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире происходит увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетическом балансе стран. Для нашей страны это направление также является актуальным, поскольку способствует снижению использования органического топлива на теплоснабжение зданий, а также снижению выбросов вредных веществ в атмосферу. Таким образом, разработка систем теплоснабжения зданий с использованием ВИЭ является перспективным направлением исследований.

В настоящее время одним из перспективных направлений применения ВИЭ является использование тепловых насосов. С помощью теплового насоса можно получить теплоту для обеспечения нужд системы отопления и системы горячего водоснабжения за счет использования низкопотенциальных источников энергии.

В данной работе в качестве низкопотенциального источника теплоты для теплового насоса предлагается использовать солнечные коллекторы в совокупности с льдоаккумулятором, главная особенность которого заключается в возможности использования теплоты фазового перехода для обеспечения необходимой теплотой в случае, если солнечной инсоляции недостаточно. Льдоаккумулятор представляет собой размещенный в грунте резервуар с запасами льда и воды, а также оснащенный теплообменным аппаратом для отвода теплоты из него [6].

2. СХЕМА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

На рис. 1 представлена разработанная принципиальная схема теплоснабжения с использованием льдоаккумуляторной установки.

Принцип работы схемы следующий: часть полного солнечного излучения преобразуется коллекторами в полезную для системы теплоту. Затем эта энергия в зависимости от режима работы, т.е. в зависимости от имеющегося температурного уровня с помощью циркуляционного насоса поступает:

- 1) в бак-аккумулятор горячей воды (бак-ГВС), если температура на выходе из солнечного коллектора превышает температуру горячей воды в баке. При этом нагрев горячей воды в баке может продолжаться до тех пор, пока температура в баке-ГВС не достигнет 75 °С. В данном режиме после бака-ГВС теплоноситель поступает в льдоаккумулятор где отдает остаток теплоты и далее возвращается в солнечный коллектор. В том случае, если значение температуры, равное 75 °С превышено, то теплоноситель в обход бака-ГВС поступает сразу в льдоаккумулятор. Такая схема движения теплоносителя характерна для летнего периода в дневное время суток, когда приход солнечной энергии наблюдается в избытке;
- 2) в тепловой насос, если температура на выходе из солнечного коллектора находится в диапазоне от -10 °С до 26 °С, а температура в баке-ГВС меньше 45 °С. Такая схема движения теплоносителя в большей степени характерна для межсезонного и зимнего периода, когда существует дефицит солнечной энергии;
- 3) в льдоаккумулятор, если температура на выходе из солнечного коллектора больше температуры в льдоаккумуляторе, а потребность в горячем водоснабжении либо отсутствует, либо осуществляется за счет другого источника теплоты;
- 4) в бак-аккумулятор системы отопления, если температура на выходе из солнечного

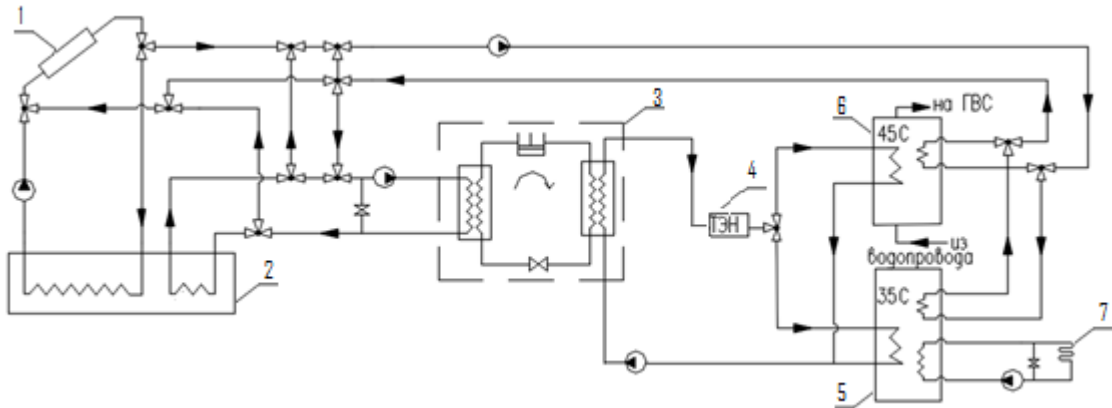


Рис. 1. Принципиальная схема льдоаккумуляторной установки: 1 – солнечные коллекторы; 2 – льдоаккумулятор; 3 – тепловой насос; 4 – термоэлектрический нагреватель; 5 – бак-аккумулятор системы отопления; 6 – бак-аккумулятор системы горячего водоснабжения; 7 – система отопления (теплый пол).

коллектора больше температуры в баке системы отопления и меньше температуры в баке-ГВС. Такая схема движения теплоносителя характерна для межсезонного периода, когда приход солнечной энергии есть, но ее недостаточно, чтобы обеспечить нагрев бака-ГВС до требуемых температур.

Наряду с вышеперечисленным, обеспечение тепловой энергией для нужд отопления и горячего водоснабжения может осуществляться посредством извлечения из льдоаккумулятора явной теплоты, с помощью которой происходит нагрев бака-ГВС или бака-системы отопления (бака-СО). Этот режим работы характерен для межсезонного периода и холодных дней в летний период. В холодный период года из льдоаккумулятора, помимо явной теплоты, может осуществляться извлечение скрытой теплоты, поступающей в испаритель теплового насоса, нагревающего бака-ГВС или бак-СО.

В очень холодных погодных условиях в течение длительного периода времени уровень льда, образующийся в льдохранилище, может достигать максимально допустимого (70% от всего объема). В этом случае теплота будет отбираться от солнечных коллекторов и поступать в испаритель высокого давления теплового насоса, который начинает работать при отрицательных температурах. Если температурные условия его работы будут ухудшаться, то тепловой насос больше не сможет удовлетворить необходимый объем производства теплоты для систем горячего водоснабжения и отопления. В этой ситуации предусмотрен дополнительный источник теплоты – электронагреватель.

3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

Для данной схемы был произведен почасовой расчет для индивидуального жилого дома. Рассматриваемый дом представляет собой одноэтажное здание площадью 102 м², расположенное в городе Москве, где средняя температура наружного воздуха за отопительный период составляет –2,2 °С, продолжительность отопительного периода 205 суток, градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) равны

5228 сут·°С [2]. Годовое потребление теплоты для ГВС и отопления составляет: 12593 кВт·ч [1]. Технические характеристики жилого дома и его инженерных систем представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики дома

Характеристика	Значение
Термическое сопротивление стен	10 м ² С/Вт
Термическое сопротивление окон	0,9 м ² С/Вт
Термическое сопротивление подполья	10 м ² С/Вт
Удельная отопительная характеристика здания	0,2 Вт/м ³ С
Система отопления	Теплый пол (35 °С)
Температурный уровень горячего водоснабжения	45 °С

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет проводился для каждого часа в году с использованием реальных данных о погодных условиях в городе Москве за 2018-2019 г. [3,4,5]. В результате расчета было определено необходимое количество солнечных коллекторов: 3 шт. Рассчитан объем льдоаккумулятора: 20 м³. Минимальная температура охлаждения бака – 0 °С. Максимальная температура нагрева льдоаккумулятора – 70 °С.

На рис. 2 представлен график распределения энергии, полученной от солнечного коллектора. Как видно из графика, в межсезонный период большая часть энергии, собираемой с коллекторов, накапливается в льдоаккумуляторе. Данный факт объясняется недостаточным для прямого отопления и горячего водоснабжения температурным уровнем, достигаемым в коллекторе. Летом, когда приход солнечной инсоляции высок, а для отопления почти не требуется теплоты, потребности в горячей воде можно легко удовлетворить с помощью непосредственного нагрева от солнечных коллекторов. Осенью приход солнечной инсоляции значительно

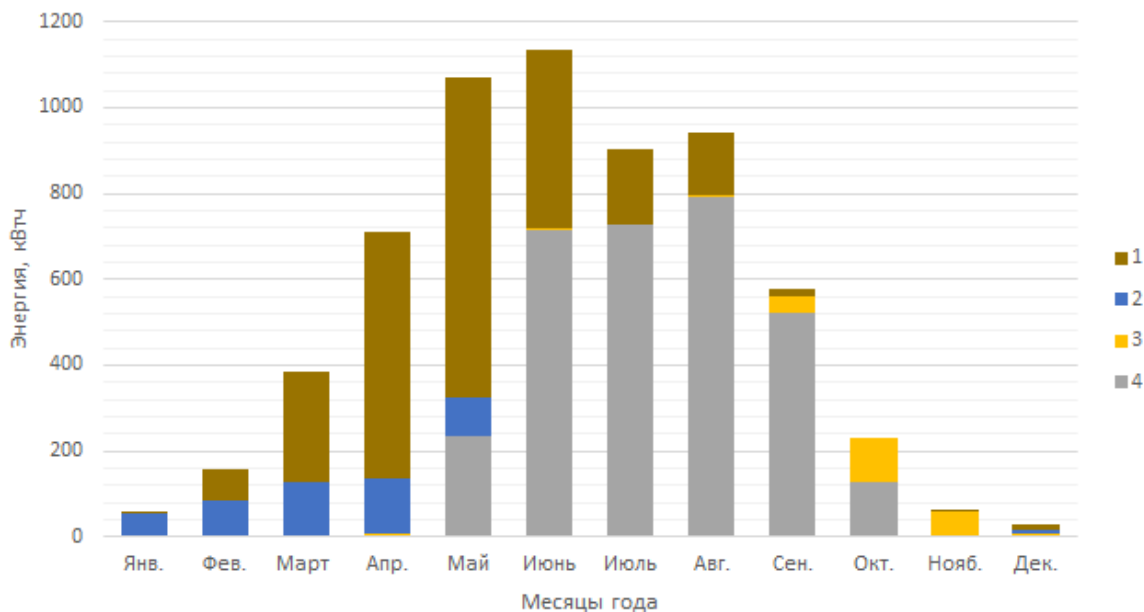


Рис. 2. График распределения солнечной энергии: 1 – количество теплоты, поступающее на непосредственный нагрев воды в баке-ГВС; 2 – количество теплоты, поступающее на непосредственный нагрев воды в баке-СО; 3 – количество теплоты, поступающее в ТН от СК; 4 – количество теплоты, поступающее в ЛА от СК.

снижается, однако часть теплового потребления обеспечивается за счет теплоты, поступающей от солнечных коллекторов. Зимой и ранней весной солнечная энергия, собранная коллекторами, поступает в тепловой насос, если температура теплоносителя на выходе из солнечных коллекторов выше температуры в льдоаккумуляторе.

Однако большую часть энергии для работы тепловой насос черпает из льдоаккумулятора, что видно из рис. 3, на котором показано соотношение энергии, взятой от солнечных коллекторов и льдоаккумулятора.

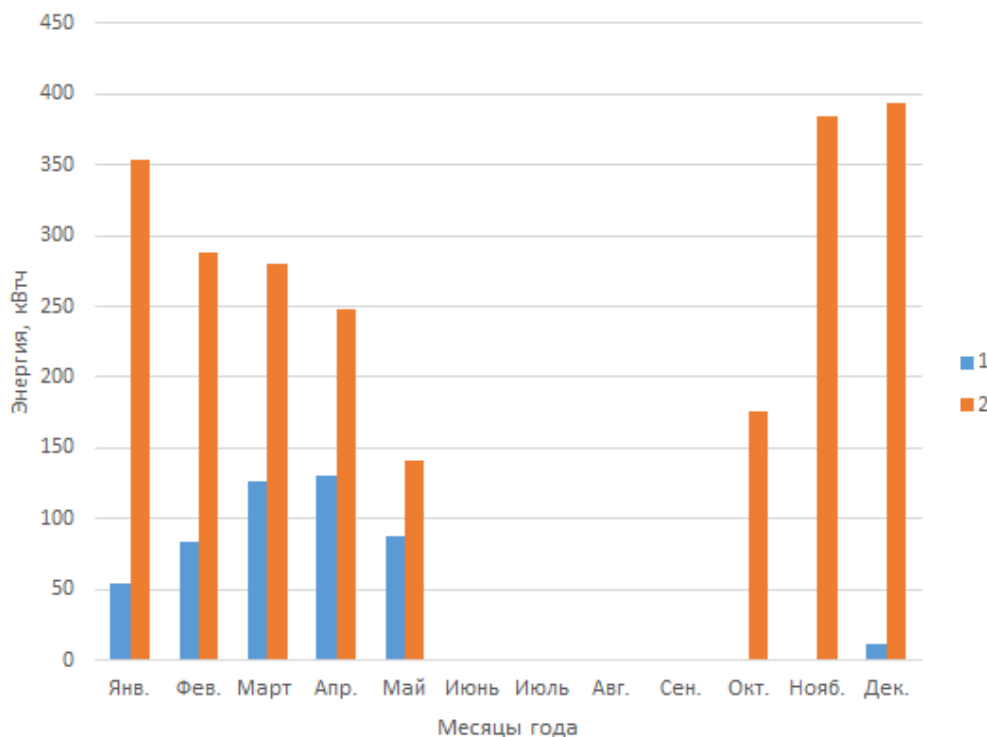


Рис. 3. График соотношения низкопотенциальной энергии для работы теплового насоса: 1 – количество теплоты от солнечных коллекторов, поступающее в тепловой насос; 2 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для работы теплового насоса.

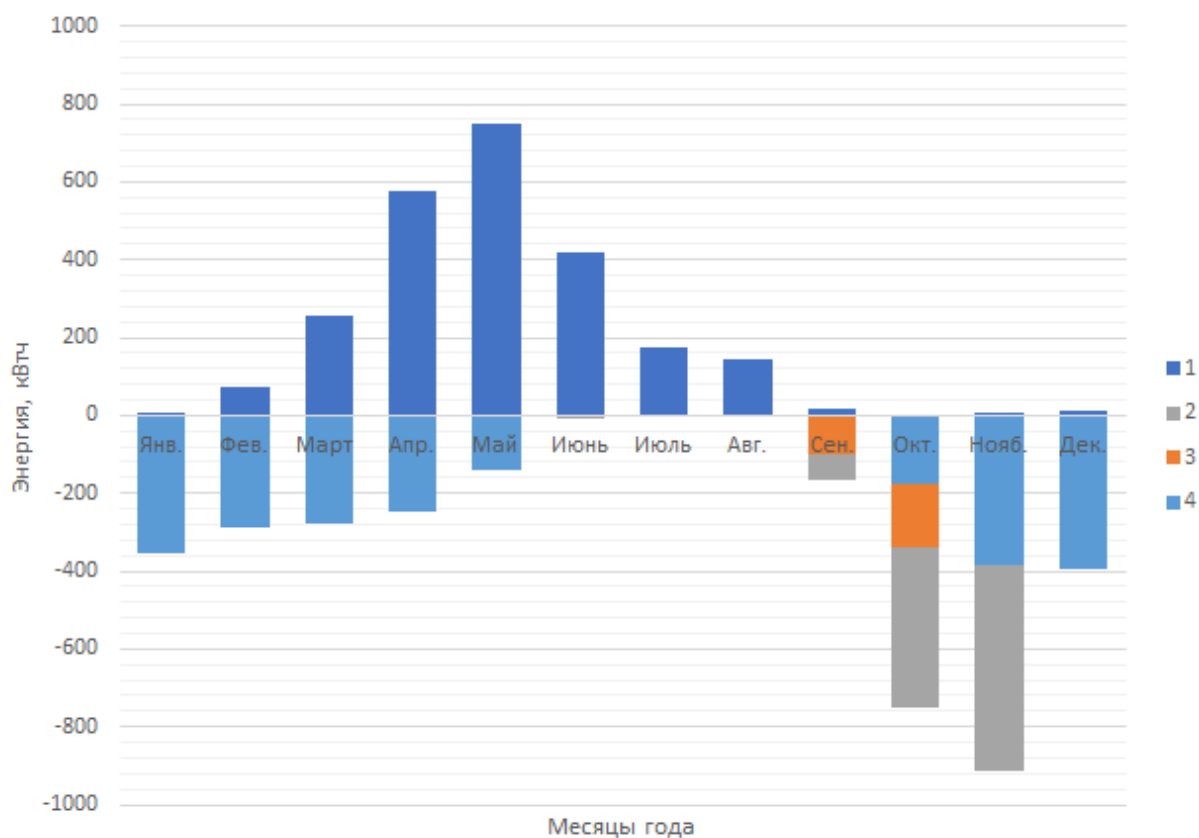


Рис. 4. Годовой тепловой баланс льдоаккумулятора: 1 – количество теплоты, накопленное в льдоаккумуляторе; 2 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для непосредственного нагрева воды в баке системы отопления; 3 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для непосредственного нагрева воды в баке горячего водоснабжения; 4 – количество теплоты, извлекаемое из льдоаккумулятора для работы теплового насоса.

На рис. 4 показан годовой тепловой баланс льдоаккумуляторной установки: зимой наблюдается небольшой прирост и большая потребность в энергии, в то время как солнечные коллекторы дают больше энергии летом. В целом, потребность в энергии за вычетом той энергии, что покрывается за счет солнечного излучения, сопоставима с солнечным приходом в летний период. За год в льдоаккумуляторе можно накопить 3433 кВт·ч с учетом теплоты фазо-

вого перехода, при этом в зимний период извлекается 2528 кВт·ч. За счет использования теплоты фазового перехода температура в льдоаккумуляторе держится на уровне 0 °С, что способствует более эффективной работе теплового насоса, коэффициент трансформации которого не опускается ниже 3, в связи с чем сокращается количество затраченной энергии на привод теплового насоса.

Таблица 2. Коэффициент замещения горячего водоснабжения и системы отопления

Месяц	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.
Коэф. замещения ГВС	0	0	0	0,006	0,434	0,997	1	1	0,841	0,242	0	0
Коэф. замещения СО	0	0	0	0,006	0	0,304	0	0,871	0,207	0,111	0,038	0,006

Сезонный коэффициент производительности представляет из себя отношение суммарной выработанной теплоты к затраченной энергии. В данном случае он составляет 4, что говорит об эффективности использования льдоаккумуляторной установки.

Энергетическая эффективность использования системы солнечного теплоснабжения в течение года определяется коэффициентами замещения горячего водоснабжения и системы отопления. Данные коэффициенты представляют из себя отношение теплоты, обеспечиваемой за счет прямого нагрева от солнечных коллекторов, к суммарной потребности в тепловой энергии соответственно.

В табл. 2 представлены рассчитанные коэффициенты замещения горячего водоснабжения и системы отопления для каждого месяца года. Из табл. 2 видно, что доля замещения солнечной энергией нагрузки горячего водоснабжения с июня по сентябрь выше 85%, а в летние месяцы – июль и август достигает 100%. Доля замещения солнечной энергией нагрузки системы отопления составляет 11–21% в первые месяцы осени. Также из табл. 2 можно заметить, что для сентября данный коэффициент составляет 87%, однако такое высокое значение связано в первую очередь с очень низким спросом тепловой энергии в данный период.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что солнечная система теплоснабжения с льдоаккумулятором способна эффективно генерировать теплоту для системы отопления и горячего водоснабжения дома: установка обеспечивает 100% снабжение дома тепловой энергией без использования термоэлектрических нагревателей или других низкоэффективных источников теплоты.

Сезонный коэффициент производительности данной системы достигает 4, что сопоставимо с теплонасосными системами со скважинными теплообменниками. Однако льдоаккумуляторная система в сравнении с ними имеет некоторые преимущества: не требуется бурение для геотермальных зондов и не требуется разрешение на использование грунтовых вод.

Коэффициент замещения системы горячего водоснабжения на протяжении 4 месяцев равен 85–100%, что указывает на эффективность использования данной установки.

Преимуществом льдоаккумуляторной установки также является то, что, когда температура в солнечных коллекторах достаточно низкая, за счет низкотемпературного хранения воды в резервуаре часть солнечной энергии все еще можно использовать для регенерации, что повышает общую эффективность солнечного коллектора с 30–50% до примерно 70%.

Таким образом, из всего вышесказанного можно заключить, что использование теплового насоса в совокупности с солнечными коллекторами и льдоаккумулятором для теплоснабжения зданий является эффективным, т.к. позволяет значительно снизить потребление электроэнергии.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ — возобновляемые источники энергии;
Бак-ГВС — бак горячего водоснабжения;
Бак-СО — бак системы отопления;
ТН — тепловой насос;
ЛА — льдоаккумулятор;
СК — солнечный коллектор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шелгинский А.Я.** Системы отопления жилых, общественных и производственных зданий: учебное пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — 116 с.
2. **СП 131.13.330-2018.** Строительная климатология и геофизика / Минстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1997. — 140 с.
3. **В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Калинин.** Солнечная энергетика. — М.: Издательский дом МЭИ, 2011. — 276 с.
4. **Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи.** Расчет систем солнечного теплоснабжения. — М.: Энергоиздат, 1982, 80с.
5. **Тлеуов А.Х.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Часть 1. Использование энергии солнечного излучения. Учебное пособие для практических занятий и курсовому проектированию. — Астана, КазАУ, 2004. — 66 с.
6. **Gschwend, Andreas and Bertsch, Stefan S.,** "Domestic Heat Pump System With Solar Thermal Collectors as Heat Source and Annual Ice Storage" (2012). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1177.

Т.А. Матухнов, О.Д. Матухнова, М.Ю. Юркина, Н.В. Хомченко

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ СОЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ГВС ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ

АННОТАЦИЯ

В работе выполнена оценка толщины отложений солей жесткости центрального теплового пункта города Москвы, проведен анализ показателей качества воды и рассчитаны интенсивность образования, толщина отложений солей жесткости и отклонение расчетной величины образовавшихся отложений от фактического измерения. В результате работы также рассчитано увеличение гидравлического сопротивления в связи с образованием отложений и увеличение затрат электроэнергии для обеспечения требуемых параметров системы ГВС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Организация оптимального водно-химического режима является одной из важнейших эксплуатационных характеристик теплоэнергетического оборудования.

Нарушение водно-химического режима приводит к уменьшению внутреннего диаметра труб вследствие образования отложений. Солевые отложения приводят к увеличению термического и гидравлического сопротивления стенки, снижению коэффициента теплопередачи, чрезмерному повышению температуры металла трубопровода. Увеличение гидравлического сопротивления приводит к повышению расхода электроэнергии на перекачивание теплоносителя. В местах наиболее интенсивного образования отложений на внутренних теплообменных поверхностях происходит перегрев металла, как следствие, на поверхностях образуются трещины и сквозные повреждения, вызванные коррозией. Образование отложений может полностью блокировать работу системы, закупоривая её и ускоряя процесс коррозии, таким образом, через непродолжительное время теплообменное оборудование становится непригодным к эксплуатации [1].

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 [2]. Оценка образования отложений на внутренней поверхности теплотехнического оборудования выполняется на основе методики прогнозирования интенсивности образования

отложений для диагностики технического состояния оборудования, обеспечивающего надежность работы с учетом определения оптимального режима функционирования.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ГВС

2.1. Описание объекта исследования

Проведено обследование центрального теплового пункта и присоединенных систем тепло- и водоснабжения, расположенного на северо-западе города Москвы.

Центральный тепловой пункт имеет независимую схему присоединения отопительной нагрузки и закрытую схему горячего водоснабжения (ГВС). Температурный график системы отопления 95/70 °С. Узел водоподогревателей ГВС состоит из двух ступеней. Первая ступень включает в себя 4 секции диаметром 219 мм Номер 12, марка 12 ОСТ 34-588-68. Площадь нагрева составляет 48 м². Вторая ступень включает 4 секции диаметром 219 мм Номер 12, марка 12 ОСТ 34-588-68. Площадь нагрева составляет 48 м².

Предметом исследования является кожухотрубный теплообменный аппарат 12 ОСТ 34-588-68 Номер 12 Ду219 второй ступени ГВС, предназначенный для подогрева холодной воды в систему горячего водоснабжения. Технические характеристики теплообменного аппарата:

- внутренний диаметр трубок 14 мм;
- длина трубок 4 м;
- число трубок в секции 64 шт.;
- количество секций 4 шт.

2.2. Основные сведения

Выделение твердой фазы из пересыщенного раствора той или иной соли происходит [2]:

- при понижении растворимости соли с ростом температуры;
- при упаривании воды, сопровождающимся повышением концентрации солей для которых раствор ближе всего к состоянию насыщения;
- при протекании в нагреваемой и испаряемой воде процессов, вызывающих диссоциацию одних

ионов и образование других, дающих труднорастворимые соли.

Из пересыщенного раствора солей сначала отлагаются на отдельных участках поверхности металла первичные зародышевые кристаллы, так как поверхность металла обладает шероховатостью, а затем укрупняются и разрастаются.

2.3 Анализ образования отложений солей жесткости

В работе выполнен анализ водно-химического режима теплового пункта с целью выявления основных проблем и причин их возникновения. Результаты анализов проб исходной водопроводной воды, проведенные в течение отопительного периода представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты анализов проб исходной воды

Показатели	22.11	19.12	25.01	15.02	21.03
pH	7,40	7,70	7,50	7,80	7,60
C _{звз} , мг/л	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00	<5,00
Жо, мг-экв/л	4,00	3,90	4,60	4,40	4,10
Ca ²⁺ , мг-экв/л	3,00	2,93	3,45	3,30	3,08
Mg ²⁺ , мг-экв/л	1,00	0,98	1,15	1,10	1,03
Що, мг-экв/л	3,34	3,07	3,09	3,24	3,06
Cl ⁻ , мг/л	20,54	22,14	21,39	21,18	20,15
SO ₄ ²⁻ , мг/л	32,46	33,18	33,03	32,78	33,05
Fe _{общ} , мг/л	0,11	0,18	0,16	0,12	0,08

В качестве исходных данных использованы следующие показатели:

- температура нагрева теплоносителя, подаваемого потребителю, равна 60 °С;
- средняя скорость воды 1,184 м/с;
- степень рециркуляции 0,3;
- водородный показатель воды 7,6;
- значение карбонатного индекса 9,954 (мг-экв/л)².

Расчет интенсивности образования отложений солей жесткости в теплотехническом оборудовании можно произвести по следующей формуле [3]:

$$m = 35,5 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot I_k, \quad (1)$$

где k_1 - коэффициент, учитывающий температуру нагрева; k_2 - коэффициент, учитывающий скорость потока нагреваемой воды; k_3 - коэффициент, учитывающий степень рециркуляции нагреваемой воды; k_4 - коэффициент, учитывающий водородный показатель нагреваемой воды; I_k - карбонатный индекс, (мг-экв/л)².

Интенсивность образования отложений солей жесткости, рассчитанная по формуле 1, составляет:

$$m = 35,5 \cdot 0,59 \cdot 0,609 \cdot 0,931 \cdot 1,073 \cdot 9,954 = 126,61 \frac{\text{мг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (2)$$

Толщина отложений на внутренней поверхности оборудования рассчитывается следующим образом:

$$\delta_{отл} = \frac{m \cdot \tau}{\rho_{отл}} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где τ - время работы оборудования, ч; $\rho_{отл}$ - плотность карбонатной накипи, г/см³.

Толщина отложений за два отопительных периода, в соответствии с формулой 3, равна:

$$\delta_{отл} = \frac{126,61 \cdot 17040}{2,37 \cdot 10^9} \cdot 10^3 = 0,91 \text{ мм}, \quad (4)$$

Внутренний диаметр в соответствии с расчетной методикой равен:

$$d_{пр} = d - 2 \cdot \delta = 14 - 2 \cdot 0,91 = 12,2 \text{ мм}, \quad (5)$$

Внутренний диаметр трубки при фактических измерениях составил $d_{изм} = 12,4 \text{ мм}$.

Отклонение измеряемой величины от расчетной составляет:

$$\delta_{экс} = \frac{d_{изм} - d_{пр}}{d_{изм}} \cdot 100\% = \frac{12,4 - 12,2}{12,4} \cdot 100\% = 1,61\% \quad (6)$$

Осмотр состояния внутренних поверхностей теплообменника показал наличие отложений (рис. 1).



Рис. 1. Deposits of hardness salts in the heater of hot water supply

Для контроля процессов образования отложений на внутренней поверхности теплотехнического оборудования целесообразно продолжать систематический контроль за качеством воды путем выполнения анализа анионного состава (хлориды, сульфаты), рН, ионов железа.

4. ВЫВОДЫ

В данной работе рассмотрен алгоритм расчета толщины отложений в теплообменных аппаратах на примере теплообменного аппарата 12 ОСТ 34-588-68 Номер 12 Ду219, используемого в качестве второй ступени подогрева для нужд горячего водоснабжения.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- показатели качества воды соответствуют нормам, указанным в [4];
- при нагревании воды преобладает способность к образованию отложений солей жесткости;
- интенсивность образования отложений на поверхностях нагрева подогревателей ГВС может достигать 126,61 мг/(м²ч);
- средняя толщина солевых отложений в теплообменнике составляет 0,91 мм;
- уменьшение внутреннего диаметра трубок теплообменника с 14 мм до 12,4 мм;
- увеличение гидравлического сопротивления в теплообменном аппарате составляет 1,2 кПа;

– увеличение затрат на прокачку теплоносителя 370,91 кВт·ч.

При сопоставлении фактических данных измерений с расчетной, погрешность составила 1,61%. Таким образом, понимание и возможность прогнозирования характеристик образования отложений обеспечат надежность и бесперебойность работы теплотехнического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлова Т.Н., Базлов Д.А., Орлов В.Ю. Химия природных и промышленных вод: учеб. пособие – Ярославль: ЯрГУ им. П. Г. Демидова, 2013. – 120 с.;
2. 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;
3. Балабан-Ирменин Ю.В., Богловский А.В., Васина Л.Г., Рубашов А.М. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка, 2004, №3 (30) С. 10-16.
4. СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения» (Утверждено Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 26 сентября 2001 года).

О.С. Мусорина, Г.В. Шведов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 КВ

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена анализу уровня и структуры потерь электроэнергии в исследуемой сети. По результатам работы определена структура потерь электроэнергии в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ для рассматриваемой электросетевой организации и предложены направления по снижению потерь электроэнергии, а также выявлен рациональный уровень загрузки рассматриваемой электрической сети.

1. ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия – это такая продукция, при перемещении которой от мест её производства до потребителей другие ресурсы не затрачиваются. Для транспортировки затрачивается часть самой электроэнергии, поэтому потери ее неизбежны. Главная задача состоит в том, чтобы определить рациональный уровень потерь. Снижение потерь электроэнергии в электрических сетях до этого уровня – одно из основных мероприятий по энергосбережению в электроэнергетике [1].

В данной работе рассматривается, как структура и параметры элементов сети влияют на структуру и уровень потерь электроэнергии.

2. ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

2.1. Структура потерь электроэнергии

Фактические (отчетные) потери электроэнергии определяются как разность электроэнергии, отпущенной в сеть и отпущенной из сети. Эта разность определяется по данным системы учета электроэнергии. Выделяют различные составляющие фактических потерь. В данной работе акцентируем внимание на нагрузочные потери и потери холостого хода.

Нагрузочные потери состоят из потерь в линиях электропередачи, в обмотках силовых трансформаторов, в токоограничивающих реакторах, трансформаторах тока и так далее. Потери в этих элементах зависят от передаваемой по ним мощности.

Потери холостого хода включают в себя потери электроэнергии в стали силовых трансформаторов, в компенсирующих устройствах, в устройствах присоединения ВЧ-связи, в системах учета, в ограничителях

перенапряжений и в вентильных разрядниках, а также в изоляции кабельных линий.

По каждому району электрических сетей (РЭС) энергосистем ежемесячно рассчитываются технические потери в сетях 0,38-6-10 кВ. Затем полученные за год значения суммируются. Полученные значения используют для расчета планируемого норматива потерь электроэнергии на следующий год.

2.2. Программный комплекс РАП-10-ст

Одним из наиболее трудоемких является расчет потерь электроэнергии в распределительных сетях 0,38 - 6 - 10 кВ, поэтому для упрощения проведения подобных расчетов было разработано множество программ, основанных на различных методах. В данной работе использовалась учебная версия программы РАП-10-ст [2], предназначенной для расчета технических потерь и их нормативных характеристик в распределительных сетях 0,38-6-10 кВ.

Программа РАП-10-ст осуществляет следующие расчеты:

рассчитывает потери электроэнергии на участках напряжением 6-20 кВ и указывает их доли от отпуска электроэнергии в сеть;

рассчитывает кратности превышения норм нагрузочных потерь и потерь холостого хода в фидерах; классифицирует потери электроэнергии по группам элементов и по структуре потерь.

Программа позволяет рассчитывать потери электроэнергии в фидерах 6-10 кВ двумя методами:

средних нагрузок, если известен отпуск электроэнергии в узлах сети или на головных участках фидеров за расчетный период;

расчетных суток, когда расчет потерь проводят за расчетные сутки месяца.

Оглавление базы данных представляется таким образом, чтобы пользователь мог быстро найти нужный фидер по принадлежности к району электрических сетей, подстанции и номинальному напряжению.

Ввод схемы в программе РАП-10-ст существенно облегчается набором справочников, которые при необходимости можно редактировать. Интерфейс программы удобен и прост.

3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

3.1. Исходные данные

В качестве исходных данных был взят фрагмент схемы электрической сети 10 кВ одной из распределительных электросетевых компаний (в объеме 6 фидеров). Пример исходной схемы одного из фидеров представлен на рисунке 1. Были заданы графики нагрузки на головных участках фидеров за расчетные сутки, отпуск электроэнергии в сеть (по головным участкам) за месяц, а также данные по коэффициенту загрузки трансформаторов в нормальном режиме.

Для расчета потерь электроэнергии по графикам нагрузки на головных участках фидеров за расчетные сутки были определены значения коэффициента формы для каждого фидера. Схемы фидеров и необходимые параметры для расчета потерь были введены в программу РАП-10-ст.

3.2. Результаты расчета потерь электроэнергии

Результаты расчета потерь электроэнергии в программе РАП-10-ст для всех рассматриваемых фидеров приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что потери холостого хода сильно превышают нагрузочные потери. Это свидетельствует о том, что нагрузка среднестатистического фидера 6–10 кВ существенно меньше рационального уровня, что приводит к существенному завышению уровня относительных потерь электроэнергии сверх оптимального за счет большого вклада потерь холостого хода при малой мощности нагрузки. Кроме того, фактические потери электроэнергии в данном случае будут существенно больше расчетного значения, поскольку с увеличением срока службы трансформаторов ухудшаются диэлектрические свойства изоляции обмоток и выводов, из-за чего фактические потери холостого хода становятся еще больше.

Очень часто электросетевая компания не имеет данных о фактическом коэффициенте загрузки трансформаторов 6–10/0,4 кВ. В этом случае для расчета потерь вводится допущение о том, что все трансформаторы загружены пропорционально. Пропорциональная нагрузка трансформаторов – это такая нагрузка, при которой энергия, отпущенная в сеть на головном участке фидера, распределяется между трансформаторами пропорционально их номинальной мощности. Оценим, к какой погрешности расчета потерь приведет задание пропорциональной загрузки трансформаторов вместо фактической. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

По результатам получено, что если нагрузка трансформаторов в пределах одного фидера сильно различается как, например, в фидере 16, то не учет фактической загрузки трансформаторов приводит к занижению расчетного уровня нагрузочных потерь. Если нагрузка трансформаторов в фидере примерно одинаковая, то различий в расчетах потерь нет. На

потери холостого хода коэффициент загрузки трансформатора в принципе не влияет.

Поскольку в рассматриваемых фидерах потери холостого хода существенно превышают нагрузочные, то становится актуальной задача: определить при какой нагрузке фидера потери электроэнергии в фидере в относительных единицах будут минимальны. Для этого в программе РАП-10-ст промоделирован расчет потерь с коэффициентами коррекции нагрузки 2,0, 4,0, 6,0, 8,0 и 10,0.

По результатам вариационных расчетов построены зависимости изменения составляющих потерь отдельно по каждому фидеру от отпуска электроэнергии. Как пример, результат для фидера 16 представлен на рисунке 2. Для остальных фидеров наблюдается примерно такая же зависимость.

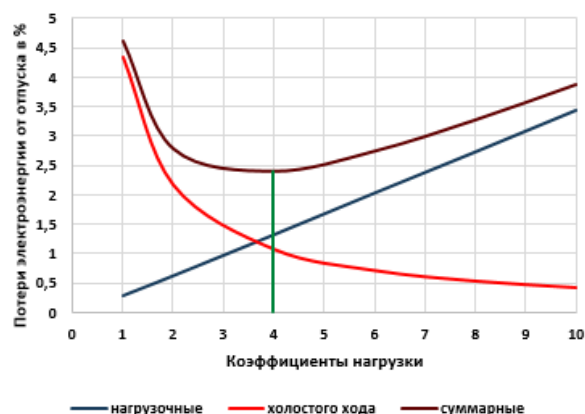


Рисунок 2 – Зависимость изменения составляющих потерь от отпуска электроэнергии для фидера 16

Из результатов видно, что при увеличении отпуски электроэнергии в сеть сначала относительные суммарные потери электроэнергии имеют тенденцию к снижению и, достигая минимума, начинают увеличиваться. При увеличении нагрузки в 3–4,5 раза во всех фидерах достигается минимум потерь. Это свидетельствует о том, что существующая нагрузка сети в 3–4,5 раза меньше рационального уровня.

Существенно от всех остальных отличается только фидер 55, в котором даже при десятикратном росте нагрузок не достигается минимум суммарных потерь. Анализ исходных данных по данному фидеру показал, что в среднем трансформаторы в данном фидере загружены на 3,18%. По этой причине даже при десятикратном росте нагрузке потери электроэнергии холостого хода продолжают превышать нагрузочные потери.

4. НАПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Из таблицы 1 следует, что основной вклад в потери электроэнергии в рассматриваемых фидерах вносят потери холостого хода. Поэтому основное направления снижения потерь в этом случае – уменьшение именно потерь холостого хода.

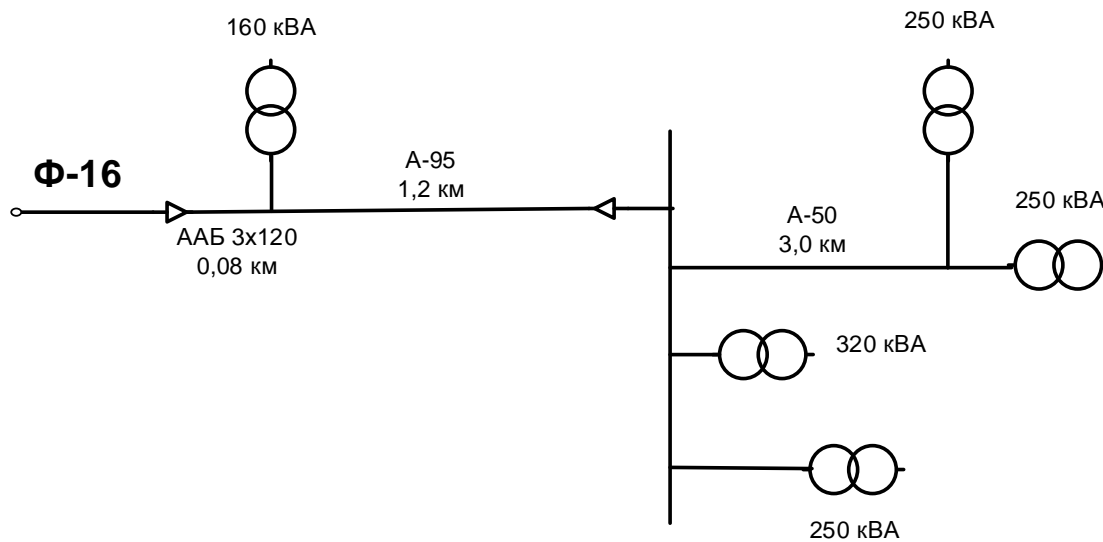


Рисунок 1 – Исходная схема фидера 16. Приведены номинальные мощности трансформаторов 10/0,4 кВ в кВА; длины линий в км.

Таблица 1. Результаты расчета потерь электроэнергии при фактической загрузке трансформаторов

Фидер	Отпуск электроэнергии, тыс. кВт·ч	Потери электроэнергии, тыс. кВт·ч					Потери электроэнергии, % от отпуска			Кратность превышения нормы по потерям холостого хода
		нагрузочные			холостого хода в трансформаторах	суммарные	нагрузочные в линиях	холостого хода в трансформаторах	суммарные	
		в линиях	в трансформаторах	суммарные						
Фидер 6	128,508	0,041	0,278	0,319	4,458	4,777	0,24	3,46	3,71	6,30
Фидер 10	78,927	0,014	0,12	0,134	2,571	2,705	0,16	3,25	3,42	6,30
Фидер 16	87,427	0,053	0,224	0,277	3,79	4,067	0,31	4,33	4,65	6,30
Фидер 22	84,711	0,024	0,165	0,189	1,888	2,077	0,22	2,22	2,45	6,30
Фидер 55	21,058	0,002	0,005	0,008	3,096	3,103	0,03	14,70	14,73	6,30
Фидер 64	73,99	0,024	0,157	0,181	3,094	3,275	0,24	4,18	4,42	6,30

Таблица 2. Результаты расчета потерь электроэнергии при пропорциональной загрузке трансформаторов

Фидер	Отпуск электроэнергии, тыс. кВт·ч	Потери электроэнергии, тыс. кВт·ч					Потери электроэнергии, % от отпуска			Кратность превышения нормы по потерям холостого хода
		нагрузочные			холостого хода в трансформаторах	суммарные	нагрузочные в линиях	холостого хода в трансформаторах	суммарные	
		в линиях	в трансформаторах	суммарные						
Фидер 6	128,508	0,041	0,278	0,319	4,458	4,777	0,24	3,46	3,71	6,30
Фидер 10	78,927	0,014	0,119	0,133	2,571	2,704	0,16	3,25	3,42	6,30
Фидер 16	87,427	0,076	0,169	0,245	3,789	4,034	0,28	4,33	4,61	6,30
Фидер 22	84,711	0,024	0,163	0,187	1,888	2,075	0,22	2,22	2,44	6,30
Фидер 55	21,058	0,002	0,004	0,006	3,096	3,101	0,02	14,70	14,72	6,30
Фидер 64	73,99	0,024	0,157	0,181	3,094	3,275	0,24	4,18	4,42	6,30

Снизить потери холостого хода можно несколькими направлениями. В первом случае можно произвести замену недолуженных трансформаторов на трансформаторы меньшей мощности. При этом необходимо экономически оценить целесообразность замены, учитывая разницу в годовых издержках на потери электроэнергии в стали и меди, разницу в стоимости сравниваемых трансформаторов, а также дополнительные затраты на монтаж и демонтаж в связи с заменой трансформаторов [3].

При использовании этого способа уменьшаются потери холостого хода, вследствие чего уменьшаются и суммарные потери. Недостатком этого способа является то, что тогда теряется резерв мощности для технического присоединения новых потребителей, что невыгодно для развития используемой сети.

Также сюда можно отнести направление замены трансформаторов на новые с магнитопроводом из аморфного сплава. У таких трансформаторов благодаря сплаву повышены электрические характеристики, и потери холостого хода уменьшаются в 2-3 раза по сравнению с трансформаторами, у которых сердечники из электротехнической стали [4, 5].

Во втором случае целесообразно отключать один из трансформаторов в режиме наименьших нагрузок, когда потери холостого хода соизмеримы с нагрузочными. Однако важно учитывать, что в числе потребителей имеются электроприемники первой категории, и поэтому при отключении одного из двух трансформаторов надо также решать вопрос обеспечения надежности электроснабжения, то есть ставить оборудование для автоматического включения второго трансформатора.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен анализ уровня и структуры потерь электроэнергии в распределительных сетях напряжением 6-10 кВ.

Было выявлено, что при отсутствии исходных данных по нагрузке трансформаторов 6-10/0,4 кВ выполнение расчета потерь электроэнергии, исходя из

условия пропорциональной загрузки трансформаторов, приводит к занижению расчетного значения потерь электроэнергии. Причем, чем больше различается фактическая загрузка трансформаторов в сети, тем больше будет степень занижения расчетного значения потерь.

Получено, что для среднестатистических фидеров 6–10 кВ характерна очень низкая загрузка, что приводит к существенному росту доли потерь холостого хода и, как следствие, к существенному превышению значения относительных потерь электроэнергии рационального уровня. Для рассматриваемых фидеров фактическая загрузка меньше рационального значения, обеспечивающего минимум потерь электроэнергии, в диапазоне 3–4,5 раза.

Описаны возможные направления по снижению потерь электроэнергии в условиях низкой загрузки фидеров сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Потери** электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение: учебное пособие для вузов / Г.В. Шведов, О.В. Сипачева, О.В. Савченко; под ред. Ю.С. Железко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 424 с.: ил.
2. <http://rap-standart.ru/rap10.html>
3. **Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р.** Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. - № 1-2.
4. **Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р.** Анализ потерь электроэнергии и разработка мероприятий по их снижению в городских распределительных электрических сетях 6-10/0,4 кВ // Энергетик – 2019 – № 1 – С. 31–34.
5. **Хавроничев С.В., Сошинов А.Г., Галушак В.С., Копейкина Т.В.** Современные тенденции применения аморфных сплавов в магнитопроводах силовых трансформаторов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. - №12-4. – С. 607-610.

Г.А. Парфенов, Г.В. Шведов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ КВАРТИРЫ

АННОТАЦИЯ

Технический прогресс приводит к изменению и расширению состава бытовых приемников электроэнергии. Происходит изменение характера и мощности электропотребления современной квартиры.

В работе представлены результаты проведенных измерений электропотребления современной трехкомнатной квартиры с электрической плитой, а также их анализ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос расчета электрических нагрузок потребления квартир и домов стоит особо остро по причине постоянного стремительного развития технологий.

Характер электропотребления квартиры претерпел большие изменения, во-первых, из-за повышения уровня информатизации квартир, а во-вторых, благодаря росту уровня благосостояния. Стоит заметить, что последнее также является причиной того, что плата за электроэнергию перестает быть важной графой в расходах современного бытового потребителя, экономия электроэнергии становится не приоритетным фактором при выборе электроприемников и графика их работы. Часть изменений повлекла за собой увеличение электропотребления отдельных приемников, а часть, наоборот, привела к появлению новых энергоемких приборов, а также увеличению времени их использования.

Тем не менее, почти во всей нормативной и научно-технической литературе приведены типовые графики электропотребления, являющиеся актуальными в 80-ые годы. За последние 40 лет не произошло обновления справочной информации. Расчеты до сих пор выполняются по уже устаревшим данным, что может привести к сильному отклонению расчетных нагрузок как в сторону завышения, так и в сторону занижения значений.

В данной работе производятся измерения нагрузки отдельных электроприемников, нагрузки освещения, а также нагрузки на вводе в квартиру.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ОТДЕЛЬНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ниже будут приведены графики потребления отдельных электропотребителей с разными режимами работы.

На рисунках 1-3 приведены графики потребления стиральной машины при времени осреднения мощности в 5 минут, в различных режимах стирки.

Из этих графиков видно, что основное электропотребление стиральной машины идет в самом начале цикла работы, когда происходит нагрев воды. В эти моменты потребление составляет порядка 1150 Вт. В режиме же стирки потребление не превышает 50/60 Вт. и является периодичным, во время отжима потребление поднимается до 75/100 Вт.

На рисунках 4-5 приведены графики потребления посудомоечной машины.

Вне зависимости от выбранного режима посудомоечная машина циклично производит нагрев воды и последующее ополаскивание посуды. Ярко выраженные пики в 2000 Вт. соответствуют этапу нагрева воды, при ополаскивании потребление не превышает 100 Вт.

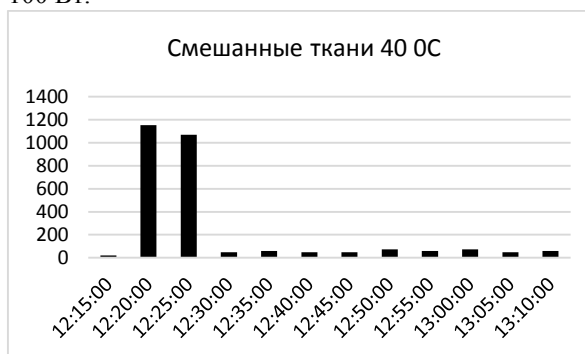


Рис. 1. График потребления стиральной машины, режим смешанных тканей, 40 °C, Вт.

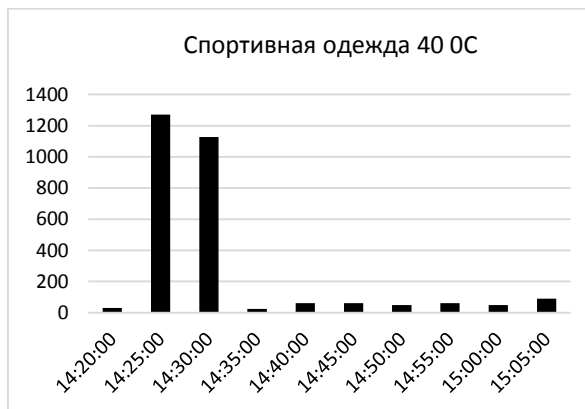


Рис. 2. График потребления стиральной машины, режим спортивной одежды, 40 °C, Вт.

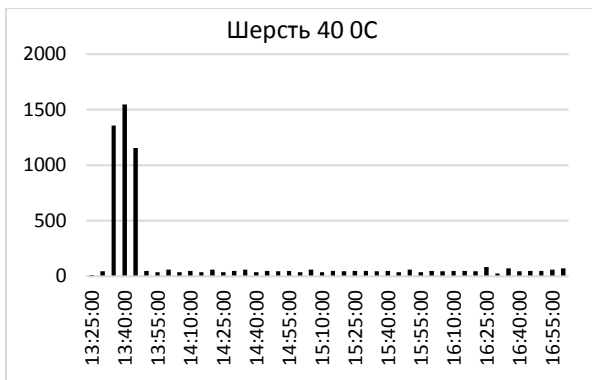


Рис. 3. График потребления стиральной машины, режим шерсти, 40 °С, Вт.



Рис. 4. График потребления посудомоечной машины, полуторачасовая программа, Вт.



Рис. 5. График потребления посудомоечной машины, двухчасовая программа, Вт.

На рисунке 6 приведен график нагрузки хлебопечки.

Основное электропотребление приходится на последнюю треть цикла работы, когда происходит нагрев и запекание теста. Первые две трети составляют перемешивание и ожидание, когда тесто взойдет, потребление составляет 60 Вт. для начала цикла и примерно 250 Вт. для запекания.

На рисунке 7-9 представлены графики нагрузки духового шкафа при разных режимах готовки.

Основные затраты мощности приходятся на начальный этап, когда духовка разогревается из холодного состояния до рабочей температуры (отсутствие ярко выраженного начального пика разогрева заметно на рисунке 22, когда духовка была включена уже разогретой). В момент старта потребляется 2500-4000 Вт., во время поддержания температуры порядка 500-1200 Вт.



Рис. 6. График потребления хлебопечки, Вт.



Рис. 7. График потребления духового шкафа, 190 °С 15 минут выпечка, Вт.



Рис. 8. График потребления духового шкафа, 220 °С 20 минут выпечка, Вт.



Рис. 9. График потребления разогретого духового шкафа, 220 °С 20 минут, после 180 °С, Вт.

На рисунках 10-11 приведены графики мгновенных значений потребления конфорок электроплиты. Первой области соответствуют максимальные режимы работы (9 делений из 9) одной конфорки. Вторая область показывает работу на средней мощности

(5 делений из 9). Видно, что при максимальном режиме большая конфорка стабильно потребляет номинальные 1,5 кВт. При снижении мощности на половину переходит в режим импульсного подогрева, в котором мощность колеблется от 200 до 600 Вт и в осреднении составляет порядка 550 Вт. Для малой конфорки значения соответственно равны 1050, 600-0 и 350 Вт. Для оставшихся конфорок показания мало отличаются от показаний большой.

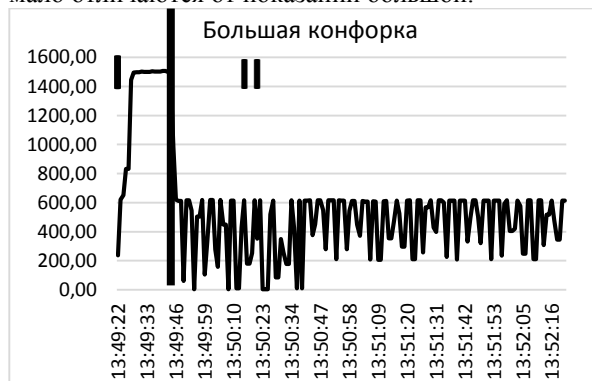


Рис. 10. График потребления большой конфорки, Вт.

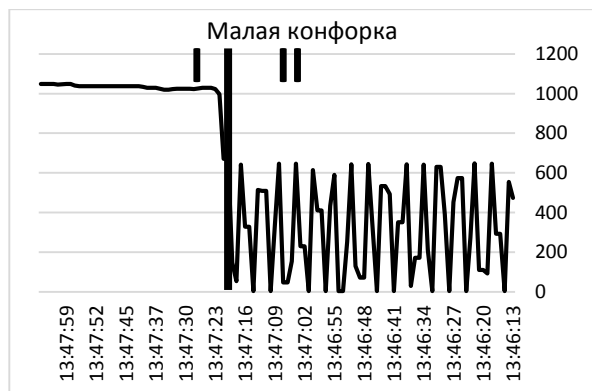


Рис. 11. График потребления малой конфорки, Вт.

В электроплите есть режим кратковременного повышения мощности. Мощность конфорок повышается на ограниченное 5 минутами время до стабильного потребления 2,3 2,1 и 1,5 кВт, соответственно, после чего происходит автоматический переход на 9 деление мощности. Заявленные мощности соответствуют проведенным замерам.

При одновременном включении всех конфорок на режим повышенной мощности или 9, происходит автоматическое снижение суммарной потребляемой мощности до 5,3 и 6,6 кВт, соответственно, что вызвано ограничением пропускной способности рекомендуемого для подключения данной варочной электроплиты кабеля сечением 4 мм², защищаемого автоматическим выключателем на 20 А.

Стоит обратить внимание, что все электроприемники, имеющие неравномерный цикл работы, потребляют номинальную мощность меньшую часть цикла работы. Стиральная машина и посудомоечная машина потребляют большую мощность только в момент нагрева воды, остальное время потребление снижается примерно в 8-12 раз. В зависимости от программы количество и продолжительность периодов нагрева может варьироваться.

Электроприемники, задействованные в приготовлении пищи, как правило, потребляют номинальную мощность только во время кипячения воды, либо

первичного разогрева посуды. В дальнейшем мощность снижается до уровня необходимого для поддержания температуры на требуемом уровне. Например, для духового шкафа мощность снижается в 2-3 раза, у конфорок электроплиты в 4-6 раз.

Таким образом, необходимо учитывать, что номинальная мощность потребляется не весь цикл работы электроприемника, не всегда итоговая мощность двух одновременно работающих мощных приемников будет равняться сумме их номинальных значений потребления (например, хлебопечка потребляет паспортное значение мощности только в конце цикла выпекания, а посудомоечная машина - только в начале, во время прогрева отсека и воды).

3. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ ОСВЕЩЕНИЯ

Произведён замер нагрузки освещения для сравнения с паспортными данными ламп и более точной оценки осветительной нагрузки. Итого суммарная мощность осветительной нагрузки составляет 381 Вт, что сходится с заявленными характеристиками.

Ниже на рисунках 12-15 представлены графики нагрузки освещения квартиры.

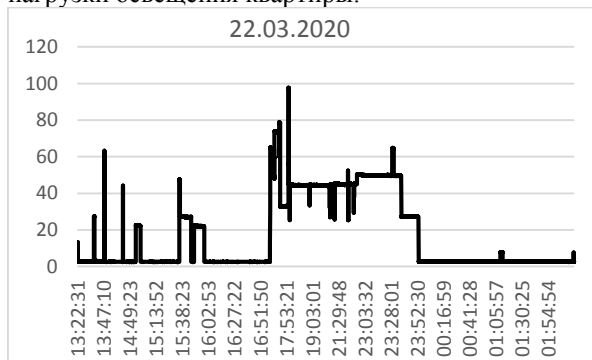


Рис. 12. График нагрузки освещения за 22.03.2020, Вт.

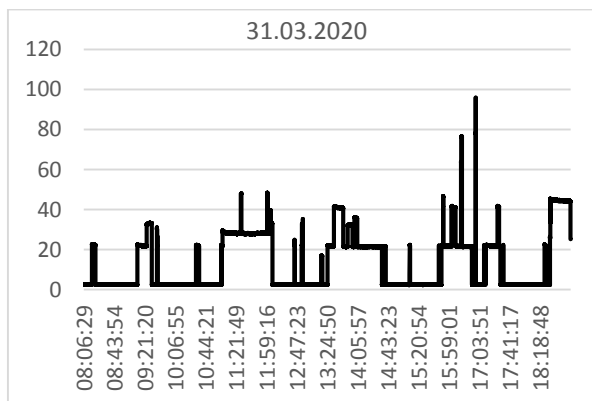


Рис. 13. График нагрузки освещения за 31.03.2020, Вт.

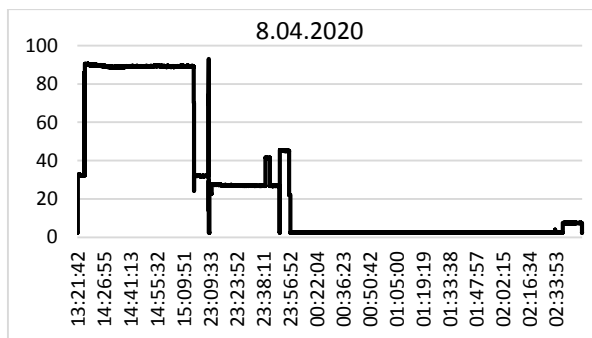


Рис. 14. График нагрузки освещения за 8.04.2020, Вт.

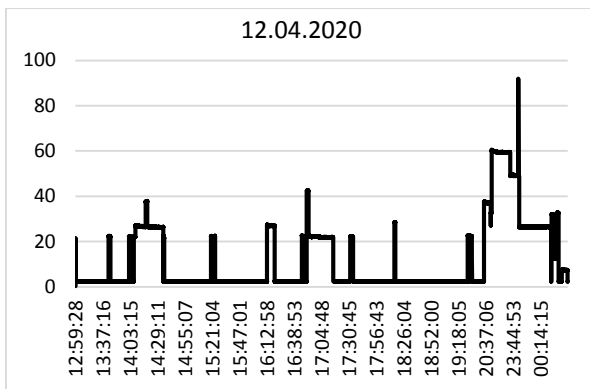


Рис. 15. График нагрузки освещения за 12.04.2020, Вт.

Из рисунков 12-15 очевидно, что основная нагрузка освещения относительно равномерно распределена по всему дню, нет выраженного увеличения потребления в вечернее время. Это связано с теневым расположением здания, а также отсутствием привычки экономить электроэнергию, освещение включается почти всегда при нахождении в комнате.

Несмотря на то, что графики построены по мгновенным значениям потребляемой мощности, они довольно равномерные, резкие и кратковременные пики потребления почти отсутствуют. Максимальное значение мощности составило 100 Вт., однако большее время потребление составляло порядка 30-50 Вт. На основании вышеуказанного можно сделать вывод о высокой энергоэффективности LED ламп, а также о том, что нагрузка освещения в современной квартире составляет малую часть от общего электропотребления, в отличие от ламп накаливания. Таким образом, использование LED ламп позволяет всегда пользоваться комфортной степенью освещенности и не тратить на это большое количество электроэнергии.

4. ИЗМЕРЕНИЕ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ КВАРТИРЫ

Проводя исследование потребления на вводе в квартиру, необходимо выбрать период осреднения показаний потребляемой мощности. Мгновенные значения сильно «засорены» бросками мощности при включении в работу мощных бытовых приборов, например компрессора холодильника, фена. Большинство мощных бытовых приборов потребляет номинальную мощность порядка 15 минут. Это время и было выбрано за стандартный период осреднения.

Далее на рисунках 16-19 приведены графики для нагрузки квартиры, с выбранным периодом осреднения, для нескольких дней. Максимальное значение потребляемой мощности за данный период времени составляет 2500 Вт.



Рис. 16. График потребления на вводе в квартиру за 09.03.20, Вт.

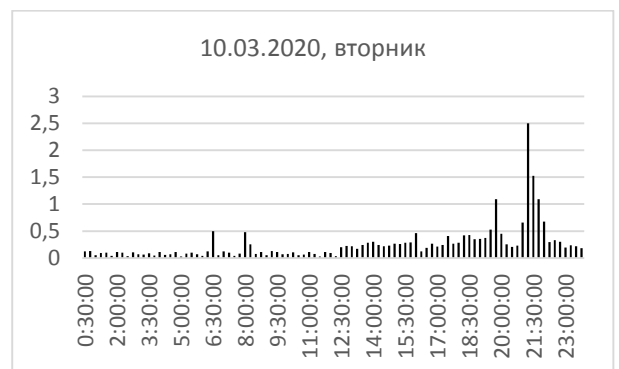


Рис. 17. График потребления на вводе в квартиру за 10.03.20, кВт.



Рис. 18. График потребления на вводе в квартиру за 13.03.20, кВт.

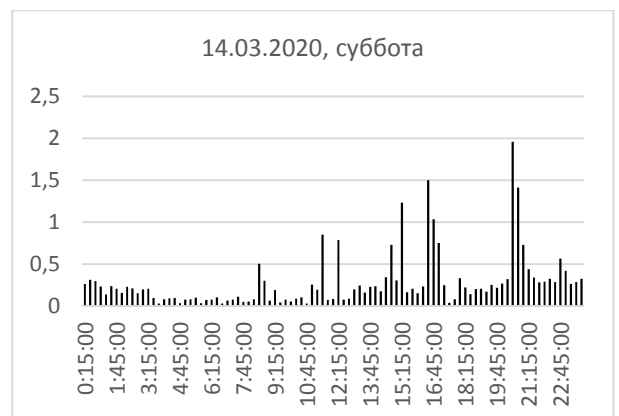


Рис. 19. График потребления на вводе в квартиру за 14.03.20, кВт.

При анализе графиков, которые соответствуют будним дням, видно, что ночной минимум наблюдается, как правило, с 02:00 до 06:00. Такое короткое время ночного провала связано с тем, что режим сна и бодрствования у жильцов отличается, последний человек отходит ко сну только к 02:00, а первый просыпается в 6:15 и начинает сборы на работу. Стоит заметить, отчетливо заметен второй утренний максимум в районе 8:30, это обусловлено сдвигом рабочего графика человека и более поздним сбором на работу. Дневной провал, как правило, равномерен и длится с 9:00 до примерно 16:00 (за исключением выходных). Вечерние максимумы, как правило, имеют неравномерный характер, присутствуют частые пики и спады потребления. Это вызвано кратковременными режимами максимального потребления электроприемников с неравномерным циклом работы. Примерно с 22:00 потребление начинает снижаться и к 02:00 достигает ночного минимума.

Средние значения потребления в будни составляют: ночной минимум – 50-100 Вт., утренние максимумы – 400-450 Вт., дневной минимум – 50-100Вт., вечерние максимумы – 1600-2000 Вт.

Таким образом, можно сделать вывод, что в будние дни потребление происходит по типизированному сценарию, лишь с небольшими отклонениями вечернего максимума по времени и пиковым значениям потребляемой мощности.

Обращая внимание на рисунок 19, который соответствует выходному дню, заметен сдвиг и слияние двух утренних максимумов. Теперь они наблюдаются одновременно примерно в 8:30-9:00. В течение дня наблюдается 2-3 пика потребления, остальное время потребление остается высоким, относительно будничных дневных провалов. Каждый пик соответствует включению какого-либо мощного бытового потребителя с неравномерным циклом работы.

Средние значения потребления в выходные составляют: ночной минимум – 50-100 Вт., утренние максимумы – 500-1000 Вт., дневной минимум как таковой отсутствует – 300-500 Вт., вечерние максимумы – 1600-2500 Вт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведения анализа отдельных электроприемников, выяснилось, что мощные приборы, имеющие неравномерный цикл работы, потребляют заявленную номинальную мощность лишь малую часть цикла, либо работают в импульсном режиме. Таким образом, можно сделать вывод о некорректности оценки суммарного электропотребления, принимая во внимание лишь номинальные мощности электроприемников и время их работы, не обращая внимания на то, какая мощность и на протяжении какого времени цикла потребляется.

Проанализировав электропотребление освещения квартиры, становится понятно, что при использовании современных энергосберегающих LED ламп нагрузка освещения снижается до средних значений порядка 50 Вт, с редкими кратковременными пиками, не превышающими 100 Вт. Также это приводит к отсутствию необходимости экономить электроэнергию, вследствие чего свет в квартире используется равномерно в течение всех суток, без ярко выраженных вечерних пиков потребляемой мощности.

Оценив общее электропотребление квартиры, можно сделать вывод, что нагрузка освещения почти не влияет на график энергопотребления, т.к. максимальное значение освещения меньше, чем почти все остальные домашние электроприборы. Включение любого из них оказывает большее влияние на суммарное электропотребление. Ночью потребляется значительное количество электроэнергии (до 200 Вт.), это связано с большим количеством современной аккумуляторной техники: смартфоны, ноутбуки, роботы пылесосы, которые ставятся на зарядку, как правило, на ночь. Также в домах стало большое количество постоянных потребителей: роутеры, свитчи, электронные домофоны, холодильники, многие приборы оставляются в спящем режиме и также потребляют электроэнергию.

Пиковые значения потребления за все время не превышают 2500 Вт, что свидетельствует о завышении выделенной застройщиком мощности на квартиру в 15 кВт, путем установки перед счетчиком автоматического выключателя с номинальным током отключения в 63 А.

Р.Р. Перепелица, К.Д.Сергеева

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЗДАНИЙ И ГОРОДОВ

АННОТАЦИЯ

Формирование эффективных энерготехнологических систем зданий и городов в новых экономических условиях требует всестороннего анализа динамики их развития, комплекса разнообразных условий их функционирования, разноплановых факторов их изменений. Необходимость применения системного подхода к анализу функционирования сложных технических комплексов сложно оспаривать. Методологически задача состоит в том, чтобы выбрать из многочисленных подходов наиболее целесообразный для достижения поставленных инженерных задач. Отсюда вытекает необходимость всестороннего анализа предметной области исследуемых систем и выбор необходимого системного инструментария, соразмерного сложности выбранных объектов. В данной статье представлен ряд элементов и технологий модернизации инфраструктуры зданий и городов, которые на практике показывают свою энергоэффективность: топливные элементы, рекуператоры, тепловые насосы, термоактивные системы зданий, предиктивное управление с использованием метеоданных – интеллектуальный инструмент управления климатизацией здания.

1. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В настоящее время в мире энергосбережение стало приоритетным направлением развития в такой глобальной отрасли, как энергетика. Проведение соответствующей политики связано с возникновением ряда проблем. Во-первых, с дефицитом основных энергоресурсов; во-вторых, с возрастающей стоимостью их добычи; в-третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися в последнее время.

Сейчас в России остро стоит вопрос о сокращении потерь энергии. Почему? И как повысить эффективность энергосбережения? Внедрение новых технологий, соответствующих элементов модернизации инфраструктуры зданий и городов дает возможность преобразовать указанные проблемы в потенциальные точки роста, в новые подходы к управлению городским развитием, эффективная интеграция элементов городской инфраструктуры и привлечение квалифицированных кадров позволяют модернизировать отрасли энергетического хозяйства.

На данный момент возрастает интерес к проблеме высокоэффективных способов преобразования энергии. Суть этой проблемы заключается в преобразовании одного вида энергии в другой при полном исключении из процесса механической энергии, то есть преобразование без промежуточных стадий.

К таким способам можно отнести превращение тепловой энергии в электрическую, основанное на термоэлектрическом эффекте Зеебека или прямое получение холода из электроэнергии при помощи обратного предыдущему эффекта Пельтье, прямое получение электрической энергии из световой в фотоэлементах и непосредственное преобразование химической энергии топлива в электрическую топливном элементе.

Из всех вышеперечисленных способов наибольшим успехом сейчас активно пользуется топливный элемент. Это вызвано тем, что для его разработки необходимы относительно более скромные усилия, чем, например, для расщепления или синтеза ядерного горючего. К тому же КПД топливного элемента гораздо более высок, что позволяет значительно сэкономить запасы обычных видов топлив, таких как уголь, природный газ, нефть. Топливный элемент - это огромные перспективы для развития электротранспорта, не создающего шума и запаха при своем движении. Также, говоря о достоинствах топливного элемента, стоит отметить отсутствие радиоактивных продуктов реакции, возможность аккумуляции избыточной энергии с последующим использованием ее при пиковых нагрузках и возможности применения в военной технике.

На примере одного из топлив к топливному элементу рассмотрим водород. Успешные работы в сфере водородных технологий показали, что его использование приводит к абсолютно новым показателям в работе установок и систем, а выполненные исследования показали, что, несмотря на то, что водород является вторичным энергоносителем, его применение экономически оправдано и эффективно в большинстве случаев.

Такой увеличенный интерес к водороду как к горючему и энергоносителю можно обосновать несколькими его особенностями:

- во-первых, запасы водорода во всем мире практически не ограничены;
- во-вторых, водород – абсолютно универсальный энергоресурс. Именно его можно использовать в

качестве горючего для производства электричества в рабочих циклах различного типа, а также в качестве энергоносителя для транспортировки в газообразном, жидком и связанном состоянии;

- в-третьих, как уже было сказано выше, при помощи водорода возможна аккумуляция энергии;
- в-четвертых, среди органических видов топлива водород отличается наибольшей теплотворной способностью на единицу массы и наименьшим отрицательным воздействием на окружающую среду, что очень актуально в наше время.

Запасы водорода не ограничены, но, естественно, в природе он не встречается в чистом виде. Получение водорода происходит путем извлечения его или из углеводорода или из воды. Важным фактом является то, что энергосодержание 1 г. водорода эквивалентно энергосодержанию около 3 г. бензина. При использовании водорода в топливных элементах из-за его высокого КПД эффективность водорода как топлива оказывается выше примерно в 4–10 раз по сравнению с двигателями внутреннего сгорания.

Примеров внедрения топливных элементов в инфраструктуру города на сегодняшний день немало.



Рис. 1. Отель «Nagoya Sakae Washington Hotel Plaza» (г. Нагоя, Япония).

Отель «Nagoya Sakae Washington Hotel Plaza» построен в Нагое, Япония. Он рассчитан на 308 номеров. В этом отеле действует комбинированная система производства тепловой и электрической энергии на основе топливного элемента. Использован топливный элемент «FP-100» производства «Fuji Electric» номинальной мощностью 100 кВт.



Рис. 2. Топливный элемент «FP-100» мощностью 100 кВт производства «Fuji Electric»

С марта 1999 года элемент находится в непрерывной работе и показывает высокую эффективность и надежность, обеспечив при этом снижение потребления энергоресурсов на 14 %. К примеру, сжигание природного газа, необходимого для получения такого же количества энергии, увеличило бы выбросы CO_2 на 17 %. Общий КПД установки превышает 70 %.

В данной модели топливного элемента вырабатывается два вида тепловой энергии: высокотемпературная в виде горячей воды с температурой 90 °С и низкотемпературная в виде горячей воды с температурой 50 °С. Низкотемпературная вода, вырабатываемая топливным элементом, используется для предварительного подогрева воды, подаваемой в водонагреватель, а высокотемпературная вода используется в качестве источника тепловой энергии для отопления, кондиционирования воздуха и горячего водоснабжения.

В результате конструктивных доработок и оптимизации в образце топливного элемента по сравнению с прототипом число теплообменников было уменьшено в два раза. Для уменьшения эксплуатационных затрат была оптимизирована система водоочистки на основе ионообменных смол.

По своим габаритам установка помещается внутри здания, а масса позволяет осуществлять транспортировку на грузовой платформе грузоподъемностью 15 тонн.

Топливный элемент подключен к газовой магистрали, а также городской электросети через защитные устройства. Все это позволяет во время низкой номинальной нагрузки направлять избыточную электроэнергию в городскую электросеть, т. е. в это время гостиница является не потребителем, а производителем электроэнергии. Такая схема позволяет использовать топливный элемент еще более эффективно.

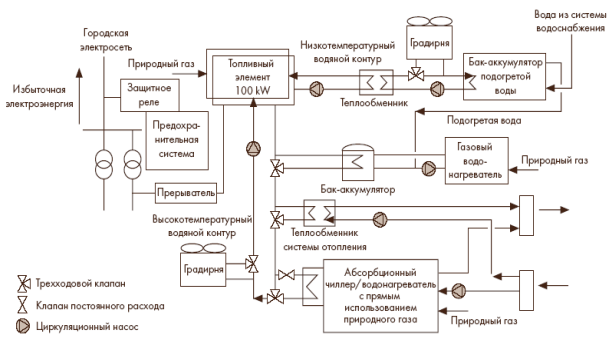


Рис. 3. Схема системы тепло- и электроснабжения здания отеля с топливным элементом «FP-100».

Рассматривая данный пример, можно отметить, что использование топливного элемента снизило затраты на тепло- и электроснабжение примерно на 40%.

2. РЕКУПЕРАТОРЫ

Рекуперация тепла в приточно-вытяжной вентиляции – явление не новое, но в нашей стране пока малораспространенное. С технической точки зрения рекуперация является самым обычным процессом теплообмена. Само слово «рекуперация» имеет латинское происхождение и означает «возвращение затраченного».

Следующим элементом модернизации инфраструктуры зданий представлен энтальпийный рекуператор. Он используется для утилизации тепла и влаги от отработанного воздуха приточному. С переносом влаги также переносится часть неявного тепла из вытяжного воздуха приточному, тем самым увеличивается энтальпийный КПД рекуператора. Рабочая область выполнена из полимерной мембраны, которая пропускает молекулы воды из вытяжного воздуха и передает приточному. Смешения вытяжного и приточного воздуха в рекуператоре не происходит, так как влага пропускается через мембрану посредством диффузии. КПД трехступенчатых рекуператоров по теплу 80-85%, а по влаге 40-50%.

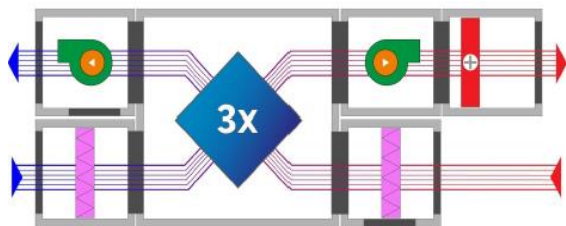


Рис. 4. Схема приточно-вытяжной установки с трехступенчатой рекуперацией тепла и влаги.

Данное оборудование было применено для решения ряда проблем на следующем объекте г. Москвы.

Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации – некоммерческая организация, осуществляющая информационно-аналитическое и экспертно-аналитическое обеспечение деятельности Правительства Российской Федерации и выполняющая научные исследования.

Компанией «TURKOV» (российским производителем климатической техники) была изготовлена

приточно-вытяжная установка с трехступенчатой рекуперацией тела и влаги, производительностью 14 000 м³/час для указанного объекта. Установка спроектирована как система воздушного отопления с подмесом приточного воздуха. Данное решение позволило не только вентилировать актовывй зал, но и отапливать его. КПД возврата тепла от вытяжного воздуха к приточному в трехступенчатых энтальпийных рекуператорах TURKOV составляет 80-85%.

Приточно-вытяжная установка Zenit 14 000 EL/EL HECO SW состоит из трех энтальпийных рекуператоров, двух вентиляторов EBM-PAPST, приточного и вытяжного фильтра (класса F5), водяного нагревателя со смесительным узлом, камеры смешения и необходимой автоматики.

Схема работы представлена следующим образом:

Канальный датчик температуры вытяжного воздуха измеряет температуру внутреннего воздуха в помещении, если данная температура ниже уставки по температуре внутреннего воздуха, то установка переходит в режим рециркуляции, т.е работы на внутреннем воздухе. При этом подача свежего воздуха не прекращается. Происходит смешение приточного очищенного и нагретого в рекуператоре воздуха с рециркуляционным воздухом. Объединение системы вентиляции с системой воздушного отопления позволяет отказаться от классической системы отопления, которая работала бы непрерывно в течение отопительного сезона.

3. ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

Тепловые насосы входят в «Перечень объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности» (утв. постановлением Правительства РФ от 17 июня 2015 г. № 6).

Кроме того, «создание комплекса технологического оборудования и разработка типовых технических решений по использованию тепловых насосов в системах теплоснабжения в крупных городах и городских образованиях» выделены в качестве одного из приоритетных направлений научно-технического прогресса в энергетическом секторе по направлению «Теплоснабжение» в Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Существуют следующие варианты применения ТНУ:

- дополнительное подключение к теплофикационным системам новых потребителей тепла;
- подключение к теплофикационным системам потребителей холода;
- совершенствование теплоэнергетических установок теплофикационных систем.

Одним из наиболее эффективных схемных решений, обеспечивающим одновременное решение ряда проблемных вопросов применения ТНУ, является использование кольцевых систем.

К таким «проблемным» вопросам относятся:

- Затраты на подвод или отвод из цикла ТНУ низкопотенциального тепла (например, создание геотермального контура);

- Необходимость обеспечения переменных нагрузок – максимальная нагрузка отопления на 50-100 % выше среднесезонной, а максимальная нагрузка ГВС – в 2-5 раз выше среднесуточной;
- Несовпадение графика требуемых нагрузок и возможностей подвода или отвода из цикла ТНУ – для систем кондиционирования требуется холод в дневные солнечные часы, когда возможности наружных блоков кондиционеров минимальны.

Наглядным примером решения данных вопросов и применения кольцевых систем является здание «Ирис Конгресс отеля» в Москве.

В каждом из помещений, где предусматривается кондиционирование воздуха, или рядом с ним, устанавливается тепловой насос, мощность которого подбирается в соответствии с параметрами помещения, его назначением, характеристиками необходимой приточно-вытяжной вентиляции, возможным количеством присутствующих людей, установленным в нем оборудованием и другими факторами. Все тепловые насосы реверсивные, т.е. предназначены и для охлаждения, и для нагрева воздуха. Все они связаны общим водяным контуром – трубами, в которых циркулирует вода. Вода является одновременно источником и приемником теплоты для всех тепловых насосов. Температура в контуре может изменяться в пределах от 18 до 32 °С.

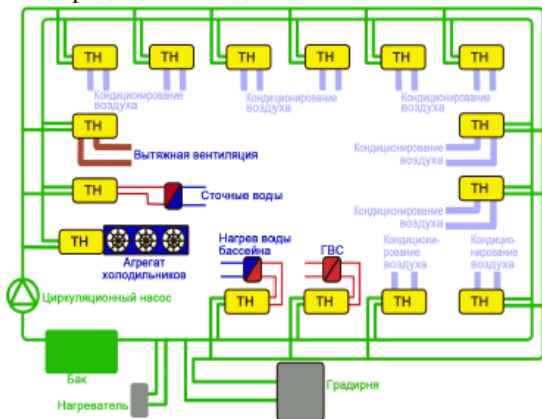


Рис. 5. Схема ТНУ в составе кольцевой системы.

Развитие ТНУ для России уже сегодня имеет ряд преимуществ самого разного плана: экономия топлива и выбросов в атмосферу, сокращение издержек на теплохладоснабжение, утилизация тепловых отходов и стоков.

4. ТЕРМОАКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ

В современных общественных зданиях величина внутренних тепловыделений достигает больших значений, и даже в условиях нашей страны в отопительный период может превышать трансмиссионные тепловые потери. Традиционные системы кондиционирования отличаются высоким энергопотреблением и капитальными затратами, занимают значительную площадь для размещения оборудования, требуют больших пространств для прокладки воздуховодов и тщательной проработки схем воздухораспределения. В связи с этим большой интерес вызывают системы,

реализующие новые подходы к климатизации помещений, такие как термоактивные системы (Thermo Active Building Systems, «TABS»), позволяющие как охлаждать, так и обогревать помещение за счет охлаждения или нагрева массивных бетонных конструкций самого здания.

Термоактивная система зданий («TABS») – это система водяного панельно-лучистого отопления и охлаждения, в которой трубы замоноличены в массивные бетонные конструкции здания.

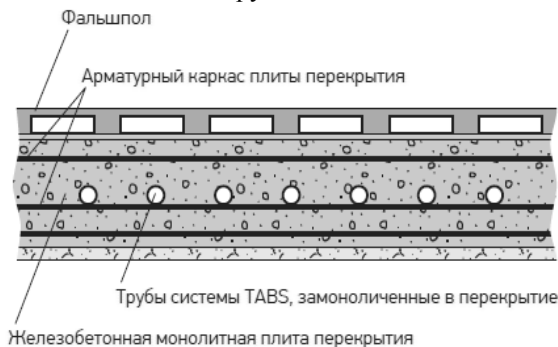


Рис. 6. Пример конструкции термоактивной системы «TABS».

Основные преимущества систем «TABS»:

- Потребность в охлаждении распределяется на более длительный период в дневное время и частично сдвигается с дневного времени на ночное. Это позволяет уменьшить пиковые нагрузки и использовать установки кондиционирования воздуха меньшей мощности.
- Отказ от подвесных потолков позволяет уменьшить высоту здания, обеспечивая существенную экономию строительных материалов.
- Возможность использования систем отопления и охлаждения с температурами, близкими к комнатной. Это повышает энергоэффективность тепловых насосов, конденсационных котлов, солнечных коллекторов, грунтовых теплообменников.
- Для охлаждения можно использовать ночное проветривание.
- Низкая стоимость монтажа, эксплуатации и технического обслуживания.

Термоактивные системы здания используют высокую тепловую инерцию бетонных плит для сглаживания пиковых нагрузок, то есть для снижения пиковой холодильной мощности, что позволяет охлаждать конструкции здания в периоды отсутствия пользователей (например, в офисах – в ночное время).

Это позволяет снизить расходы на электроэнергию, поскольку в ночное время действуют, как правило, более низкие тарифы. Одновременно возможно уменьшение размеров и мощности компонентов системы отопления или охлаждения. Поскольку при режиме охлаждения в системе используется вода с температурой, близкой к комнатной, КПД охладителей и тепловых насосов повышается, а энергопотребление уменьшается.

В летний период в дневное время, когда температура приточного воздуха ниже, чем вытяжного, теплота частично отбирается из используемых помещений вентиляционной системой, а большая часть теплоты аккумулируется в бетонных плитах перекрытия. Затем, в ночное время, интенсивность вентиляционного воздухообмена понижается, а холодная вода, циркулирующая в замоноличенных в плитах перекрытия трубах, ассимилирует аккумулированную теплоту. Термоактивную систему можно использовать вместе с естественной или механической дневной или ночной вентиляцией, с осушением или без, в зависимости от показателей наружного климата и величины внутренних влаговыделений.

«TABS» применяются преимущественно в многоэтажных зданиях, таких как офисные здания, музеи, больницы и т. д. Один из примеров использования приведен ниже. Четырехэтажный дом искусств австрийского города Брегенц – Kunsthaus Bregenz, который оборудован двойным вентиляруемым фасадом с внешней открытой стеклянной стеной.

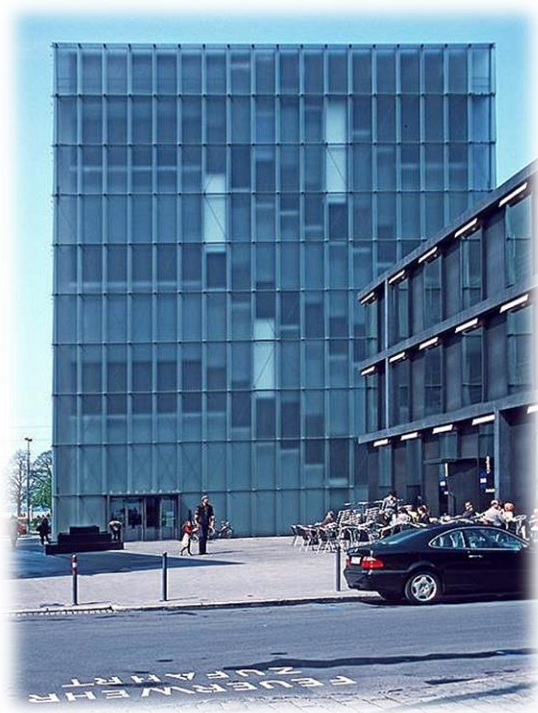


Рис. 7. Kunsthaus Bregenz – дом искусств города Брегенц (Австрия).

Основной целью системы климатизации является поддержание заданного уровня относительной влажности, а также предотвращение шума и образования пыли.

В результате было принято решение использовать в здании охлаждающую способность внутренних бетонных конструкций. Смещение пика нагрузки по охлаждению на ночное время не являлось главной целью данного проекта. Наоборот, поскольку охлаждающий потенциал грунтовых вод доступен всегда, и смещение охлаждения на ночное время вызовет достаточно большую амплитуду колебания температур, охлаждение работает на протяжении всего дня.

Хладоноситель системы охлаждения – это водяной контур, встроенный в 24 сваи глубиной 18 м, расположенные в грунте с высоким содержанием грунтовых вод. Во все наружные стены здания замоноличены пластиковые трубы. Стены оснащены наружной теплоизоляцией и отличаются очень высокими показателями теплозащиты.

Расход приточного воздуха составляет 750 м³/ч. Воздух подается в помещение при постоянной температуре и влажности через щелевые приточные устройства в полу по принципу вытесняющей вентиляции.

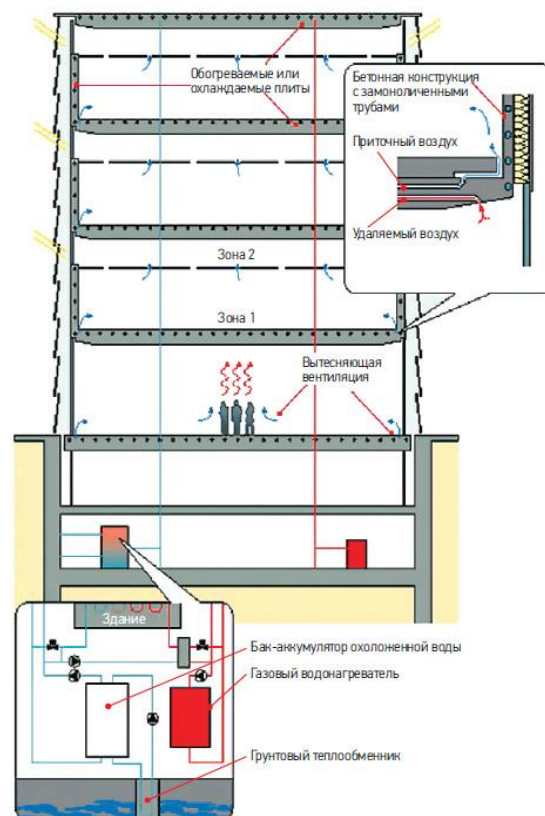


Рис. 8. Системы ОВК с термоактивными системами в стенах и бетонных плитах перекрытия для обогрева и охлаждения.

Наряду с этим достигается повышенный комфорт для находящихся в здании людей, благодаря лучистой составляющей (как и в панельно-лучистых системах отопления или охлаждения). Однако такие системы инерционны, т.е. они не позволяют быстро реагировать на изменение температуры наружного воздуха или интенсивности солнечной радиации. При этом быстрый нагрев и охлаждение невозможны. По этой причине рекомендуется использовать термоактивные элементы только для покрытия базовой нагрузки, которая существует весь день или которую можно заранее рассчитать.

Для решения такого ряда проблем швейцарской фирмой Sauter Building Control International Ltd. предложена следующая технология модернизации инфраструктуры здания Messeturm, основанная на предиктивном (то есть прогнозирующем, предсказывающем) управлении с использованием метеоданных.

В здании Messeturm размещена гостиница на 230 номеров, сервисный центр выставочной компании и большое количество офисных помещений общей площадью 9 тыс. м².

Здание привлекает внимание своим остеклённым фасадом, площадью 14 тыс. м², который отличается высокими показателями теплоизоляции. Это позволяет установить новые стандарты теплозащиты, несмотря на то, что доля остекления превышает 95 % от общей площади фасада.



Рис. 9. Фасад башни Messeturm (Базель, Швейцария).

Как уже отмечалось, инертность термоактивных элементов не позволяет быстро реагировать на изменение потребностей в теплоте или холоде. Температура внутреннего воздуха определяется в основном источником теплоты внутри помещения и внешними теплопоступлениями (солнечная радиация). Благодаря малому перепаду между температурой поверхности строительных элементов (бетонного потолка) и температурой внутреннего воздуха в помещении получается весьма эффективное саморегулирование. Обычно температура поверхности термически активного потолка колеблется в интервале от 21 до 25 °С. Если температура внутреннего воздуха выше значения температуры поверхности потолка, то потолок работает как поверхностный охладитель, если ниже – как нагреватель.

Например, в утренние часы температура воздуха в офисе 18 °С, тогда потолок нагревает помещение, отдавая тепло. В дневные часы температура в помещении повышается в результате внутренних теплопоступлений (тепло от сотрудников, работающие компьютеры, осветительные лампы и т.д.). Как

только температура внутреннего воздуха достигает 21 °С, потолок переключается на режим охлаждения. Таким образом, происходит саморегулирование теплопередачи между бетонным потолком и воздухом в помещении. Благодаря данному эффекту саморегулирования, происходит кратковременное регулирование мощности внутри дневного цикла.

В нерабочее время (ночные часы) теплотехнически инерционные бетонные потолки «загружаются» теплотой или холодом. При этом «загрузка» происходит в зависимости от средней температуры наружного воздуха, температуры внутреннего воздуха или разности температур подаваемого или обратного теплоносителя. По этой причине в системе отсутствовало фактическое регулирование по температуре.

Поэтому «TABs» требовали специального инструмента по регулированию температуры теплоносителя.

Этим «инструментом» является BACnet- контроллер modulob с программным блок-погодным модулем.

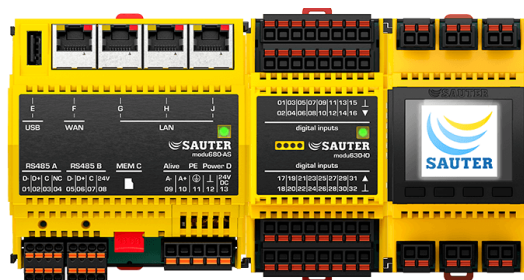


Рис. 10. BACnet- контроллер «modulob» SAUTER с программным блок-погодным модулем.

Блок-погодный модуль производит передачу актуальных метеорологических данных из сети Интернет. Информация берется со специализированного сайта и включает такие параметры следующего дня:

- средняя температура наружного воздуха;
- амплитуда температуры наружного воздуха;
- солнечная радиация.

Эти параметры определяют сдвиг заданной величины температуры теплоносителя, и на их базе строится режим нагрева или охлаждения.

Последнее происходит каждый день ровно в 19:00. Затем, учитывая прогноз погоды, система регулирует температуру теплоносителя и следит за этим в течение 11 ч. (до 6:00 следующего дня). В течение еще 6 ч. система постоянно запрашивает обновленные погодные данные и при необходимости корректирует температуру теплоносителя. Начиная с 12:00 процесс «кондиционирования» завершается, насосы выключаются.

За все время наблюдения, значения температуры внутреннего воздуха в помещениях в рабочее время находились в комфортной зоне: 20-25 °С. Даже когда в летний период температура наружного воздуха поднималась до 30 °С, внутри здания температура в помещениях не превышала 25 градусов.

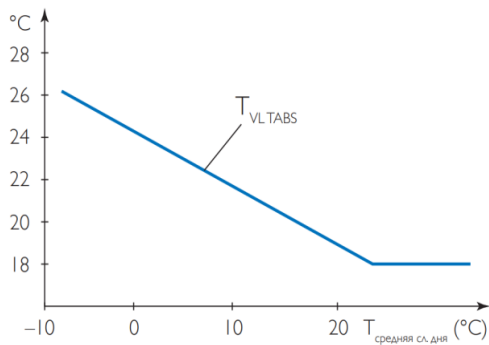


Рис. 11. Температура подающей среды в зависимости от средней величины наружного воздуха на следующий день.

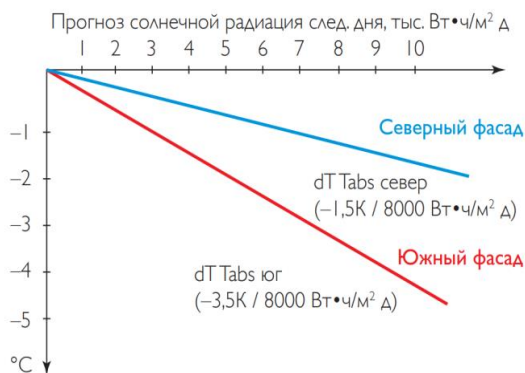


Рис. 12. Коррекция температуры подающей среды в зависимости от итоговой величины солнечной радиации на следующий день.

Добиться этого позволяло охлаждение помещений в ночные часы, при котором температура в помещениях в утренние часы оставалась комфортной зоне – не ниже 22 °C.

Вышеописанная система предиктивного регулирования позволила существенно снизить энергозатраты здания Messeturm. По сравнению с предыдущими годами работы было сэкономлено 32 % энергии, идущей на охлаждение и 9 % - на нагрев помещений. На 35 % сократилось время наработки насосов для подачи воды в термоактивную систему, для подъёма грунтовых вод, отопления и охлаждения.

Таким образом, предиктивное (прогнозное) управление, основанное на анализе метеоданных и прогнозировании характера их изменения, является интеллектуальным инструментом управления инженерными системами здания. Предиктивное управление не только вносит свой вклад в улучшение комфортности условий, но и позволяет повысить энергоэффективность и долю использования возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе здания.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие вышеуказанных элементов модернизации инфраструктуры зданий и городов в мире, и в России в частности, уже сегодня имеет ряд различных преимуществ:

- экономия топлива;
- снижение выбросов в атмосферу, способствующее улучшению экологической обстановки в целом;
- получение тепловой энергии непосредственно на месте установки оборудования;
- универсальность по отношению к виду первичной энергии (ТНУ используют различные источники низкопотенциальной энергии природного или техногенного происхождения);
- возможность обеспечить тепловой энергией объекты, не подключенные к централизованным системам теплоснабжения, а также удаленные регионы и объекты;
- отсутствие необходимости прокладки топливных (газовых) магистралей, организации складов топлива и систем дымоудаления или золоудаления;
- возможность одним технологическим решением обеспечить климат-контроль разных объектов – как отопление в холодные сезоны, так и холодоснабжение в теплые;
- применение нескольких указанных технологических решений дает синергетический эффект, и относительно удешевляет реализацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шпильрайн, Э.Э. Введение в водородную энергетику / С.П. Малышенко, Г.Г. Кулешов; под ред. В.А. Легасова. — Москва: Энергоатомиздат, 1984. — 264 с.
2. Ландграф, И.К. Введение в водородную энергетику и топливные элементы / И.К. Ландграф. — Санкт Петербург: Крыловский ГИИ, — 54 с.
3. Юсти, Э. Топливные элементы / Э. Юсти, А. Винзель; пер. с нем. И.Г. Гуревича и Л.А. Матусевич. — Москва: Изд. "МИР" — 480 с.
4. Гашо, Е.Г. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре / Е.Г. Гашо. — Москва: МЭИ, 2017. — 204 с.
5. Гашо, Е.Г. Анализ результатов обследования объектов «зеленого» строительства / Е.Г. Гашо. — Москва: МЭИ, 2019. — 175 с.
6. Инженерные системы зданий. Под ред. Н.В. Шилкина. — Москва: АВОК, 2012. — № 5.
7. Бисмарк, М. Предиктивное управление с использованием метеоданных – интеллектуальный инструмент в управлении климатизацией здания. Электронный ресурс: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=752

Е.Н. Сметанина, Ю.В.Яворовский

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ РФ

АННОТАЦИЯ

Проанализированы показатели энергетической эффективности систем теплоснабжения городов России при переводе таких систем с качественного режима регулирования тепловой нагрузки на количественный и качественно-количественный режимы регулирования. Предложены наиболее эффективные режимы регулирования систем теплоснабжения в зависимости от географического расположения и климатических особенностей городов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Главной целью развития теплоснабжающей отрасли в нашей стране является обеспечение качественного и надежного теплоснабжения, осуществляемого наиболее экономичным образом [1]. В том числе, это предполагает выбор оптимального температурного графика для конкретной городской системы централизованного теплоснабжения в зависимости от географического расположения и климатических особенностей города.

В данной статье на основе расчетов проведен анализ целесообразности изменения существующего режима регулирования тепловой нагрузки – качественного на количественный или на качественно-количественный режим для систем теплоснабжения нескольких городов РФ в зависимости от их географического расположения и климатических условий на основе фактических данных для отопительного периода 2018-2019 гг.

2. ИЗУЧЕНИЕ И ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Рассмотрим некоторые особенности схем теплоснабжения следующих российских городов: Волжский Волгоградской области, Тольятти Самарской области, Мурманск.

Волжский – город Волгоградской области в России, расположенный в Южном федеральном округе (географические координаты 48°47' с. ш. 44°46' в. д.), на левом берегу реки Ахтубы в 20 километрах северо-восточнее центра Волгограда.

Климатические условия в г. Волжский характеризуются следующими показателями: климат - континентальный, расчетная температура воздуха для проектирования отопления - (-22) °С; продолжительность отопительного периода 176 суток (4224 часа).

Температурный график в системах теплоснабжения г. Волжского – 150/70 °С со срезкой 115 °С, используется качественный режим регулирования тепловой нагрузки (рис. 1).

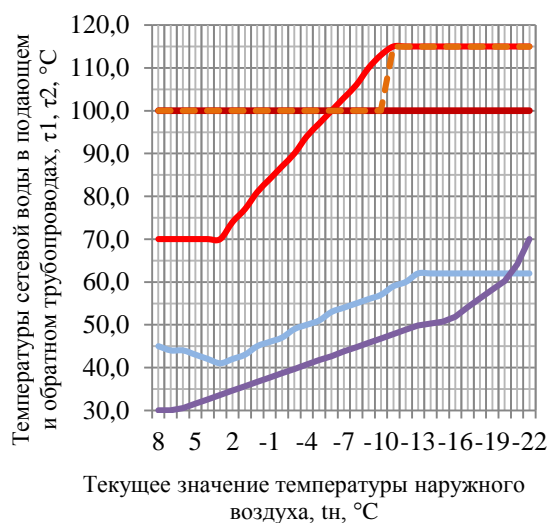


Рис 1. Качественный, количественный и качественно-количественный режим регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения г. Волжский.

Тольятти – город Самарской области в среднем течении реки Волги Приволжского федерального округа (географические координаты 53°31' с. ш. 49°25' в. д.), с умеренно континентальным климатом с жарким летом и холодной зимой. Расчетная температура воздуха для проектирования отопления - (-30) °С; продолжительность отопительного периода 176 суток (4920 часов).

Температурный график в г. Тольятти – 150/70 °С со срезкой 138 °С, используется качественный режим регулирования тепловой нагрузки (рис.2).

Мурманск - город на северо-западе России, расположен в Северо-Западном федеральном округе, за Северным полярным кругом (географические координаты 68°58' с. ш. 33°05' в. д.). Город находится в атлантико-арктической зоне умеренного климата. Расчетная температура воздуха для проектирования отопления - (-27) °С; продолжительность отопительного периода 176 суток (4920 часов). Температурный график отпуска тепловой энергии 150/70°С, со срезкой по температуре в подающем трубопроводе на

131°C, используется качественный режим регулирования тепловой нагрузки (рис.3).

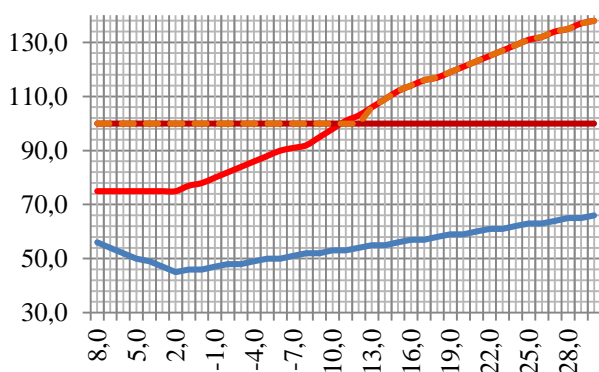


Рис 2. Качественный, количественный и качественно-количественный режим регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения г. Тольятти.

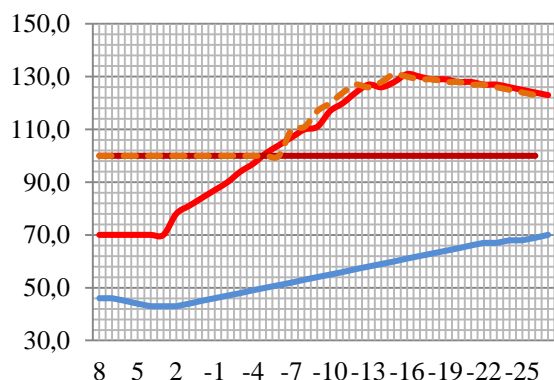


Рис 3. Качественный, количественный и качественно-количественный режим регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения г. Мурманск.

Таблица 1. Показатели энергетической эффективности при существующем и предлагаемых режимах регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения г. Волжского, г. Тольятти, г. Мурманск на основе данных отопительного периода 2018-2019 гг.

Объект исследования – система теплоснабжения	г. Волжский	г. Тольятти	г. Мурманск
Отношение суммарного годового расхода электроэнергии при качественном регулировании к суммарному годовому расходу электроэнергии при количественном регулировании	1,6	1,637	1,3
Отношение суммарного годового расхода электроэнергии при качественном регулировании к суммарному годовому расходу электроэнергии при качественно-количественном регулировании	1,6	1,642	1,42

Отношение ежегодных издержек на электроэнергию, расходуемую на перекачку теплоносителя при качественном и количественном регулировании тепловой нагрузки	1,6	1,637	1,3
Отношение ежегодных издержек на электроэнергию, расходуемую на перекачку теплоносителя при качественном и качественно-количественном регулировании	1,6	1,642	1,42
Отношение расхода электроэнергии при количественном и качественном режимах регулирования	0,3	0,33	0,29
Отношение расхода электроэнергии при качественно-количественном и качественном режимах регулирования	0,3	0,19	0,76

Таблица 2. Данные о топливопотреблении при существующем и предлагаемых режимах регулирования тепловой нагрузки теплофикационных систем г. Волжского, г. Тольятти, г. Мурманск за отопительный период 2018-2019 гг.

Объект исследования – система теплоснабжения	г. Волжский	г. Тольятти	г. Мурманск
Экономия топлива от изменения электрической мощности ТЭЦ при переходе на количественный режим регулирования, кг	870626	453956	203142
Стоимость сэкономленного топлива при переходе на количественный режим регулирования, руб	3482505	1815834	812569
Экономия топлива от изменения электрической мощности ТЭЦ при переходе на качественно-количественный режим регулирования, кг	873275	765906	999640
Стоимость сэкономленного топлива при переходе на качественно-количественный режим регулирования, руб	3491100	3063623	3998560

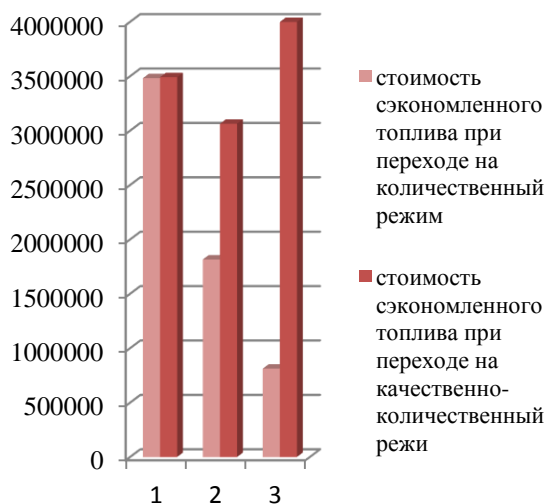


Рис 4. Данные о топливопотреблении при существующем и предлагаемых режимах регулирования тепловой нагрузки в системах теплоснабжения г. Волжского (1), г. Тольятти (2), г. Мурманск (3) за отопительный период 2018-2019 гг.

Анализ результатов проведенных расчетов [2,3] показал, что затраты на перекачку сетевой воды при количественном и качественно-количественном режимах регулирования тепловой нагрузки меньше затрат на перекачку сетевой воды при качественном режиме: для г. Волжского – в 1,6 раза; для г. Тольятти – в 1,64 раза; для г. Мурманск – в 1,3 раза (при количественном режиме) и 1,42 раза (при качественно-количественном режиме).

Как показывают результаты проведенных расчетов, для объектов исследования – систем теплоснабжения городов РФ при температурах наружного воздуха ниже, чем $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для г. Волжского, $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для г. Тольятти, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – для г. Мурманск, циркуляционный расход в системе при переходе на количественный режим регулирования начинает возрастать, при переходе на качественно-количественный режим регулирования в этих диапазонах температур наружного воздуха циркуляционный расход ме-

няться не будет. При переходе на качественно-количественный режим регулирования системы теплоснабжения городов в отопительный период 2018-2019 гг. работали бы с пониженным расходом сетевой воды по сравнению с расходом сетевой воды при существующем режиме, без изменения режима работы сетевых и подпиточных насосов.

Для городов Тольятти и Мурманск показатели энергетической эффективности будут выше при переходе на качественно-количественный режим регулирования из-за большего количества дней в отопительный период при более низких температурах. В Мурманске температуры наружного воздуха от $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдались в 15 % дней от общего отопительного периода. Если такой диапазон температур будет больше, то переход системы теплоснабжения на количественный режим регулирования будет не целесообразным. Наиболее выгодным режимом регулирования тепловой нагрузки потребителей для данных городов оказывается применение качественно-количественного режима, при котором не требуется существенно изменять конструкцию и оборудование тепловой сети, в отличие от применения количественного режима регулирования.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая географическое расположение и климатические условия рассмотренных городов, данные отопительного периода 2018-2019 гг., результаты проведенных расчетов, можно сделать вывод о возможности внедрения технических решений в части изменения режима регулирования тепловой нагрузки систем теплоснабжения городов с качественного на качественно-количественный режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** №190 «О теплоснабжении» от 27.07.2010 г.
2. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. – 8-е изд., стереот./ Е.Я. Соколов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.: ил.
3. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619983 от 15.08.2018 г.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМУ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ**АННОТАЦИЯ**

В работе определен наиболее подходящий тип теплообменника для льдоаккумулятора на основании исследований динамики роста льда на поверхностях различной формы (плоская стенка, внутренняя и наружная поверхности трубы), определена его конфигурация.

Разработано готовое проектное решение по внедрению льдоаккумулятора в существующую систему теплоснабжения энергоэффективного дома с оценкой стоимости затрат и требуемых материалов. Произведен расчет аккумулирующей способности льдоаккумулятора.

Разработана схема испытательного стенда для мониторинга и анализа работы системы, а также влияния на окружающую среду.

1. ВВЕДЕНИЕ

В российском научном сообществе, на текущий момент написано более 68600 статей на тему «тепловые насосы» и способы их применения (согласно запросу на Elibrary.ru). Однако в большинстве из них рассмотрены стандартные решения отбора тепла от таких первичных источников как воздух, грунт (грунтовые коллектора вертикальные и горизонтальные), грунтовые воды, тепло сточных вод, водоемы. У каждого из перечислимых ранее источников есть определенные преимущества и недостатки. В тех случаях, когда есть ограничения по температуре наружного воздуха, бурения глубоких скважин, возможно использование льдоаккумуляторов.

В российском и зарубежном научном сообществе уже имеются научные работы на схожую тему, однако в них описан только принцип работы данной установки и нет общей модели для расчета и проектирования подобных систем. Помимо этого существует ряд других заблуждений, которые будут описаны в данной работе. Сложность данной работы состоит в том, что многие математические модели (модели Б.Т. Маринюка, В.Б. Ржевская, Э.И. Гуйго и И.П. Юшков, М.Б. Генералов и др. [1]), в которых описана динамика образования льда, игнорируют влияние температуры на коэффициент теплопроводности льда, что приводит к большим погрешностям.

Задача рассмотреть альтернативный источник является актуальной, так как она позволяет расширить область применения тепловых насосов.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРА

В России официально не зафиксировано применение льдоаккумуляторов в качестве низкопотенциального источника тепла для тепловых насосов типа «рассол-вода». Основным преимуществом данной системы является то, что в отличие от геотермальных зондов, они не требуют специальных разрешений на строительство. Это помогает решить ряд проблем, возникающих на стадиях проектирования, строительства и дальнейшей эксплуатации. Основной трудностью для некоторых регионов является большая глубина промерзания грунта.

Схема установки состоит из одного или двух льдоаккумуляторов (расположенных на расстоянии более 2 метров друг от друга), подобранного согласно проекторочному расчету требуемого количества солнечных коллекторов, реверсивного теплового насоса и буферной емкости для приготовления горячей воды [2].

Установленные на крыше гелио-воздушные абсорберы отбирают тепло из окружающей среды, а в дневное время – за счет инсоляции, и подают его в тепловой насос. Если энергия не отбирается тепловым насосом, она служит для регенерации льдоаккумулятора, либо для нагрева буферной емкости. Льдоаккумулятор со встроенным теплообменником устанавливается ниже глубины промерзания грунта, наполняется подготовленной водой и используется в качестве низкопотенциального источника тепла. Тепловой насос должен иметь возможность работать в реверсивном режиме. В летний период, когда потребность в отоплении отсутствует, а тепловая нагрузка на горячее водоснабжение минимальна, с помощью солнечных коллекторов тепловая энергия подается в бак-аккумулятор. Когда начинается отопительный период - тепловые нагрузки возрастают, а потребность в кондиционировании снижается, тогда тепловой насос начинает отбирать тепло из льдоаккумулятора, вплоть до контролируемого обледенения при 0°C. Далее в хранилище происходит фазовый переход воды из жидкого в твердое состояние. Параллельно осуществляется процесс теплообмена между льдоаккумулятором и окружающей средой (грунтом). По завершению отопительного периода потребность в отоплении здания снижается, и тепловой насос переходит в реверсивный режим работы. В данном режиме происходит регенерация льдоаккумулятора. Производится отбор холода из хранилища и направляется на кондиционирование помещений.

Лед в баке аккумулятора начинает таять, и происходит постепенное накопление тепла. Таким образом, цикл замыкается.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

3.1. Проектирование змеевикового теплообменника и бетонной емкости

Первой задачей является выбор укладки змеевиков в емкости. От расположения змеевиков зависит равномерность отвода тепла, правильное образование льда на теплообменных поверхностях, эффективность льдоаккумулятора. Неправильная закладка может привести интенсивному образованию льда и повреждению бетонной конструкции.

Не смотря на то, что льдоаккумуляторы существуют уже много лет. На сегодняшний день нет готовой разработанной методики расчета льдоаккумулятора. Основной задачей является выбор межвиткового расстояния. В работе [3] были проведены практически опыты, нацеленные на расчет скорости образования льда на различных поверхностях (плоская стенка, внешняя и внутренняя поверхности полой трубки). На основании полученных данных в [3] можно заметить, что скорость образования льда на поверхностях снижается при достижении определенной толщины льда. Для того, чтобы обеспечить равномерное образование льда на поверхности змеевика, необходимо определить диаметр, при котором наблюдается снижение динамики роста. На основании полученных данных задаться межвитковым расстоянием.

Второй задачей является выбор материала и формы (размеры) бетонной конструкции. Бетонная конструкция должна быть прочной и обеспечивать надежную и безопасную работу установки.

При проектировании льдоаккумулятора стоит учесть, что нет смысла подогревать воду в емкости более 30 °С, т.к. будут существенные потери через ограждающие конструкции бака, а также это приведет к уменьшению влагосодержания в грунте (снижение регенеративной функции грунта [4])

3.2. Монтаж емкости

Третьей задачей является правильный выбор места и глубины установки льдоаккумулятора. Очевидно, что для регенерации и предотвращения захлаживания емкости необходимо смонтировать ее на глубину ниже промерзания грунта [5,6].

Существует два варианта применения – новое строительство и внедрение в существующую систему теплоснабжения. В первом случае допускается монтаж как рядом со зданием (на расстоянии не менее 2 м от фундамента согласно рекомендациям [7]), так и под зданием (компанией Viessmann реализовано несколько объектов с хранилищем непосредственно под зданием). Во втором случае (внедрение в существующую систему теплоснабжения) остается только монтаж емкости рядом со зданием.

Так как одной из основных целей данной работы является разработка проектного решения по

внедрению уже в действующую систему теплоснабжения пассивного дома на базе солнечных коллекторов и грунтового теплового насоса, необходимо на оптимальном расстоянии от дома и геотермальных скважин, прочих коммуникаций и трубопроводов, установить емкость для аккумуляции тепла.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

4.1. Выбор типа теплообменника для льдоаккумулятора

На рисунке 1 представлен график интенсивности образования льда на поверхности теплообмена различной формы (плоская стенка, наружная и внутренняя стенки трубы). Анализируя данный график, можем сделать следующий вывод, что скорость образования льда на внутренних поверхностях цилиндрической трубки слишком интенсивная, что может привести к неравномерному образованию льда в бетонной емкости (также концепция льдоаккумулятора не позволяет рассматривать такую форму теплообменника). Оптимальными вариантами остаются теплообменник пластинчатый либо змеевиковый.

Опыт немецких коллег [2] показал, что применение плоских теплообменников в данной схеме требует обязательного процесса регенерации, а скорость образования льда высока и неравномерна.

Исключив два типа теплообменников, остается только теплообменник цилиндрической формы (с наружной стороны теплоноситель – вода; по трубкам – рассол), который будет погружен в бетонную «бочку».

В [8] указаны рекомендации по проектированию змеевиковых теплообменников, однако они применимы только двух агрегатных состояний (газообразных и жидких). Используя модель [3] можно оценить интенсивность увеличения слоя льда на поверхности теплообменника. На основании ее определить при достижении какой толщины льда происходит снижение скорости льдообразования, задаться межвитковым расстоянием.

При постоянной температуре теплоносителя толщина льда, которая образовывается на трубке различного диаметра, практически одинакова. Добавим к межвитковому расстоянию 2ξ , что позволит снизить интенсивность обмерзания теплообменника и облегчит его регенерацию. В тепловых насосах типа «рассол вода», в качестве материала грунтового коллектора применяют пластиковые трубы, которые изготавливают из полиэтилена низкого давления (ПНД).

4.2. Требования к бетонной конструкции

Все типы бетонных и железобетонных конструкций должны удовлетворять следующим требованиям [9]:

- по безопасности;
- по эксплуатационной пригодности;
- по долговечности;
- проектным требованиям.

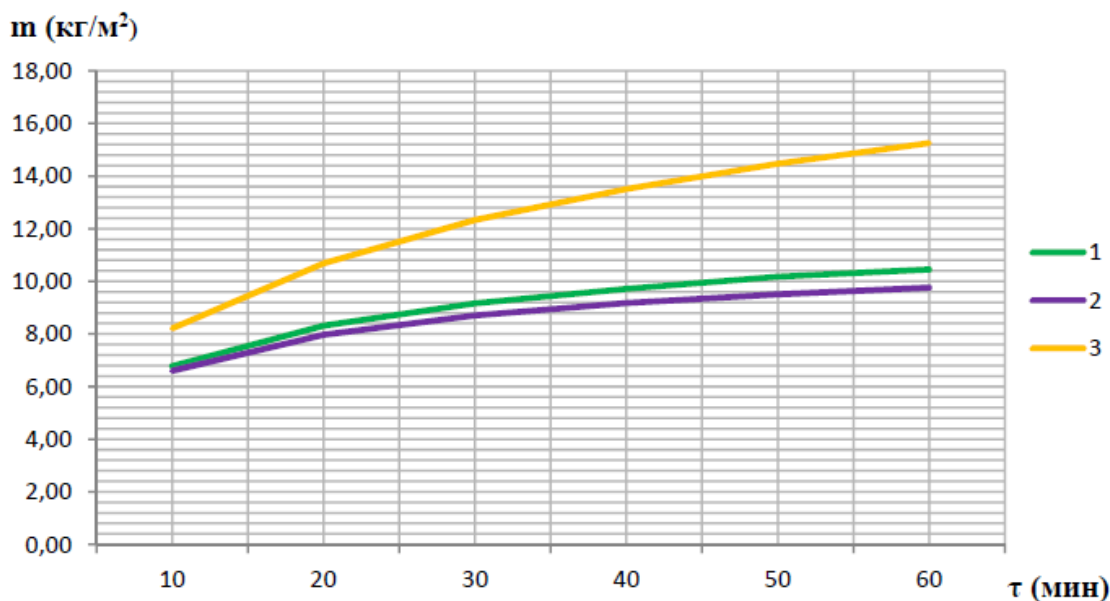


Рис.1. График динамики роста массы льда на поверхности теплообмена различной формы при одинаковых температурах поверхности. 1 – плоская поверхность; 2 – наружная цилиндрическая поверхность трубки; 3 – внутренняя цилиндрическая поверхность трубки.

Для выполнения требований по безопасности, конструкции должны обладать такими характеристиками, чтобы при различных расчетных воздействиях в процессе строительства, монтажа и эксплуатации не возникало угрозы жизни или здоровью граждан, имуществу, окружающей среде.

Для выполнения требований по эксплуатационной пригодности и долговечности, конструкция должна иметь такие характеристики, чтобы при различных воздействиях не происходило образования трещин, нарушения герметичности. Необходимо учесть, что бетонная конструкция будет:

- установлена ниже отметки 0,000 м (необходимо предусмотреть фундамент);
- наполнена водой (обеспечение непроницаемости и герметичности конструкции);
- попеременное замораживание и оттаивание воды.

Бетонная конструкция льдоаккумулятора состоит из 2-х основных частей – бетонная «чаша» и крышка через которую осуществляют ревизию и наполнение емкости.

Расчет бетонной или железобетонной конструкции будет выполнен после проектирования змеевикового теплообменника

4.3. Проектирование змеевикового теплообменника

Постановка задачи: средняя температура воды в льдоаккумуляторе в течение года $t_b=5^\circ\text{C}$. В качестве труб, согласно рекомендациям [4] применяются трубки ПНД 32x3 мм. Со стороны трубок, в качестве теплоносителя применяется готовая смесь на основе этиленгликоля с ингибиторами коррозии до -20°C . Предусматривается совместная работа с тепловым

насосом Buderus Logatherm WPS 11 (греющая мощность 10,9 кВт) в режиме отопления.

Зададимся диаметром бака аккумулятора $D_{б.ак.вн} = 2,5$ м – внутренний диаметр бетонной конструкции.

В проектировании змеевика учтено, что минимальный радиус изгиба для труб Ду32 (Uropog GeoPEX, MuoviTech) составляет 0,32-0,4 м.

С учетом полученных данных (рисунок 3) и рекомендаций [8] определим расстояние от трубы до бетонной конструкции:

$$a_c = 0,2 \text{ м}$$

$$a_d = 0,2 + 0,015 + \frac{(d_{тр.н} + 2 \cdot \delta_{тр})}{2}, \quad (4.1)$$

где: a_d – расстояние от трубы до dna бетонной конструкции, a_c – расстояние от трубы до боковых стенок бетонной конструкции, $d_{тр}$ – проходной диаметр трубы, м, $\delta_{тр}$ – толщина стенки трубы, м

Т.к. в верхней части бетонной чаши, помимо воды будут расположены коллектора, необходимо предусмотреть дополнительное пространство:

$$a_k = a_d + 0,1, \quad (4.2)$$

Определим диаметр петли первого змеевика:

$$D_{п1} = D_{б.ак.вн} - (2 \cdot a_c) = 2,1 \text{ м}, \quad (4.3)$$

Определим межвитковое расстояние:

$$s_{зм} = (d_{тр} + 2 \cdot \delta_{тр}) \cdot 3 + 3 \cdot 0,015, \quad (4.4)$$

Длина одной петли (одного полного витка) первого змеевика:

$$l_{1в} = \sqrt{(\pi \cdot D_{п1}^2 + s_{зм}^2)}, \quad (4.5)$$

Зададимся числом витков первого змеевика:

$$n_{зм1} = 11 \text{ шт.}$$

Определим длину первого змеевика (с учетом монтажной длины 5 м):

$$l_{зм1} = l_{1в} \cdot n_{зм1} + 5 \quad (4.6)$$

Рассчитаем площадь поверхности первого змеевика:

$$F_{зм1} = l_{зм1} \cdot d_{тр.н} \cdot \pi, \quad (4.7.)$$

Высота змеевика:

$$H_{зм1} = n_{зм1} \cdot d_{тр.н} + (n_{зм1} - 1) \cdot s_{зм}, \quad (4.8)$$

Схема расположения змеевиков согласно рисунку 2.3. Расстояние между трубами составляет 20 см.

По аналогии производим расчет для всех змеевиков (4 шт.). Результаты расчета сведены в таблицу 1.

На рисунке 2 отображен чертеж теплообменника в бетонной конструкции, а также принципиальное место расположения коллекторов подающей и обратной линии.

Зная высоту змеевика можно определить высоту уровня воды в бетонной «чаше»:

$$H_{в} = H_{зм1} + a_{д} + a_{к} = 2,97 \text{ м}, \quad (4.9)$$

Округлим полученное значение до 3, м.

Объем воды в бетонной «чаше»:

$$V_{в} = H_{в} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{б.ак.вн}^2 - l_{зм.общ} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{тр.н}, \quad (4.10)$$

Так как плотность льда при температуре -5°C составляет $917,5 \text{ кг/м}^3$ (плотность воды при $0,01^{\circ}\text{C}$ составляет $999,8 \text{ кг/м}^3$) при проектировании чаши необходимо учесть, что объем увеличится до $15,75 \text{ м}^3$ (увеличение объема на 8%, подъем уровня воды на 0,16 м). Чтобы избежать перелива, необходимо увеличить высоту бетонной конструкции:

$$H_{л} = H_{в} + 0,3 \quad (4.11)$$

4.4. Проектирование змеевикового теплообменника

Согласно рекомендациям [9] и требованиям [10] для обеспечения надежности бетонной либо железобетонной конструкции необходимо произвести расчет полувероятностным методом, оценив действующие нагрузки, а также условия эксплуатации. Помимо этого, необходимо учесть возможность транспортировки (при необходимости), либо заливку на месте. Бетонная конструкция должна состоять из 4 элементов: бетонного кольца, донца, крышки и фундамента.

Ранее были заданы основные параметры бетонной конструкции, а именно внутренний диаметр и высота чаши, что соответствует $D_{вн} = 2,5 \text{ м}$ и $H = 3,30 \text{ м}$. Расчет параметров и надежности кольцевой бетонной конструкции выполнен с помощью программного обеспечения Perpendicular.pro. Крышку для данного бака допускается применять такую же, как и для дренажных колодцев.

4.5. Определение глубины монтажа льдоаккумулятора

Прежде чем определить теплофизические свойства грунта, необходимо определить глубину монтажа, отталкиваясь от местной глубины промерзания грунта. Согласно [6] и [5] определим нормативную и расчетную глубины сезонного промерзания грунта по формуле 4.11 и 4.12:

$$d_{fn} = d_0 \cdot \sqrt{M_t} = 1,3 \text{ м}, \quad (4.11)$$

где: d_{fn} – нормативная глубина промерзания грунта; d_0 – величина, принимаемая для суглинков, глин; M_t – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за год в данном районе по [5]

$$d_n = d_{fn} \cdot k_h = 4,12 \text{ м}, \quad (4.12)$$

где: d_n – расчетная глубина промерзания грунта; k_h – коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения

При определении параметров грунта, необходимо учесть, что теплофизические свойства грунта после отсыпки («закапывания» льдоаккумулятора) будут отличаться через 8-12 лет. В работе [11] были описаны изменения характеристик грунта. Например, при природном залегании суглинистых грунтов плотность составляет $\rho_{п} = 1760 \text{ кг/м}^3$, отсыпке $\rho_0 = 1400 \text{ кг/м}^3$ и стабилизации через 8 лет $\rho_c = 1611 \text{ кг/м}^3$. Анализируя полученные данные в работе [11], можно обнаружить, что параметры грунта будут меняться каждый год, а полное восстановление характеристик при природном залегании не происходит. По истечении 8 лет после отсыпки грунта происходит увеличение теплопроводности грунта до 18% (при постоянной влажности 20%)

4.6. Расчет максимальной аккумулирующей способности льдоаккумулятора

Запишем формулу для расчета аккумулирующей способности льдоаккумулятора при его разрядке:

$$Q_a = Q_I + Q_{II} + Q_{III} - Q_{потери} + Q_{рег} + Q_{сол}, \quad (4.13)$$

где: Q_I – отбор тепла от льдоаккумулятора (от 15°C до $0,1^{\circ}\text{C}$), Q_{II} – фазовый переход; Q_{III} – переохлаждение льда (0); $Q_{потери}$ – потери через бетонную конструкцию; $Q_{рег}$ – регенерация льдоаккумулятора; $Q_{сол}$ – теплопритоки от солнечного коллектора (при его наличии).

$$Q_I = V_{в} \cdot c_{p_{в}} \cdot \Delta t_1 \cdot \rho_{в} = 250 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (4.14)$$

$$Q_{II} = V_{в} \cdot \rho_{в} \cdot L = 1338 \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (4.15)$$

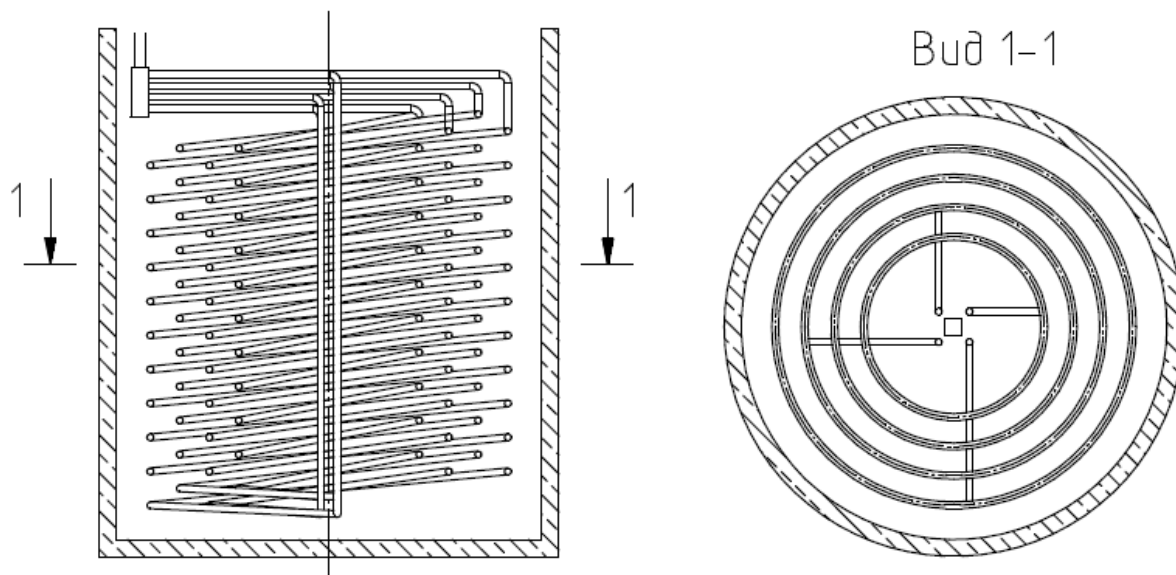


Рис. 2. Чертеж льдоаккумулятора.

Таблица 1. Сводная таблица геометрических параметров змеевиков льдоаккумулятора

№	Параметр	Ед. изм	Змеевик				Итого
			I	II	III	IV	
1	Диаметр петли	м	2,100	1,754	1,407	1,061	-
2	Длина петли	м	3,728	3,155	2,502	1,891	-
3	Длина змеевика	м	46,03	39,27	32,52	25,81	143,63
4	Площадь змеевика	м ²	5,058	4,318	3,576	2,837	15,789

Проектом не предусмотрено переохлаждение льда ниже $-0,1^{\circ}\text{C}$

$$Q_{III} = 0$$

Прежде чем приступить к расчету тепловых потерь через ограждающие конструкции, рассчитаем требуемое время непрерывной работы теплового насоса для отбора тепла из льдоаккумулятора (холодопроизводительность согласно паспорту составляет 8,6 кВт).

$$\tau_I = \frac{Q_I}{Q_x \cdot 3600} = 29 \text{ ч } 5 \text{ мин}, \quad (4.16)$$

$$\tau_{II} = \frac{Q_{II}}{Q_x \cdot 3600} = 155 \text{ ч } 34 \text{ мин}, \quad (4.17)$$

Итоговая продолжительность работы для полной разрядки бака составляет (без учета регенерации от грунта и солнечных коллекторов) составляет 184 часа и 39 минут. Рассчитаем для данной продолжительности работы потери и притоки тепла через стены.

$$Q_{\text{потери}} = 58 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

$$Q_{\text{регенг}} = 516 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

С помощью программы T*Sol Pro 5.5 был произведен расчет значения Q_a . Была задана система солнечных коллекторов, которая состояла из 15 плоских панелей Vitosol 100-F, общей площадью $37,77 \text{ м}^2$ (ак-

тивная площадь $34,94 \text{ м}^2$). В связи с тем, что в программе задаются стандартные схемы, в качестве расчетной была выбрана схема нагрева открытого бассейна (габариты бассейна соответствуют габаритам льдоаккумулятора).

Аккумулирующая способность:

$$Q_a = 2686 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

5. ОБЪЕКТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

5.1. Объект проектирования

Объектом проектирования является существующий энергоэффективный дом, который расположен в Московской области. Общая площадь строения - 205 м^2 (жилая площадь 167 м^2 , площадь участка $1\,264 \text{ м}^2$). Габариты здания - длина здания 12 м ., ширина 11 м ., высота до конька крыши - 10 м . Описание дома представлено в работах [12, 13, 14].

Проектные и строительные работы велись по технологиям «Passive House». Именно поэтому форма постройки близка к кубу, т.к. данное решение позволяет сократить тепловые потери здания через ограждающие конструкции. Крыша двухскатная, площадь крыши с южной стороны 130 м^2 (данная площадь используется для размещения солнечных коллекторов). На южной стороне сделана навесная веранда.

Она выполнена таким образом, что в летний период ограничивает приток тепла за счет инсоляции, однако в зимний период, наоборот, при низком солнце солнечные лучи свободно освещают окно и стеклянную дверь, тем самым обеспечивают прогрев внутреннего воздуха зимой.

Основной расчет тепловых нагрузок данного объекта был выполнен в программном пакете RHPP и описан в работах [12, 13, 14]. Основываясь на полученных программой результатах, была определена толщина слоев ограждающих конструкций. Позже, данные результаты были использованы в работе [15] для сравнительного анализа различного программного обеспечения.

5.1. Действующая система теплоснабжения

На проектируемом объекте ведется поэтапное внедрение оборудования. Принципиальная схема теплоснабжения подробно описана в работах [12, 13, 14].

На сегодняшний день произведено бурение 2 скважин и установка в них геотермальных зондов. Эксплуатация теплового насоса показала, что при длительной эксплуатации (длительных циклах описанных в [16]), происходит падение температуры обратной линии ниже -1°C , что свидетельствует о низкой производительности скважины. Подобный режим эксплуатации ограничивает по времени работы теплового насоса и не позволяет полноценно использовать ночной тариф электроэнергии. В связи с чем, было принято решение о применении льдоаккумулятора как дополнительного источника тепла.

Для определения эффективности применения внедряемой технологии был определен COP для трех случаев: тепловой насос с существующими геотермальными зондами, тепловой насос со льдоаккумулятором объемом $14,5\text{ м}^3$ и тепловой насос со льдоаккумулятором объемом 50 м^3 . Результаты определены согласно методике расчета COP предложенной заводом-изготовителем теплового насоса Buderus Logatherm WPS11 [17]. Данные для расчета COP теплового насоса в существующей схеме были взяты с действующей системы мониторинга. Температура подающей линии греющего контура составляет 35°C .

Таблица 2. Показатели COP

	Схема	Показатель COP
1	Тепловой насос с 2 геотермальными зондами	6,0 – 3,8
2	Тепловой насос со льдоаккумулятором объемом $14,5\text{ м}^3$	6,5 – 4,4 (4,7)
3	Тепловой насос со льдоаккумулятором объемом $53,4\text{ м}^3$	6,5 – 4,4 (5,5)

Данные, представленные в таблице 2, указаны в виде диапазонов. Для первой схемы, этот диапазон означает максимально возможный начальный COP и минимальный при завершении одного цикла работы. Для второй и третьей схемы, представлен диапазон

работы от максимального расчетного режима льдоаккумулятора (температура воды в льдоаккумуляторе составляет 15°C - большее значение) до момента полной кристаллизации (температура воды составляет $-0,1^{\circ}\text{C}$, без переохлаждения льда). Значение в скобках означает средний эксплуатационный коэффициент мощности.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что в существующей практике не существует модели и программного обеспечения для расчета льдоаккумулятора, которые могли бы позволить произвести достоверный расчет. Все модели имеют ряд допущений, которые вносят большие погрешности в итоговый результат.

В работе предложен упрощенный метод проектирования льдоаккумулятора. Выработаны рекомендации к проектированию, а именно:

- выбор межвиткового расстояния исходя из существующей рекомендаций по проектированию змеевиковых теплообменников и максимальной скорости нарастания слоя льда на поверхности змеевика;
- рекомендуемое количество витков – 9 – 11 шт. При увеличении количества змеевиков, происходит увеличение высоты льдоаккумулятора и глубины его монтажа. При близком расположении грунтовых вод это может привести к невозможности установки льдоаккумулятора;
- утепление стенок льдоаккумуляторе не следует проводить, т.к. это приведет к снижению регенерации льдоаккумулятора (регенерация будет происходить только за счет солнечных коллекторов и реверсивного режима теплового насоса);
- принцип подключения теплового насоса к ледогенератору полностью аналогичен геотермальным коллекторам. Допускается совместная их работа;
- не рекомендуется поддерживать и стремиться к температуре в льдоаккумуляторе выше 15°C , т.к. данный режим приведет к увеличению теплопотерь и пустой трате полученной солнечной энергии;
- не рекомендуется поднимать температуру рассола в скважинах выше 30°C . Это может привести к уменьшению количества влаги в грунте, что приведет к уменьшению количества теплоты, которое можно отобрать.

Второй достигнутой целью работы является готовое проектное решение для внедрения в существующую систему теплоснабжения пассивного дома. Исходя из существующей проблемы с захлаживанием скважин при длительной эксплуатации, требовалось увеличение количества скважин, либо разработка альтернативного решения проблемы. Решением данной проблемы станет внедрение льдоаккумулятора. Он позволит избежать захлаживания скважин, а также аккумулировать дополнительное количество энергии. В работе был произведен расчет бетонной конструкции, выбран состав бетона и сечение арматуры для увеличения прочности конструкции. Спроектирован теплообменник льдоаккумулятора и выбран межвитковое расстояние, которое обеспечивает одинаковую динамику роста льда по всему объему льдоаккумулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3. **Маринюк Б.Т.** Теплообменные аппараты ТНТ: Конструктивные схемы и расчет. М.: Энергоатомиздат. 2009. 200 с.
4. **D. Carbonell, D. Philippen, M.Y. Haller, E. Frank** «Development and validation of mathematical model for ice storages with heat exchangers that can be de-iced», ISES Solar World Congress – 2013 – С. 2342 – 2352
5. **Угольникова М.А.** Моделирование процессов теплообмена при намораживании водного льда на неизолированных элементах низкотемпературного оборудования. Диссертация кандидата технических наук. Москва, 2017, ст. 140
6. **Viessmann** Руководство по проектированию тепловых насосов VITOCAL 300-G, Viessmann Werke 2020, 180 С
7. **СП 131.13330.2011.** Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Строительная климатология. 114 с.
8. **СП 22.13330.2016.** Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений. 216 с.
9. **Viessmann** рекомендации по проектированию и монтажу системы VITOFRIOCAL, Viessmann Werke 2018, 40 С
10. **Зорин В.М. Григорьев В.А.** Справочник Промышленная теплоэнергетика и теплотехника. Энергопромиздат. Москва, 1991. С 170-171.
11. **СП 63.13330.2018.** Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003* Бетонные и железобетонные конструкции. основные положения.
12. **Виноградов И.М.** Математическая энциклопедия Т 5. М.: Советская энциклопедия. 1977. 623 с.
13. **Гарисс Н.А., Хузина А.Ф., Русаков А.И.** Тепловой режим нефтепроводов в грунтах с нарушенной структурой. Нефтегазовое дело. Уфа, 2017. С 125-130.
14. **Султангузин И.А.,** Кругликов Д.А., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яцюк Т.В., Бартеньев А.И., Хромченков В.Г.. Применение BIM, BEM и CFD технологий для проектирования, строи-тельства и эксплуатации энергоэффективного дома // Журнал С.О.К., 2019. №9. С. 36–42.
15. **Sultanguzin I.A., Kalyakin I.D., Govorin A.V., Khristenko B.A., Ya-vorovsky Yu.V.** Optimization of the energy efficient active house. 3. Inge-nieurtag 2016 der Fakultät Maschinenbau, Elektro-und Energiesysteme — GUS und Os-teuropatag. NESEFF-Netzwerktreffen 2016. Tagungsband. Herausgeber: Prof. Sylvio Simon. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg. November 14–15, 2016. Pp. 8–12.
16. **Султангузин И.А., Шютц У., Калякин И.Д., Говорин А.В., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Хромченков В.Г., Малахова А.А., Ланцке Б., Дамен А.** Расчёт, строительство и обследование фасада энергоэффективного дома // Строительство и реконструкция, 2017. №4. С. 110–118.
17. **Кругликов Д.А.** Современный комплексный подход к проектированию, строительству и эксплуатации энергоэффективных домов на основе BIM-, BEM- и CFD- технологий. Магистерская диссертация. Москва, 2019, ст. 142
18. **Калякин И.Д.** Реализация концепции пассивного дома при строительстве жилого дома и реконструкции офисного здания. Магистерская диссертация. Москва, 2018, ст. 89
19. **Buderus** Документация для планирования и проектирования рассольно – водяных тепловых насосов Buderus Logatherm WPS 6-11 и WPS 6-27 от 6 до 17 кВт. 2008, ст. 57
20. **ГОСТ 25358-2012.** Грунты. Метод полевого определения температуры. С. 16.

А.С. Щепотин, Г.В. Шведов, О.С. Мусорина

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

АННОТАЦИЯ

Расчеты нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи в подавляющем большинстве случаев проводятся «традиционными» методами, то есть без учета изменения сопротивления проводов. Такие расчеты имеют значительные погрешности, а существующие способы учета влияющих на температуру провода факторов сложны, объемны в вычислительном плане, требуют исчерпывающей информации о погоде и поэтому на практике не используются. В данной статье разработаны рекомендации по повышению точности указанных расчетов за счет применения способа корректирующих коэффициентов. Основное внимание уделено практической применимости рекомендаций.

1. ВВЕДЕНИЕ

Тепловое воздействие протекающего тока и зависимость сопротивления металлов от их температуры были открыты еще в XIX веке. При этом воздушные линии электропередачи подвержены воздействию факторов окружающей среды. В совокупности наибольшее влияние на температуру проводов оказывают следующие факторы:

- температура окружающего воздуха;
- плотность тока, протекающего по проводу;
- скорость ветра;
- направление ветра по отношению к проводу;
- интенсивность солнечной радиации [1].

Нагрузочные потери в проводах линии электропередачи за расчетный период можно определить по методу оперативных расчетов [2]:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot R_{20} \cdot [1 + \alpha_t \cdot (T_{\text{пр},i} - 20)] \cdot \Delta t_i, \quad (1)$$

где n – число интервалов времени; I_i – действующее значение тока по линии для i -ого интервала, А; R_{20} – активное сопротивление провода при его температуре 20°C, Ом; α_t – температурный коэффициент, равный 0,00403 для электротехнического алюминия, 1/°C; $T_{\text{пр},i}$ – температура провода в i -ый интервал времени, °C; Δt_i – интервал времени, в течение которого I_i и $T_{\text{пр},i}$ принимают неизменной.

При этом в [2] указано, что при плотности тока ниже экономической температуру провода можно принять равной температуре воздуха $T_{\text{возд}}$, а при отсутствии данных принимается $T_{\text{пр}}=20^\circ\text{C}$. Данные допущения могут приводить к значительным погрешностям. Исследования в [3] показывают, что из-за неучета реальной температуры провода погрешность

расчета потерь электроэнергии может достигать 18%, а в источнике [4] говорится о 26%.

Существует ряд верифицированных методик, позволяющих с достаточной для инженерных расчетов точностью определять температуру проводов (например, [5], [6] и [7] с учетом доработки в [8]). Они нашли широкое применение в так называемых «динамических оценках» линий ([9]-[11]) и постепенно дорабатываются путем учета большего количества факторов, например осадочного охлаждения и влажности воздуха ([12], [13]). При этом все указанные методики достаточно сложны в вычислительном плане и требуют исчерпывающей информации о метеофакторах для каждого интервала осреднения (обычно 1 час или 3 часа). Поэтому указанные методы не применяются при определении годовых потерь электроэнергии.

Задача упрощения учета влияющих на температуру проводов факторов при расчетах потерь была решена авторами данной статьи путём разработки способа корректирующих коэффициентов, подробно описанного в работах [14] и [15]. На его основе были составлены и предлагаются в данной статье обобщающие рекомендации по повышению точности расчетов нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи.

2. СПОСОБ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Способ корректирующих коэффициентов был разработан путем обработки большого количества статистических данных о погоде и графиках нагрузки. Его можно считать адаптацией метода определения температуры проводов воздушных линий, представленного в [7] и [8], для расчетов потерь электроэнергии за год с учетом влияния протекающего тока и метеорологических условий.

Основной идеей способа корректирующих коэффициентов является получение уточненного значения потерь электроэнергии ΔW с помощью простого умножения результатов расчета потерь, полученных при «традиционном» расчете, $\Delta W_{\text{трад}}$ на корректирующий коэффициент k .

$$\Delta W = \Delta W_{\text{трад}} \cdot k. \quad (2)$$

Исследования, представленные в [14] и [15], показывают, что корректирующий коэффициент имеет следующий общий вид:

$$k = \left[(a_1 \cdot K_{з.г.} + a_2) \cdot \left(\frac{F_{сеч}}{35} \right)^{0,65} \right] \cdot j_{нб}^2 + c \cdot \left(\frac{F_{сеч}}{35} \right)^{0,001}, \quad (3)$$

где a_1, a_2, c – составляющие корректирующего коэффициента, определяемые исключительно характеристиками места прохождения линии; $F_{сеч}$ – площадь сечения провода в мм²; $K_{з.г.}$ – коэффициент заполнения графика нагрузки, определяемый по формуле:

$$K_{з.г.} = \frac{j_{ср}}{j_{нб}}, \quad (4)$$

где $j_{ср}$ – средняя плотность тока А/мм²; $j_{нб}$ – наибольшая плотность тока, А/мм².

3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ

К «традиционным» были отнесены те расчеты, в которых принимается $T_{пр}=T_{возд}$ или $T_{пр}=20^{\circ}\text{C}$. Вторым вариантом используется гораздо чаще в виду своей простоты, хотя результаты исследований, представленные в [12], показывают, что его точность ниже, чем у первого варианта. Применение способа корректирующих коэффициентов также даёт лучшую точность для первого варианта «традиционного» расчета. Но из-за большой популярности необходимо уточнение и второго способа.

В связи с этим ниже предлагаются рекомендации по повышению точности расчетов нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи в виде алгоритма в порядке увеличения погрешности.

Итак, для получения более точных результатов следует:

1. Рассчитать потери электроэнергии $\Delta W_{\text{трад}}$ для каждой линии рассматриваемой сети методом оперативных расчетов «традиционным» способом при принятии температуры проводов $T_{пр}$ равной среднемесячной температуре воздуха $T_{возд}$. В случае невозможности определения значений $T_{возд}$ перейти к пункту 5.

2. Определить для каждой линии корректирующий коэффициент $k_{возд}$. Как указано в [4], при принятии $T_{пр}=T_{возд}$ погрешность расчета коррелирует со значением среднесуточного перепада температур $\Delta T_{ср.сут}$ в рассматриваемой местности. Это наблюдается и для $k_{возд}$, так как он построен на основе обработки статистики погрешностей, что дает основания для проведения районирования карты. Территория России была поделена на 5 районов, каждый из которых ограничивается определенным диапазоном среднесуточного перепада температур $\Delta T_{ср.сут}$, и для каждого района присвоена своя функция корректирующего коэффициента. Распределение по районам приведено в таблице 1 и изображено на рисунке 1.

3. Рассчитать уточненное значение нагрузочных

потерь электроэнергии ΔW путём перемножения значений $\Delta W_{\text{трад}}$ и $k_{возд}$, полученных в пунктах 1 и 2 для каждой линии.

4. Просуммировать значения ΔW , полученные для каждой линии в пункте 3, для получения потерь во всех линиях рассматриваемой сети.

5. В случае невозможности определения значений $T_{возд}$ провести расчет $\Delta W_{\text{трад}}$ для каждой линии рассматриваемой сети методом оперативных расчетов «традиционным» способом при принятии температуры проводов $T_{пр}$ равной 20°C .

6. Определить для каждой линии корректирующий коэффициент k_{20} . Анализ, проведенный в [10] показал, что при принятии $T_{пр}=20^{\circ}\text{C}$ первое (левое) слагаемое в выражении (3) коррелирует со значением среднесуточного перепада температур $\Delta T_{ср.сут}$, а второе (правое) – со значением среднегодовой температуры $T_{ср.год}$. Для удобства практического применения было установлено 5 районов по каждому из указанных факторов ($\Delta T_{ср.сут}$ и $T_{ср.год}$). Распределение по районам приведено в таблицах 2 и 3 и для наглядности на рисунках 1 и 2. Соответственно левое слагаемое корректирующего коэффициента k_{20} определяется по таблице 2 (рисунку 1), а правое по таблице 3 (рисунку 2).

7. Рассчитать уточненное значение нагрузочных потерь электроэнергии ΔW путём перемножения значений $\Delta W_{\text{трад}}$ и k_{20} , полученных в пунктах 5 и 6 для каждой линии.

8. Просуммировать значения ΔW , полученные для каждой линии в пункте 7, для получения потерь во всех линиях рассматриваемой сети.

Если линия электропередачи проходит в нескольких районах, то рекомендуется расчет потерь проводить отдельно для каждой из частей линии с последующим суммированием результатов.

Отметим, что отнесение к тому или иному району не является окончательным в связи с непостоянством метеорологических факторов. Районирование следует уточнять через каждые 10 лет, а при наличии актуальных данных о $\Delta T_{ср.сут}$ и $T_{ср.год}$ рекомендуется выбирать корректирующие коэффициенты в соответствии с диапазонами данных факторов, приведенными в таблицах 2 и 3.

Цветовое районирование карты, отображенное на рис. 2 и 3, проводилось по 150 расчетным точкам и является только приблизительным отражением реальной картины. Её использование рекомендуется при отсутствии более точных данных.

Таким образом, в зависимости от того, какой вид расчета проводится изначально, используются либо корректирующие коэффициенты $k_{возд}$, либо k_{20} . Как отмечалось выше, «традиционный» расчет при принятии $T_{пр}=T_{возд}$ с последующим уточнением с помощью $k_{возд}$ позволяет получить нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи с более низкой погрешностью.

Таблица 1. Районирование карты России для определения корректирующего коэффициента $k_{\text{возд}}$

Район по $\Delta T_{\text{ср.сут}}$	Город	$k_{\text{возд}}$	$\Delta T_{\text{ср.сут.}}$, °C
I	Анадырь, Владивосток, Магадан, Махачкала, Мурманск, Петрозаводск, Петропавловск-Камчатский, Санкт-Петербург, Севастополь, Симферополь, Сочи	$[(0,0020 \cdot K_{\text{з.г.}} + 0,0002) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,005 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	< 6,5
II	Архангельск, Астрахань, Белгород, Брянск, Великий Новгород, Владимир, Волгоград, Вологда, Воронеж, Иваново, Калининград, Калуга, Кострома, Курск, Липецк, Москва, Нарьян-Мар, Нижний Новгород, Орёл, Псков, Ростов-на-Дону, Рязань, Салехард, Саранск, Саратов, Смоленск, Сыктывкар, Тверь, Тула, Хабаровск, Южно-Сахалинск, Ярославль	$[(0,0025 \cdot K_{\text{з.г.}} + 0,0004) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,007 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	6,5 – 7,7
III	Благовещенск, Екатеринбург, Ижевск, Йошкар-Ола, Казань, Киров, Краснодар, Майкоп, Новосибирск, Омск, Пенза, Пермь, Ставрополь, Тамбов, Томск, Тюмень, Ульяновск, Ханты-Мансийск, Чебоксары, Челябинск, Элиста	$[(0,0042 \cdot K_{\text{з.г.}} + 0,0008) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,008 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	7,8 – 9,0
IV	Барнаул, Биробиджан, Владикавказ, Грозный, Иркутск, Кемерово, Красноярск, Курган, Нальчик, Оренбург, Самара, Уфа, Якутск	$[(0,0051 \cdot K_{\text{з.г.}} + 0,0016) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,016 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	9,1 – 10,3
V	Абакан, Горно-Алтайск, Кызыл, Улан-Удэ, Чита	$[(0,0070 \cdot K_{\text{з.г.}} + 0,0022) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,022 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	> 10,3



Цветовое обозначение районов

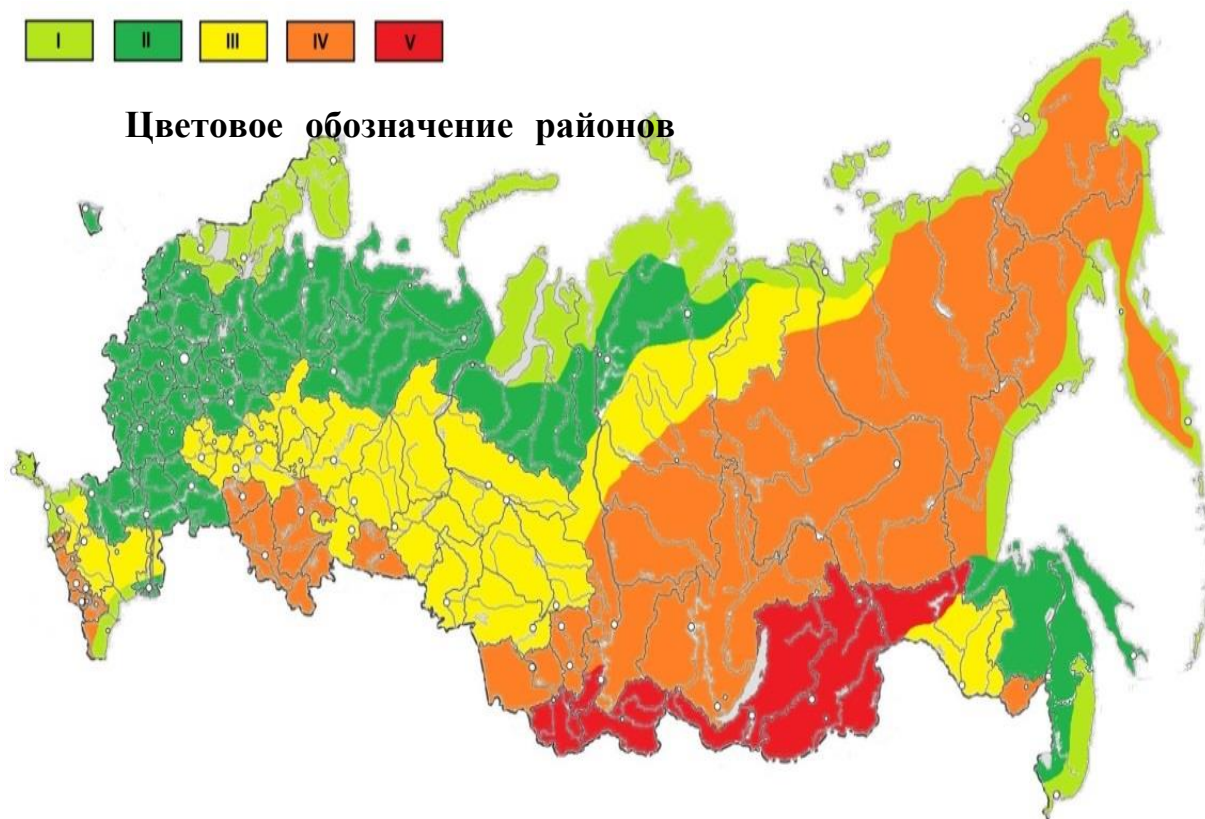


Рис. 1. Карта районирования России по среднесуточным перепадам температуры.

Таблица 2. Районирование карты для установления первого слагаемого корректирующего коэффициента k_{20}

Район по $\Delta T_{\text{ср.сут}}$	Город	Левое слагаемое k_{20}	$\Delta T_{\text{ср.сут.}}$, °C
I	Анадырь, Владивосток, Магадан, Махачкала, Мурманск, Петрозаводск, Петропавловск-Камчатский, Санкт-Петербург, Севастополь, Симферополь, Сочи	$[(0,0020 \cdot K_{3,г.} + 0,0002) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2$	< 6,5
II	Архангельск, Астрахань, Белгород, Брянск, Великий Новгород, Владимир, Волгоград, Вологда, Воронеж, Иваново, Калининград, Калуга, Кострома, Курск, Липецк, Москва, Нарьян-Мар, Нижний Новгород, Орёл, Псков, Ростов-на-Дону, Рязань, Салехард, Саранск, Саратов, Смоленск, Сыктывкар, Тверь, Тула, Хабаровск, Южно-Сахалинск, Ярославль	$[(0,0025 \cdot K_{3,г.} + 0,0004) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2$	6,5 – 7,7
III	Благовещенск, Екатеринбург, Ижевск, Йошкар-Ола, Казань, Киров, Краснодар, Майкоп, Новосибирск, Омск, Пенза, Пермь, Ставрополь, Тамбов, Томск, Тюмень, Ульяновск, Ханты-Мансийск, Чебоксары, Челябинск, Элиста	$[(0,0042 \cdot K_{3,г.} + 0,0008) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2$	7,8 – 9,0
IV	Барнаул, Биробиджан, Владикавказ, Грозный, Иркутск, Кемерово, Красноярск, Курган, Нальчик, Оренбург, Самара, Уфа, Якутск	$[(0,0051 \cdot K_{3,г.} + 0,0016) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2$	9,1 – 10,3
V	Абакан, Горно-Алтайск, Кызыл, Улан-Удэ, Чита	$[(0,0070 \cdot K_{3,г.} + 0,0022) \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,65}] \cdot j_{\text{нб}}^2$	> 10,3

Таблица 3. Районирование карты для установления второго слагаемого корректирующего коэффициента k_{20}

Район по $T_{\text{ср.год}}$	Город	Правое слагаемое k_{20}	$T_{\text{ср.год.}}$, °C
I	Астрахань, Владикавказ, Волгоград, Грозный, Краснодар, Майкоп, Махачкала, Ростов-на-Дону, Севастополь, Симферополь, Сочи, Ставрополь, Элиста	$0,955 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	> 8,1
II	Белгород, Брянск, Великий Новгород, Владивосток, Владимир, Вологда, Воронеж, Иваново, Йошкар-Ола, Казань, Калининград, Калуга, Киров, Кострома, Курск, Липецк, Москва, Нижний Новгород, Орёл, Оренбург, Пенза, Петрозаводск, Псков, Рязань, Самара, Санкт-Петербург, Саранск, Саратов, Смоленск, Тамбов, Тверь, Тула, Ульяновск, Уфа, Чебоксары, Ярославль	$0,930 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	3,1 - 8
III	Абакан, Архангельск, Барнаул, Биробиджан, Благовещенск, Горно-Алтайск, Екатеринбург, Ижевск, Иркутск, Кемерово, Красноярск, Курган, Кызыл, Магнитогорск, Мурманск, Новокузнецк, Новосибирск, Омск, Пермь, Петропавловск-Камчатский, Сургут, Сыктывкар, Тобольск, Томск, Тюмень, Улан-Удэ, Хабаровск, Ханты-Мансийск, Челябинск, Чита, Южно-Сахалинск	$0,905 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	-1,9 - 3,0
IV	Анадырь, Магадан, Нарьян-Мар, Салехард	$0,880 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	-6,9 - -2,0
V	Норильск, Якутск	$0,855 \cdot (F_{\text{сеч}}/35)^{0,001}$	< -7



Цветовое обозначение районов



Рис. 2. Карта районирования России по среднегодовой температуре.

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ

Рассмотрим следующую комбинацию исходных данных, одинаковую для обоих примеров:

- марка провода АС 240/32;
- угол линии относительно меридиана – 90°;
- смешанный тип нагрузки, $K_{з.г.}=0,38$;
- $j_{нб}=1,24 \text{ А/мм}^2$
- реальные данные о погоде за 2013 год.

Пример №1. Город Москва.

Потери, определенные по полной методике, представленной в [3], составляют $\Delta W_{\text{точн}}=50812,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

Потери, рассчитанные по среднемесячной температуре воздуха, составляют $\Delta W_{\text{трад, 1}}=49691,09 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

Потери, рассчитанные по 20°C, составляют $\Delta W_{\text{трад, 2}}=53697,14 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

В соответствии с таблицами 1, 2 и 3 определяем, корректирующие коэффициенты.

$$k_{\text{возд}} = \left[(0,0025 \cdot K_{з.г.} + 0,0004) \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,65} \right] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,007 \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,001} = 0,007 + 1,009 = 1,016. \quad (5)$$

$$k_{20} = \left[(0,0025 \cdot K_{з.г.} + 0,0004) \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,65} \right] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 0,930 \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,001} = 0,007 + 0,932 = 0,939. \quad (6)$$

Тогда уточненные потери для обоих видов расчета получаются равными:

$$\Delta W_1 = \Delta W_{\text{трад, 1}} \cdot k_{\text{возд}} = 50486,15 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}. \quad (7)$$

$$\Delta W_2 = \Delta W_{\text{трад, 2}} \cdot k_{20} = 50421,61 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}. \quad (8)$$

Применение корректирующего коэффициента с помощью первого способа уменьшило погрешность расчета с -2,2% до -0,6%, а во втором случае с 5,7% до -0,8%.

Пример №2. Город Владикавказ.

Потери, определенные по полной методике, представленной в [3], составляют $\Delta W_{\text{точн}}=51754,27 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

Потери, рассчитанные по среднемесячной температуре воздуха, составляют $\Delta W_{\text{трад, 1}}=49961,37 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

Потери, рассчитанные по 20°C, составляют $\Delta W_{\text{трад, 2}}=53697,14 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км}$.

В соответствии с таблицами 1, 2 и 3 определяем, корректирующие коэффициенты.

$$k_{\text{возд}} = \left[(0,0051 \cdot K_{з.г.} + 0,0016) \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,65} \right] \cdot j_{\text{нб}}^2 + 1,016 \cdot \left(\frac{F_{\text{сеч}}}{35} \right)^{0,001} = 0,0190 + 1,018 = 1,037. \quad (9)$$

$$k_{20} = \left[(0,0051 \cdot K_{з.г.} + 0,0016) \cdot \left(\frac{F_{сеч}}{35} \right)^{0,65} \right] \cdot j_{н6}^2 + 0,955 \cdot \left(\frac{F_{сеч}}{35} \right)^{0,001} = 0,019 + 0,957 = 0,976 \quad (10)$$

Тогда уточненные потери для обоих видов расчета получаются равными:

$$\Delta W_1 = \Delta W_{\text{град},1} \cdot k_{\text{возд}} = 51809,94 \text{ кВт} \cdot \text{ч/км}. \quad (11)$$

$$\Delta W_2 = \Delta W_{\text{град},2} \cdot k_{20} = 52408,41 \text{ кВт} \cdot \text{ч/км}. \quad (12)$$

Применение корректирующего коэффициента с помощью первого способа уменьшило погрешность расчета с -3,5% до 0,1%, а во втором случае с 3,8% до 1,3%.

Как видно по этим примерам, оба способа позволяют снизить погрешность, однако первый (по $k_{\text{возд}}$) можно признать более точным.

Отметим, что полностью избавиться от погрешности невозможно из-за непостоянства метеофакторов, то есть корректирующие коэффициенты снижают математическое ожидание погрешности, в то время как дисперсию снизить невозможно.

Также следует отметить, что $k_{\text{возд}}$ получается больше единицы из-за того, что фактически провода всегда перегреты относительно воздуха из-за протекания тока. Вместе с тем k_{20} может получаться как меньше, так и больше единицы в зависимости от того, меньше или больше средняя температура провода относительно 20°C (практика показывает, что в условиях России k_{20} может быть больше единицы только в жарких регионах при большой достаточно равномерной нагрузке линии).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из-за того, что существующие методы учета влияния наиболее важных факторов на активное сопротивление проводов воздушных линий сложны и не адаптированы для определения потерь электроэнергии за год, подавляющее большинство расчетов проводится по «традиционным» методикам со значительными погрешностями.

Для повышения точности расчетов на основе способа корректирующих коэффициентов, разработанного авторами данной статьи, были составлены рекомендации. В них учитывается, что упрощенные расчеты могут проводиться при принятии температуры провода равной как 20°C, так и среднемесячной температуре воздуха. Второй случай применяется гораздо реже первого, однако именно его корректировка позволяет получить более точные результаты.

В статье приведены примеры, показывающие простоту и эффективность следования разработанным рекомендациям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарудский Г.К., Шведов Г.В., Азаров А.Н., Самалюк Ю.С. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2014. №3. С. 35-39.
2. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 года № 326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям» (с изменениями от 1 февраля 2010 года).
3. Шведов Г.В., Щепотин А.С. Анализ погрешностей расчетов нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи // Вестник МЭИ. 2017. №6. С. 75-85.
4. А.Б. Баламетов, Э.Д. Халилов, М.П. Байрамов, К.А. Агаханова. Программа моделирования температуры провода и потерь мощности на основе учета режимных и атмосферных факторов // Программные продукты и системы, 2018, Т. 31, № 2. С. 396-402
5. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors. IEEE Std 738-2012, pp. 1-72, Dec. 2013
6. CIGRE. Thermal behavior of overhead conductors // Electrica. 2002. №207. 41 с.
7. Зарудский Г.К., Зиннер Л.Э., Сыромятников С.Ю. Расчет температуры проводов воздушных линий передачи СВН на основе метода критериального планирования эксперимента // Вестник МЭИ, 1997, №1. С. 85-90.
8. Зарудский Г.К., Сыромятников С.Ю. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения // Вестник МЭИ, 2008, №2. С. 37-42.
9. CIGRE Technical Brochure 299, "Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings," Working Group 22.12, Aug. 2006.
10. CIGRE WG B2-106. Area-wide dynamic line ratings based on weather measurements. 2012
11. Working Group on Monitoring & Rating of Subcommittee 15.11 on Overhead Lines. Real-Time Overhead Transmission-Line Monitoring for Dynamic Rating. IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 31, Issue: 3, June 2016), pp.921-927.
12. Pytlak, P., Musilek P., Lozowski E., Toth J. 2011b. "Modelling precipitation cooling of overhead conductors." Electric Power Systems Research 81(12):2147-2154
13. Kosec G., Maksić M., Djurica V., Dynamic thermal rating of power lines - model and measurements in rainy conditions. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 91, 222-229 (2017)
14. Шведов Г.В., Щепотин А.С. Снижение погрешности расчетов нагрузочных потерь электроэнергии в проводах воздушных линий электропередачи // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2 (59). С. 36-41.
15. Galaktion V. Shvedov, Alexander S. Shchepotin. Error Reduction in the Calculations of Electricity Load Losses in the Wires of Overhead Transmission Lines // Proceedings of the 2nd IEEE 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, March 12-14, 2020.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 3

*Энергосбережение
при генерации энергии*

Д.Д. Голдобин, С.Н. Петин, А.В. Бурмакина

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОБЗОР ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ТЭС ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена проблема повышения эффективности объектов генерации за счет использования дополнительных энергоносителей. Представлены современные достижения способов повышения эффективности производства энергоносителей на ТЭС: 1) переход на сверхкритические параметры пара и 2) мультигенерация. Повышение параметров пара повышает энергоэффективность производства электроэнергии, а мультигенерация позволяет производить дополнительные энергоносители (водород, кислород, сжатый воздух, холод и т.д.) за счет невостробованных мощностей используемого оборудования или утилизации потоков внутри объекта генерации. Произведенные в результате таких процессов дополнительные энергоносители могут централизованно поставляться внешним потребителям или использоваться внутри цикла производства, например, для перехода на сверхкритические параметры пара. Переход на сверхкритические параметры возможен при использовании высокотемпературных пароперегревателей или при использовании новых котельных агрегатов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие отечественной энергетики до 2030 года утверждено в энергетической стратегии [1]. В ней одной из проблем ставится высокий износ топливно-энергетического комплекса. По разным оценкам, доля этого оборудования в энергетическом комплексе страны может достигать 60-80% от всего комплекса страны [2-4]. Основной пик строительства энергоблоков на существующих тепловых электрических станции (ТЭС) пришелся на 80-е года 20-го века. Из-за этого больше половины нынешних энергетических мощностей РФ работает 35-40 лет без каких-либо существенных модернизаций. [2-11]. По мнению отечественных ученых, к такой проблеме также привело низкое финансирование

энергетического комплекса страны и совокупность внутренних и внешних геополитических факторов [1, 3-4]. За это время мировая энергетика добилась прогресса в энергетической, экологической и экономической части. Поэтому наши объекты генерации энергии уступают мировым лидерам в надежности, экономичности, уровне автоматизации, экологических параметрах и низкими значениями электрического КПД (30-36%) [11-12]. На основании этой необходимости отечественная энергетика ставит перед собой задачи модернизации существующего оборудования, освоения новых высокоэффективных энергоблоков на сверхкритических группах пара (сверхкритические, суперсверхкритические и ультрасверхкритические параметры пара). КПД таких энергоблоков должно быть свыше 50% [2-5,9,11-12].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе ставится задача исследования современных путей повышения эффективности работы объектов генерации за счет производства и использования дополнительных энергоносителей, таких как водород и кислород.

3. ПОВЫШЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАРА ДО СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Освоение сверхкритических параметров пара является очень востребованным направлением в мировой и российской энергетике. Разделяют сверхкритические параметры, суперсверхкритические параметры и ультрасверхкритические параметры пара. Классификация параметров пара на объектах генерации представлена в таблице 1 [11-12].

Таблица 1. Классификация параметров пара для генерации на объектах генерации

Параметры пара	Давление пара, МПа	Температура пара, °С	КПД, %
Критические	<25	375	39
Сверхкритические	25	560	42,5
Суперсверхкритические	30	620	45
Ультрасверхкритические	35	700	50,5

Данный способ повышения эффективности работы освоен на угольных тепловых электрических станциях. В мировой энергетике энергоблоки на суперсверхкритических параметрах пара освоены и широко применяются на практике, а в России нет ни одного такого энергоблока [3]. Известно о 55 энер-

гоблоках в мире на сверхкритических группах пара, но только два из них находятся в России, Каширская ГРЭС и «ОГК-2»- Троицкая ГРЭС [11-12].

Экологические эффекты от перехода на сверхкритические группы хорошо исследованы на базе угольных ТЭС. Так переход с докритических пара-

метров пара, на которых работает ТЭС в России, до ультрасверхкритических параметров позволит снизить эмиссии углерода, по разным оценкам, на 12-50% [12,14].

Освоение ультрасверхкритических энергоблоков затрудняется из-за технических ограничений, которые основаны на используемых материалах. Материалы, применяемые в таких энергоблоках, должны отвечать высоким жаропрочным, коррозионным и пластичным требованиям в области крайне высоких температур. Такие сплавы стоят в разы дороже, а большинство являются коммерческой тайной [11-12].

От исследования конструкционных материалов зависит также развитие паровых турбин [11]. Такие материалы необходимы для роторов турбины, лопаток паровых турбин и литых элементов корпусного оборудования. Большинство современных паровых турбин не подходят для высоких параметров пара. О необходимости развития паротурбинного оборудования различного типа говорится в работах [3-6].

Переход на повышенные параметры пара может осуществляться за счет внедрения в технологический процесс высокотемпературного пароперегревателя или за счет модернизации котельных агрегатов.

3.1. Высокотемпературный пароперегреватель

Высокотемпературные пароперегреватели (ВТПП) являются новым ключевым элементом в схемах атомных электростанций (АЭС) и ТЭС. Они могут выступать элементом для перехода на высокие параметры пара, покрывать неравномерности графика нагрузки и аккумулировать электроэнергию в водородных системах. Эффективность водородных установок для аккумулирования электроэнергии и их сравнение с другими системами рассмотрены в работах [15-16].

В зависимости от объекта генерации и типа топлива разделяют установки, использующие ядерное топливо [15-19] и органическое топливо [20-28].

Для ТЭС актуальным является использование органического топлива для повышения параметров пара. Водяной пар, который поступает с установки генерации пара, поступает в камеру ВТПП где сжигается смесь окислителя (предпочтительно, кислорода) и топлива. В камере температура может достигать 3500 °С, Получившийся водяной пар может иметь температуру до 1700 °С. Этот пар направляется на паровую турбину. Вырастает электрическая мощность паровой турбины, так как вырастает количество теплоты, которое снимается на турбине. Электрическая мощность станции может возрастать до 2,5 раз [11]. Излишки электрической мощности можно отправить на дополнительные установки, например, электролизеры для производства водорода и кислорода.

В качестве топлива для ВТПП может использоваться водород или природный газ. Ряд отечественных ученых в своих работах проводили экспериментальное сравнение сжигание водород-кислородной смеси и метан кислородной смеси [20-

22]. Утверждается, что сжигание метан кислородной смеси может быть не только не ниже, но даже и выше, чем производство и сжигания водородно-кислородной смеси, с учетом затрат на компримирование газового топлива и удаление неконденсирующихся газов из конденсатора отработавшей парогазовой смеси [20]. Сжигание водород-кислородной смеси отличается абсолютной экологической чистотой, так как в результате сгорания образуется только водяной пар, который напрямую смешивается с водяным паром, поступающим в установку, тем самым увеличивая его количество.

ВТПП также принято использовать между ступенями паровой турбины. Принято использовать от одного до трех ВТПП для организации водородного перегрева между ступенями турбины [23,29]. Каждая установленная камера для водородного перегрева увеличивает КПД станции на 2-3% [11]. В работе [11] предложены перспективные схемы, с одной камерой и двумя камерами для водородного перегрева, КПД которых может достигать 75,6%.

Использование ВТПП положительно сказывается на маневренности ТЭС [11,15-17]. Энергоблоку для запуска необходимо менее 50 секунд, его регулировочный диапазон становится более точным и в случае возникновения аварийной ситуации блок может проработать в течение 2-3 часов, что позволит провести все необходимые ремонтные работы.

3.2. Котельный агрегат

Переход на высокие параметры пара возможен при использовании новых котельных агрегатов, принцип работы которых не отличается от принципа работы нынешних паровых котлов на ТЭС. В котельный агрегат через горелки подводится смесь топлива и окислителя, которая сжигается в топке котла. Полученный водяной пар подается на паровую турбину и далее по технологическому циклу.

Первые сверхкритические и суперсверхкритические паровые котлы были разработаны в СССР [30]. Развитие котлов и их внедрение прекратилось, но с принятием энергетической стратегии начало снова набирать обороты. В работе [11-12,30] представлены технологические эффекты от внедрения высокотемпературных котлов в пылеугольные ТЭС. Отмечается снижение выбросов NO_x в 2 раза, снижение выбросов CO_2 и увеличение КПД энергоблоков до 55-60%. В России в 2011 году установили на «ОГК-2» – Тройцкая ГРЭС пылеугольный энергоблок мощностью 660 МВт, в котором переход на сверхкритические параметры пара осуществляется за счет парового котла [31].

Для перехода на высокие параметры пара нынешние паровые котлы необходимо модернизировать. С возрастанием температуры в тракте котла, возрастают требования к свойствам материала внутренних поверхностей. В первую очередь это касается испарительных поверхностей, пароперегревательных поверхностей и экономайзера. Развитие котельных агрегатов высоких параметров напрямую зависит от исследования новых материалов и сплавов для этих областей. Для снижения ка-

питательных затрат на строительство новых котельных агрегатов предлагается сокращать длину высокотемпературных паропроводов. Это предлагается достигать путем изменения компоновки котла. Изменение компоновки позволит уменьшить длину высокотемпературных паропроводов в 2 раза [11-12,32].

Преимуществом такого перехода на высокие параметры пара является независимость от вида топлива и широкая освоенность опыта использования на объектах генерации в отечественной и мировой энергетике.

4. ПЕРЕХОД В РЕЖИМ МУЛЬТИГЕНЕРАЦИИ

Повышение энергетической эффективности тепловых электрических станций возможно также по пути мультигенерации [33]. Мультигенерация - это совмещенное одновременное производство на объекте генерации не менее двух энергоносителей, а также иных полезных продуктов, из единственного первичного энергоносителя. Выделяют отдельно

тригенерацию, совмещенное производство холода, электрической и тепловой энергии. Тригенерация рассматривается в работах [34-38]. На рисунке 1 представлена схема мультигенерационного комплекса, сочетающего в себе переход на повышенные параметры пара и мультигенерацию за счет производства водорода и кислорода.

На объектах генерации перевод работы в режим мультигенерации может применяться для покрытия неравномерности нагрузки и использование невосребованных вторичных продуктов производства. Неравномерность нагрузки ТЭС покрывают за счет организации таких режимов работы оборудования, когда оно работает с максимальной эффективностью вне зависимости от потребностей потребителя. Известно, что в летнее время года, потребность в тепловой энергии снижается, поэтому излишки тепловой целесообразнее отправлять на дополнительные производства, а не выбрасывать в атмосферу.

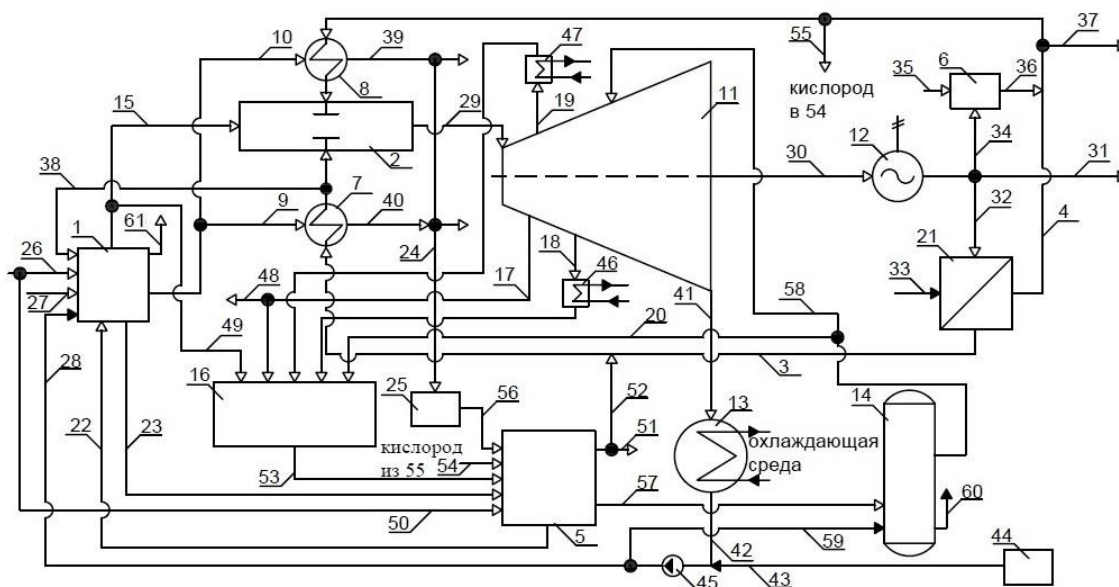


Рис. 1. Схема мультигенерационного комплекса при дополнительном производстве водорода: 1 – паровой котел; 2 – высокотемпературный пароперегреватель; 3,4 – трубопровод подачи водорода и кислорода; 5 – система по производству водорода конверсионными способами природного газа; 6 – установка по производству кислорода; 7 – теплообменник для подогрева водорода; 8 – теплообменник для подогрева кислорода; 9,10 – трубопроводы отходящих газов из парового котла; 11 – паровая турбина; 12 – электрогенератор; 13 – конденсатор; 14 – котел-утилизатор; 15 – трубопровод подачи пара в высокотемпературный пароперегреватель; 16 – смеситель пара; 17 – производственный отбор; 18,19 – нижний и верхний теплофикационный отбор; 20 – линия подачи пара с котла-утилизатора; 21 – электролизная установка; 22,23 – линии подачи и возврата синтез-газа; 24 – трубопровод подачи отходящих газов в установку по производству диоксида углерода и кислорода; 25 – производство диоксида углерода; 26 – линия подачи топлива в паровой котел; 27 – линия подачи окислителя в паровой котел; 28 – линия подачи питательной воды в паровой котел; 29 – линия подачи пара в паровую турбину; 30 – вал турбины; 31 – электроэнергия потребителю; 32 – электроэнергия на электролизную установку; 33 – линия подачи воды в электролизную установку; 34 – электроэнергия на установку по производству кислорода; 35 – линия подачи воздуха на производство кислорода; 36 – линия подачи кислорода в трубопровод; 37 – кислород потребителю; 38 – линия подачи водорода в паровой котел; 39,40 – отвод отходящих газов; 41 – линия подачи отработанного водяного пара из турбины; 42 – вода после конденсатора; 43 – подпиточная вода; 44 – водоподготовительная установка; 45 – насос; 46,47 – сетевые подогреватели; 48 – промышленный пар потребителю; 49 – линия подачи пара с парового котла в смеситель пара; 50 – топливо в систему по производству водорода конверсионными способами природного газа; 51 – водород потребителю; 52 – линия подачи водорода в трубопровод; 53 – линия подачи пара; 54 – линия подачи кислорода; 55 – отвод кислорода; 56 – линия подачи углекислого газа; 57 – вторичные продукты в котел-утилизатор; 58 – водяной пар в паровую турбину; 59 – питательная вода в котел-утилизатор; 60,61 – уходящие газы в атмосферу.

Вторичные энергоносители (ВЭР) разделяют на тепловые, горючие и силовые энергоносители [39]. Каждый из этих энергоносителей может применяться для нужд мультигенерации. На ТЭС актуально использовать тепловые ВЭР для покрытия неравномерности нагрузки путем включения промышленных (П) и теплофикационных отборов (Т) не только на собственные нужды, но и на нужды дополнительного производства. Такой способ актуален для ТЭС, когда пар высокого давления и температуры может направляться на дополнительное производство, например, водорода, методом паровой конверсии природного газа.

В НИУ МЭИ активно разрабатываются схемы, в которых применяются принципы мультигенерации [40-41].

В мультигенерационном комплексе [40] помимо электрической и тепловой энергии производится водород и кислород. Для этого установлен электролизер и система по производству водорода конверсионными способами.

К электролизеру подводиться электроэнергия с паровой турбины. Произведенный кислород и водород могут отправляться внешним потребителям, а может направляться на свои нужды в паровой котел или ВТПП. Также используется тепловая энергия с отборов паровой турбины, которая может отправлять, как внешнему потребителю, так и на собственные нужды для производства водорода конверсионными методами.

К преимуществам мультигенерации относятся увеличение эффективности работы существующего оборудования за счет более качественного использования первичных энергоносителей, централизованное производство дополнительных энергоносителей, что позволит их генерировать с большой эффективностью и экологичностью, снижение удельных затрат на производство, как основных энергоносителей, так и дополнительных, а также создание новых источников доходов для объектов генерации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Использование сверхкритических, суперсверхкритических и, в будущем, ультрасверхкритических параметров пара позволит увеличить энергоэффективность существующих объектов генерации. Это положительно скажется на экономической, технической и экологической ситуации в отечественной энергетике.

2. Внедрение мультигенерации увеличит эффективность современных объектов генерации и создаст возможность производить в промышленных масштабах новые энергоносители для внутреннего потребления в цикле, так и для внешнего потребителя, что позволит расширить рынок энергоносителей России, а также создать базу для развития технологии на новых энергоносителях.

3. Повышения эффективности объектов генерации позволит решить экологические недостатки процесса генерации и улучшить рентабельность производства энергии.

4. Выявлены предпосылки к возможности комбинирования сверхкритических параметров пара и мультигенерации. Такое комбинирование может совместить преимущества обоих способов повышения эффективности.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭС — тепловая электрическая станция;
АЭС — атомная электростанция;
ВТПП — высокотемпературный пароперегреватель;
ВЭР — вторичные энергоносители;
П — промышленный отбор паровой турбины;
Т — теплофикационный отбор паровой турбины;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 № 1715-р.
2. **Филиппов, С.П., Дильман, М.Д.** Технологическое обновление ТЭЦ России на базе газотурбинных технологий // LXV научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы исследования, разработок и реализации научных достижений в области газовых турбин в российской экономике»: сборник докладов, г. Санкт-Петербург, 18-19 сентября 2018 г., ОАО «ВТИ». 2018. — 37-44 с.
3. **Фаворский, О.Н.** Актуальные проблемы обеспечения энергетики страны конкурентоспособным оборудованием. Фаворский О.Н., Филиппов С.П., Полищук В.Л. Вестник Российской академии наук. 2017. Том. 87. № 8. — 679-688 с.
4. **Фаворский, О.Н.** Что нужно сделать для реализации энергетической стратегии страны. Фаворский О.Н., Батенин В.М., Масленников В.М., Кудрявый В.В., Филиппов С.П. Вестник Российской академии наук. 2016. Том. 86. № 10. — 1-6 с.
5. **Филиппов, С.П.** ТЭЦ в России: Необходимость технологического обновления. Филиппов С.П., Дильман М.Д. Теплоэнергетика. 2018. № 11. — 5-22 с.
6. **Филиппов, С.П.** Потребности электроэнергетики России в газовых турбинах: текущее состояние и перспективы. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С. Теплоэнергетика. 2017. № 11. — 53-65 с.
7. **Черезов, А.В.** Проблемы и перспективы развития производства газотурбинных установок высокой мощности в Российской Федерации. Черезов А.В., Грабчак Е.П. Надежность и безопасность энергетики. 2017. № 2. — 92-97 с.
8. **Дьяков, А.Ф.** Пути повышения надежности энергоснабжения страны. Дьяков А.Ф. Вестник Российской академии наук. 2012. Том 82. №3. — 214-226 с.
9. **Грабчак, Е.П.** Проблемы замены изношенного оборудования в электроэнергетике России: Приоритеты модернизации в контексте обеспечения надежности и безопасности. Грабчак Е.П., Логинов Е.Л., Романова Ю.А. Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. №5. — 38-43 с.
10. **Бушуев, В.В.** Энергетический фактор в структуре национальной безопасности России. Бушуев В.В., Воропай Н.И. Энергетическая безопасность: новые вызовы и риски. 2017. Вып. №1. — 9-19 с.
11. **Рогалев, А.Н.** Разработка научно-методологических основ создания перспективных высокотемпературных энергетических комплексов: дис. док. техн. наук: 05.14.01. — ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», Москва, 2019 - 366 с.
12. **Комаров, И.И.** Разработка методологических основ и моделей влияния уровня развития паротурбинных технологий на технико-экономические показатели эксплуатации высокотемпературных угольных энергоблоков: дис. канд. техн. наук: 05.14.01. — ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», Москва, 2016 - 233 с.
13. **Бабенко, И.А.** Технологии суперсверхкритических параметров пара в современной энергетике / И.А. Бабенко, В.Л. Шульман // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: ФГАУ ВО

- «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2018. – 69-71 с.
14. Развитие новых технологий на угольных ТЭС в мире. [Электронный ресурс]. – Режим доступа [https://www.rosugol.ru/upload/pdf/Развитие новых технологий на угольных ТЭС в мире.pdf](https://www.rosugol.ru/upload/pdf/Развитие_новых_технологий_на_угольных_ТЭС_в_мире.pdf) (дата обращения 11.05.2020)
 15. **Байрамов, А.Н.** Эффективность интеграции АЭС с водородным энергетическим комплексом: дисс. канд. техн. наук: 05.14.01 / Байрамов Артем Николаевич. – Саратов, 2010. – 142 с.
 16. **Пат. 2707182 (РФ), СПК G21D5/16.** Способ повышения мощности двухконтурной АЭС за счет комбинирования с водородным циклом / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров, А.Н. Байрамов. Заявители и патентообладатели Р.З. Аминов, А.Н. Егоров, А.Н. Байрамов. №2019105185. заявл. 25.02.2019 // Изобретения. 2019. № 36.
 17. **Аминов, Р.З.** Оценка системной эффективности атомно-водородного энергетического комплекса. Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Гариевский М.В. Теплоэнергетика. 2019. №3. – 57-71 с.
 18. **Hydrogen Production Using Nuclear Energy.** [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1577_web.pdf (дата обращения 11.05.2020)
 19. **Байрамов, А.Н.** Оценка эффективности водородного комплекса с дополнительной паровой турбиной при комбинировании с АЭС. Байрамов А.Н., Серов Д.Ю. Труды Академэнерго. 2018. №4. – 52-61 с.
 20. **Клименко, А.В.** Высокотемпературная газопаротурбинная установка на базе комбинированного топлива. Клименко А.В., Мильман О.О., Шифрин Б.А. Теплоэнергетика. 2015. № 11. – 43-52 с.
 21. **Прибатурин, Н.А.** Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород-кислород и метан-кислород в среде слабонагретого водяного пара. Прибатурин Н.А., Федоров В.А., Алексеев М.В., Богомолов А.Р., Сорокин А.Л., Азиханов С.С., Шевырев С.А. Теплоэнергетика. 2016. № 5. С. 31-36
 22. **Мильман, О.О.** Высокотемпературная паротурбинная установка на природном газе. Мильман О.О., Шифрин Б.А. /Водородные энергетические технологии: Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сб. науч. тр. М.: ОИВТ РАН, 2017. – Вып. 1. – 143-149 с.
 23. **Федоров, А.В., Мильман, О.О., Шифрин Б.А.** Высокоэффективные технологии производства электроэнергии с использованием органического и водородного топлива. М.: Из-во МГТУ, 2007.
 24. **Мальшенко, С.П. Счастливец, А.И., Борзенко, В.И.** Водородно-кислородные парогенераторы мегаваттного класса мощности /Водородные энергетические технологии: Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН: сб. науч. тр. М.: ОИВТ РАН, 2017. – Вып. 1. – 57-66 с.
 25. **Мальшенко, С.П.** Анализ системы водородного аккумулирования электроэнергии в сравнении с другими системами аккумулирования. Мальшенко С.П., Счастливец А.И. Теплофизика высоких температур. 2015. Том. 53. №4. – 538-543 с.
 26. **Мальшенко, С.П.** Эффективность генерации пара в водородокислородных парогенераторах мегаваттного класса мощности. Мальшенко С.П., Пригожин В.И., Савич А.Р., Счастливец А.И., Ильичев В.А., Назаров О.В. Теплофизика высоких температур. 2012. Том. 50. №6. – 820-829 с.
 27. **Борзенко, В.И.** Эффективность генерации пара в водородно-кислородном парогенераторе киловаттного класса мощности. В. И. Борзенко, Счастливец А.И. Теплофизика высоких температур. 2018. №6 С. 946-952.
 28. **Богомолов, А.Р.** Анализ технологий получения высокотемпературного водяного пара / А.Р. Богомолов, Н.А. Прибатурин, Е.Ю. Темникова // Вестник КузГТУ. – 2011. – №2. – С. 71-75.
 29. **Пат. 82774 (РФ), МПК F01K/00.** Электростанция с угольно-водородным топливом / В.А. Федоров, О.О. Мильман, Д.В. Федоров. Заявитель и патентообладатель В.А. Федоров, О.О. Мильман, Д.В. Федоров. №2008144313/22. заявл. 11.11.2008 // Изобретения. 2009.
 30. Состояние и перспективы развития угольной энергетики в России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.segrp.ru/data/3290395_Param0.pdf (дата обращения 11.05.2020)
 31. Проект строительства энергоблока ПСУ-660. [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://www.ogk2.ru/rus/investment/objects/psu_660_territo_riya_troitskoy_gres.php (дата обращения 11.05.2020)
 32. Перспективные конструктивные решения паровых котлов для энергоблоков с ультрасверхкритическими параметрами пара. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://coaleco.ru/wp-content/uploads/2016/10/2-Komarov-MPEI-Coaleco2016.pdf> (дата обращения 11.05.2020)
 33. **Клименко, А.В.** Основы мультигенерации: учеб. пособие / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, С.Н. Петин, А.А. Коршикова, П.Н. Борисова. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 92 с.
 34. **Пат. 2693352 (РФ), МПК F25B/11.** Бестопливная тригенерационная установка / В.С. Агабабов, С.А. Бурцев, В.Т. Воллов, А.В. Клименко, А.И. Леонтьев. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2018123331. заявл. 27.06.2018 // Изобретения. 2018. № 19.
 35. **Клименко, А.В.** Совместная генерация произведенных энергоносителей (Обзор). Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н. Теплоэнергетика. 2019. Том. 25. № 2. – 6-29 с.
 36. **Клименко, А.В.** Бестопливная тригенерационная установка на станциях технологического уменьшения давления транспортируемого природного газа. Клименко А.В., Агабабов В.С., Борисова П.Н., Петин С.Н., Корягин А.В. Теплоэнергетика. 2018. № 11. – 23-31 с.
 37. **Пат. 158931 (РФ), МПК F01K/27.** Бестопливная установка для централизованного комбинированного электро- и хладоснабжения / В.С. Агабабов, Ю.О. Байдакова, А.В. Клименко, У.И. Смирнова, Р.Н. Такташев. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2015125374/06. заявл. 26.06.2015 // Полезная модель. 2015. № 2.
 38. **Клименко, А.В.** Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения. Клименко А.В., Агабабов В.С., Ильина И.П., Рожнатовский В.Д., Бурмакина А.В. Теплоэнергетика. 2016. №6. – 36-43 с.
 39. **Данилов, О.Л.** Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов/О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.
 40. **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.
 41. **Пат. 2693352 (РФ), МПК F25B 11/02.** Бестопливная тригенерационная установка / В.С. Агабабов, С.А. Бурцев, В.Т. Воллов, А.В. Клименко, А.И. Леонтьев. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2018123331. заявл. 27.06.2018 // Изобретения. 2019. № 19.

С.В. Захаров, И.Л. Байдаков

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИК РАСЧЁТА КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА

АННОТАЦИЯ

Выполнена верификация существующих физических моделей кризиса теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения по актуализированным данным экспериментальных исследований. Использовались расчетные соотношения для критической плотности теплового потока при высоких массовых паросодержаниях, в двух диапазонах массовых скоростей потока. Проведено сопоставление результатов расчета с данными таблиц экспериментальных значений кризиса теплоотдачи при кипении в каналах в условиях вынужденного движения воды, во всех диапазонах массовых скоростей. Показано, что в диапазонах режимных параметров: $0,6 \leq x \leq 0,9$; $50 \leq \rho\omega \leq 8000 \text{ кг / (м}^2\cdot\text{с)}$; $0,1 \leq p \leq 20 \text{ МПа}$ имеет место вполне удовлетворительное их согласование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на всю сложность такого явления, как кризис теплоотдачи при кипении в условиях вынужденного течения, в последнее десятилетие в этом вопросе совершенно очевидно наметился определенный прогресс. Это касается, прежде всего, кризиса теплоотдачи в режиме пузырькового кипения, механизм наступления которого стал более ясным. Соотношения, полученные на основе модельных представлений [1, 2], позволяют с необходимой для практики точностью проводить расчет критической плотности теплового потока как недогретых, так и насыщенных жидкостей в широком диапазоне изменения давления и массовой скорости потока.

Успехи в изучении механизма кризиса теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения, когда массовые паросодержания достаточно высоки, на сегодня, как нам представляется, не столь очевидны. Это связано, прежде всего, со сложнейшими процессами влагообмена между дисперсным ядром потока и волнообразной, кипящей или гладкой (в зависимости от режимных параметров) пленкой жидкости на стенке, сопровождающими наступление кризиса.

Неоднократные попытки предложить механизм этого вида кризиса теплоотдачи [3, 4], включающий все многообразие сопутствующих ему явлений (срыв капель с гребней волн или унос их в ядро потока при кипении пленки, выпадение капель из ядра потока или отбрасывание их встречным потоком пара, образовавшимся при испарении пленки), и получить при этом надежную расчетную модель, не

позволяют говорить о полном понимании физических явлений, происходящих в нём.

В настоящей работе предлагается провести верификацию существующих методик [5, 6]. Такая необходимость вызвана крупными изменениями в работе [7], вышедшей спустя 11 лет после первой публикации подобных таблиц [8]. Среди главных отличий авторами отмечены:

- 1) Увеличенное количество экспериментальных данных (больше на 33 набора);
- 2) Введение «сглаженности» значений таблицы на основе новой статистической модели, приводящее к изменению значений КТП до 20%;
- 3) новые критерии отбора экспериментальных точек, позволившие убрать из рассмотрения 25% точек, учтённых в первом варианте таблиц.

Таким образом, единственным доступным способом подтверждения работоспособности и актуальности существующих методик [5, 6] является верификация и повторный анализ результатов.

2. МОДЕЛЬ КРИЗИСА ТЕПЛОТДАЧИ

2.1. Случай высоких массовых скоростей потока

Ниже представлено краткое описание существующих моделей с изложением физических обоснований.

Рассматривается первый из двух частных случаев, а именно кризис теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения при массовых паросодержаниях $0,6 \leq x \leq 0,9$ и при высоких скоростях потока, в диапазоне $3000 \leq \rho\omega \leq 8000 \text{ кг / (м}^2 \cdot \text{с)}$ [5]. В этом случае пленка жидкости на стенке гладкая, имеет малую толщину и не кипит, следовательно, отсутствует капельный унос с поверхности пленки. Наступление кризиса в таких условиях нередко называют кризисом гидравлического сопротивления, поскольку с ростом паросодержания потери давления на трение уменьшались. Предполагается, что в предкризисном режиме пленка жидкости формируется каплями, выпадающими на стенку из дисперсного ядра потока. Поскольку при высоких скоростях потока размеры капель очень малы (меньше толщины вязкого подслоя дисперсного потока), то их кинетическая энергия недостаточна, чтобы преодолеть вязкий подслоя с движущимися в нем вдоль стенки каплями жидкости, и достичь стенки. Поэтому выпадение капель на стенку воз-

можно только в момент разрушения (обновления) вязкого подслоя [9], происходящего периодически с интервалом:

$$\tau_* \approx 110 v'' / \left(u_*^2 (\rho''/\rho')^n \right). \quad (1)$$

Здесь $(\rho''/\rho')^n$ — эмпирическая поправка, учитывающая дополнительную диссипацию турбулентной энергии за счет диспергированности потока.

Сформированная на стенке пленка жидкости испаряется вплоть до очередного акта обновления вязкого подслоя. Таким образом, толщина пленки периодически изменяется от некоторой максимальной величины до минимальной. Это должно приводить к периодическим изменениям температуры стенки, что неоднократно наблюдалось в экспериментах по изучению кризисов в дисперсно-кольцевых режимах течения. Если за период τ_* пленка жидкости испарится полностью, то это приведет к кризису теплоотдачи. Критическую плотность теплового потока при этом можно определить из соотношения:

$$q_{кр} = r \rho' \frac{\delta_{пл}}{\tau_*}, \quad (2)$$

где $\delta_{пл}$ — максимальная толщина пленки, образованная выпавшими на стенку каплями в момент обновления вязкого подслоя. Она определяется размером капель $d_{кап}$ и количеством капель, выпавших на стенку в некотором сечении канала в момент обновления вязкого подслоя $N_{вып}$:

$$\delta_{пл} = N_{вып} \frac{d_{кап}^2}{4d_r}. \quad (3)$$

Предполагается, что количество выпавших на стенку капель пропорционально общему числу капель в потоке $N_{кап}$ в некотором сечении канала. Определить $N_{кап}$ можно в общем случае из выражения:

$$N_{кап} = \frac{F_r - F_{пл} - \phi F_r}{\pi d_{кап}^2 / 4} = \left(\frac{d_r}{d_{кап}} \right)^2 (1 - \phi) - \frac{4 F_{пл}}{\pi d_{кап}}, \quad (4)$$

где F_r и $F_{пл}$ — соответственно площадь сечения канала и часть площади сечения канала, занятая жидкой пленкой до выпадения капель из потока.

Поскольку выпадение капель на стенку происходит в момент очередного обновления вязкого подслоя, когда испаряющаяся пленка имеет наименьшую толщину, то вторым слагаемым в (4) можно пренебречь и (3) преобразовать к виду:

$$\delta_{пл} = C_1 N_{кап} \frac{d_{кап}^2}{d_r} = C_1 d_r (1 - \phi). \quad (5)$$

Если коэффициент гидравлического сопротивления рассчитывать, как для турбулентного течения в трубе с гладкими стенками ($\xi = 0,316 \text{ Re}^{-0,25}$), то динамическая скорость газа в (1) может быть найдена из соотношения:

$$u_* = w'' \sqrt{\frac{\xi}{8}} = 0,2 \frac{w''^{7/8} v''^{1/8}}{d_r^{1/8}}. \quad (6)$$

Истинное объемное паросодержание можно определить из формулы:

$$\phi = \left(1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{-1}. \quad (7)$$

В (7) не учтено скольжение фаз, что в рассматриваемых условиях, когда капли малы, а их форма близка к сферической и массовая скорость велика, можно считать вполне приемлемым допущением.

С учетом (1), (5) и (6) выражение (2) преобразуется к виду:

$$q_{кр} = C_1 r \left(\frac{d_r}{v'' \rho''} \right)^{0,75} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,8} \rho w^{1,75} (1 - \phi). \quad (8)$$

2.2. Случай низких массовых скоростей потока

Ниже рассматривается второй из частных случаев, представленный в [6].

Рассматриваются условия, когда в канале сформирован дисперсно-кольцевой режим с высоким массовым расходным паросодержанием ($x = 0,6 \div 0,9$) и низкими массовыми скоростями $50 \leq \rho w \leq 3000 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$. В этом случае можно предположить, что на стенке имеется тонкая, гладкая, некипящая пленка жидкости, которая формируется выпадающими из ядра потока каплями. В ядре турбулентного потока движутся капли жидкости, размер которых определяется скоростью потока. При выпадении капель большого размера на пленку из нее могут выбиваться брызги (вторичные капли), часть которых уносится обратно в ядро потока. Этот процесс сопровождается уменьшением толщины пленки.

Рассматриваемые «крупные» капли должны превышать толщину вязкого подслоя, который играет роль прослойки, разделяющей паровое турбулентное ядро потока и тонкую пленку жидкости на стенке. Толщину подслоя можно оценить, как: $\delta_* = 10 v'' / u_*$, где u_* — динамическая скорость для парового ядра потока; v'' — кинематическая вязкость пара. В этом случае, в момент вторжения в пристенный слой крупных турбулентных вихрей капли жидкости будут выпадать на поверхность канала, образуя пленку жидкости. Период вторжения таких вихрей определяется диаметром канала d_r и средней скоростью потока \bar{u}'' [9]:

$$\tau = \frac{d_r}{\bar{u}''} (1 - \phi)^n, \quad (9)$$

где $(1 - \phi)^n$ — поправочный множитель, учитывающий ламинаризацию дисперсного потока, связанную с присутствием капель жидкости в его паровом ядре.

В первом приближении можно предположить, что количество выпавших на стенку капель $N_{вып}$ пропорционально общему числу капель в потоке (

$C_1 N_{\text{кап}}$) в некотором сечении канала. Определить $N_{\text{кап}}$ можно аналогично предыдущему случаю из выражения (4).

При соударении выпадающих крупных капель с поверхностью пленки образуются вторичные капли (брызги), часть которых может уноситься потоком. Их количество можно оценить, как:

$$N_{\text{ун}} = \frac{N_{\text{вып}} \rho' u_{\text{кап}}^2 \delta_{\text{пл}}}{\sigma(1-\varphi)}, \quad (10)$$

где $u_{\text{кап}}$ - скорость капель, выпадающих на пленку из ядра потока; $\delta_{\text{пл}}$ - толщина пленки жидкости; $(1-\varphi)$ - учитывает сопротивление уносимым каплям (брызгам) со стороны выпадающих на пленку капель.

Толщина пленки, образованная выпавшими на стенку каплями в момент вторжения в пристенный слой турбулентного вихря за вычетом вторичных капель (брызг), унесенных потоком, определяется из выражения:

$$\delta_{\text{пл}} \sim (N_{\text{вып}} - N_{\text{ун}}) \frac{d_{\text{кап}}^2}{d_r} \sim \left(N_{\text{вып}} - C_2 \frac{N_{\text{вып}} \rho' u_{\text{кап}}^2 \delta_{\text{пл}}}{\sigma(1-\varphi)} \right) \frac{d_{\text{кап}}^2}{d_r}$$

или

$$\delta_{\text{пл}} = C_1 \left[\left(\frac{d_r}{d_{\text{кап}}} \right)^2 (1-\varphi) - \frac{4F_{\text{пл}}^0}{\pi d_{\text{кап}}} \right] \left(1 - C_2 \frac{\rho' u_{\text{кап}}^2 \delta_{\text{пл}}}{\sigma(1-\varphi)} \right) \frac{d_{\text{кап}}^2}{d_r}$$

Полагая, что выпавшие на стенку капли образуют пленку толщиной $\delta_{\text{пл}}$, значительно превосходящую начальную $\delta_{\text{пл}}^0$, то слагаемым

$$\frac{4F_{\text{пл}}^0}{\pi d_{\text{кап}}} = 4\delta_{\text{пл}}^0 \frac{d_r}{d_{\text{кап}}} \text{ можно пренебречь и преобразовать выражение для } \delta_{\text{пл}}:$$

$$\delta_{\text{пл}} = C_1 \frac{d_r (1-\varphi)}{1 + C_2' \frac{d_r \rho' u_{\text{кап}}^2}{\sigma}}, \quad (11)$$

где $C_2' = C_1 C_2$.

Если за период τ пленка жидкости испарится полностью, то это приведет к кризису теплоотдачи. Критическую плотность теплового потока при этом можно определить из соотношения:

$$q_{\text{кр}} = r \rho' \frac{\delta_{\text{пл}}}{\tau}. \quad (12)$$

С учетом (9), пренебрегая «1» в знаменателе и полагая, что $\bar{u}'' \approx u_{\text{кап}} \approx \frac{\rho w}{\rho''}$, из (12) получим:

$$q_{\text{кр}} = C_1 r \rho' \sigma \frac{(1-\varphi)^{1-n}}{d_r \rho w}. \quad (13)$$

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

3.1. Условия сопоставления

Случай высоких массовых скоростей был сопоставлен с экспериментом путем расчета по (8) 660

значений $q_{\text{кр}}$ для давлений $p = 0,1 \div 21$ МПа, паросодержаний $x = 0,6 \div 0,9$ в диапазоне массовых скоростей $\rho w = 3000 \div 8000$ кг/(м²·с). Этим режимным параметрам в наибольшей степени отвечает структура дисперсно-кольцевого режима течения, представленная в модели кризиса теплоотдачи.

Случай низких массовых скоростей был сопоставлен с экспериментом путем расчета по формуле (13) 280 значений $q_{\text{кр}}$ для приведенных давлений $p = 10 \div 21$ МПа, $x = 0,6 \div 0,9$ и $\rho w = 50 \div 3000$ кг/(м²·с).

Для определения констант n , C_1 в (8), (13) были использованы данные скелетных таблиц по воде [7]. Определение констант проводилось поиском наименьшей суммы среднеквадратичных и среднеарифметических отклонений всех расчётных значений по каждому режиму течения.

3.2. Результаты сопоставления

Численные результаты, а именно значения постоянных в формулах для $q_{\text{кр}}$, а также среднеарифметические и среднеквадратичные отклонения $\sigma_{\text{ср.ар}}$, $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ приведены в табл. 1 и 2.

Погрешности и значения постоянных, полученные при верификации методики по данным СТ 2006 г. сведены в табл. 2. При этом свыше 90% данных скелетных таблиц для каждого из вариантов течения потока отклоняются от рассчитанных не более чем на 36%.

Таблица 1. Результаты сопоставления расчетных методик по скелетным таблицам 1995 г. [8]

Вариант течения потока	n	C_1	C_2'	$\sigma_{\text{ср.ар}}$	$\sigma_{\text{ср.кв.}}$
Высокие массовые скорости	0,2	$3,2 \cdot 10^{-9}$	-	-0,024	0,26
Низкие массовые скорости	0,5	$1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-4}$	0,19	0,53

Таблица 2. Результаты сопоставления расчетных методик по обновлённым данным СТ 2006 г. [7]

Вариант течения потока	n	C_1	$\sigma_{\text{ср.ар}}$	$\sigma_{\text{ср.кв.}}$
Высокие массовые скорости	0,18	$2,4 \cdot 10^{-9}$	0,340	-0,10
Низкие массовые скорости	0,05	$6 \cdot 10^{-3}$	0,354	-0,12

При выборе между различными вариантами постоянных с достаточно близкими суммами $\sigma_{\text{ср.ар}}$ и $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ также учитывалось распределение количества относительных отклонений расчёта Δ по их абсолютной величине: $\Delta = q_{\text{кр}} / q_3 - 1$ где q_3 — экспериментальное значение по данным [7]. Данные распределения представлены в виде гистограмм на рис. 1 и 2.

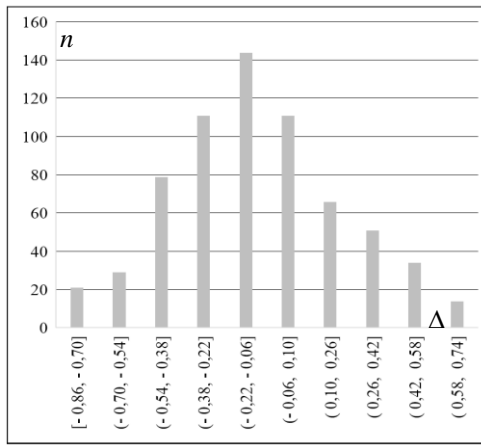


Рис. 1. Высокие массовые скорости. Распределение количества n отклонений $\Delta = q_{кр} / q_3 - 1$ по их величинам (всего 660 точек).

Характер полученных данных, а именно близкая к нормальному распределению форма гистограмм, имеющая максимум в окрестности нулевой ошибки, говорит о том, что статистическая значимость расчётных значений велика, а выбор именно таких постоянных n и C_1 обеспечивает наибольшую точность при расчёте новых точек. Для режима малых скоростей гистограмма представлена на рис. 2.

Анализ результатов сопоставления проведен отдельно для каждого из вариантов течения (высокие и низкие массовые скорости).

На рис. 3 — 5 в координатах $q_{кр} — x$ проведено сравнение данных СТ для воды [7] с результатами расчета по (8) и (13) для дисперсно-кольцевого режима течения.

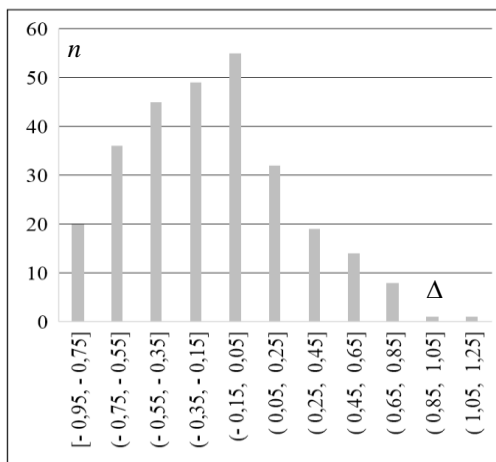


Рис. 2. Низкие массовые скорости. Распределение количества n отклонений $\Delta = q_{кр} / q_3 - 1$ по их величинам (всего 280 точек).

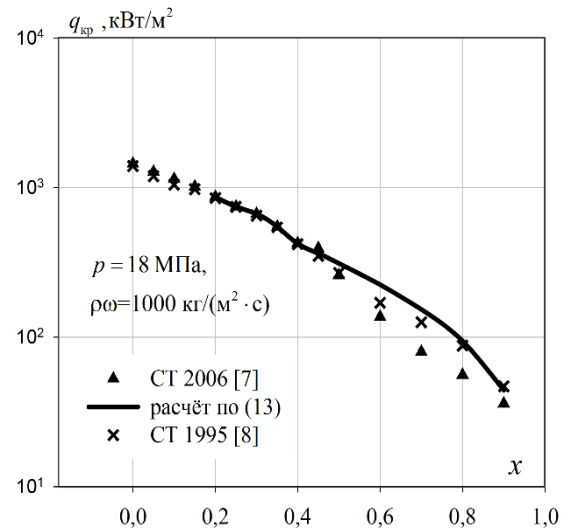


Рис. 3. Сопоставление данных скелетных таблиц [7] и [8] с расчетом по (13) при $p = 18$ МПа и $\rho\omega = 1000$ кг/(м²·с).

Приведены примеры высоких и низких массовых скоростей: 8000 кг/(м²·с) и 1000 кг/(м²·с). Результаты сравнения говорят о том, что при относительных давлениях $p/p_{кр} \geq 0,5$ в диапазоне паросодержаний $x = 0,6 \div 0,9$ соотношения (8) и (13) перекрывают практически весь диапазон СТ для воды по массовым скоростям.

На рис. 5 и 6 в качестве примера приведены результаты сопоставления данных скелетных таблиц [7] с расчетами по (8) и (13) во всем диапазоне массовых скоростей.

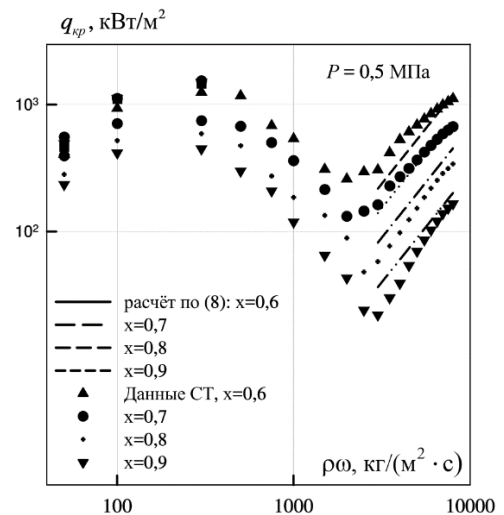


Рис. 4. Сопоставление данных скелетных таблиц [7] с расчетом по (8) при $p = 0,5$ МПа и $x = 0,6 \div 0,9$.

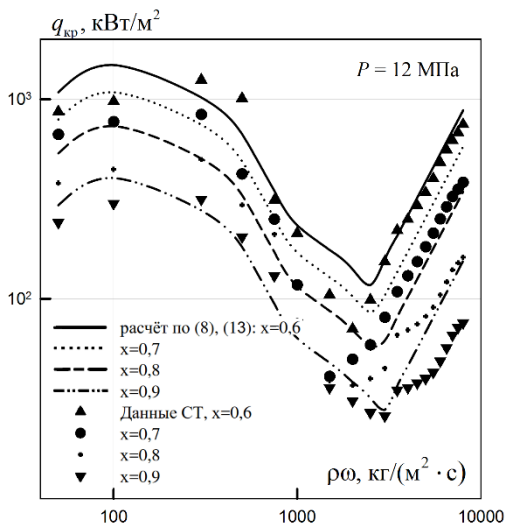


Рис. 5. Сопоставление данных скелетных таблиц [7] с расчетом по (8) при $3000 \leq \rho w \leq 8000$ кг / (м²·с) и по (13) при $50 \leq \rho w \leq 3000$ кг/(м²·с). $p = 12$ МПа, $x = 0,6 \div 0,9$.

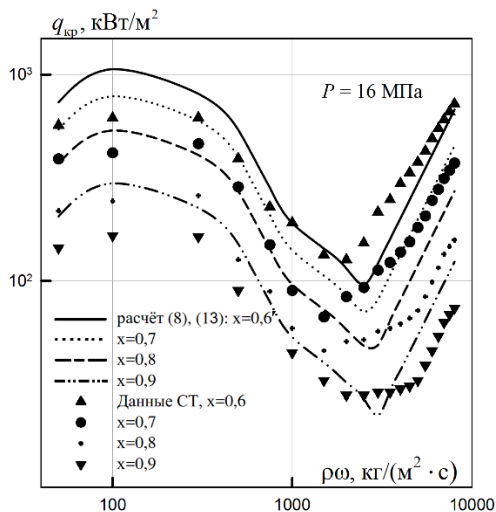


Рис. 6. Сопоставление данных скелетных таблиц [7] с расчетом по (8) при $3000 \leq \rho w \leq 8000$ кг / (м²·с) и по (13) при $50 \leq \rho w \leq 3000$ кг/(м²·с). $p = 16$ МПа, $x = 0,6 \div 0,9$.

Как видно из рис. 4 — 6, соотношения правильно описывают характер зависимости КТП от p , x и ρw в пределах режимных параметров, указанных в п. п. 2.1 и 2.2. Это говорит о принципиально верных положениях, заложенных в модель.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные количественные и качественные результаты верификации расчётных методик дают удовлетворительный результат в широком диапазоне давлений и массовых скоростей воды: $p = 0,1 \div 20$ МПа, $\rho w = 50 \div 8000$ кг/(м²·с).

В работе проанализированы данные скелетных таблиц рекомендованных значений критических тепловых потоков для высоких паросодержаний потока в области существования дисперсно-кольцевых течений. Показана актуальность расчётной методики для новых экспериментальных данных. Рассчитаны новые значения постоянных для расчётных формул, а также отклонения от экспериментальных данных.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

СТ — скелетные таблицы;
 КТП — кризис теплового потока;
 q — плотность теплового потока, Вт/м²;
 p — давление, МПа;
 x — массовое расходное или балансовое паросодержание;
 ϕ — истинное объемное паросодержание;
 F — площадь поперечного сечения канала, м²;
 ρw — массовая скорость потока, кг/(м²·с);
 τ^* , τ — период обновления вязкого подслоя, с;
 u^* — динамическая скорость, м/с;
 ν — динамическая вязкость, м²/с;
 ρ — плотность, кг/м³;
 r — удельная теплота парообразования, Дж/кг;
 δ — толщина, м;
 d — диаметр, м;
 N — количество капель в сечении канала;
 w — средняя скорость, м/с;
 ξ — коэффициент гидравлического сопротивления;
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 Индексы:
 0 — начальные условия;
 ' , " — жидкость и пар соответственно;
 пл — пленка;
 вып — выпавший;
 г — гидравлический;
 кап — капля;
 кр — критический.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягов В.В., Пузин В.А. Кризис кипения в условиях вынужденного движения недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 1985. №10. С. 52-55.
2. Захаров С.В., Павлов Ю.М. Методика расчета критической плотности теплового потока при пузырьковом кипении жидкостей в каналах // Теплоэнергетика. 2004. №3. С. 72-78.
3. Celata G.P., Mishima K., Zumbo G. Critical heat flux prediction for saturated flow boiling of water in vertical tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2001. No. 44. p. 4323-4333.
4. Okawa T., Kataoka A., Naito M. Prediction of critical heat flux in annular flow using a film flow model // Journal of Nuclear Science and Technology. 2003. Vol. 40. No. 6. p.p. 388-396.
5. Захаров С. В., Носов А. М., Павлов Ю. М. Кризис теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения при высоких массовых паросодержаниях и скоростях потока. Труды РНКТ-4 // Том 4. С. 123-126.
6. Захаров С. В., Носов А. М., Павлов Ю. М. Кризис теплоотдачи в дисперсно-кольцевом режиме течения при высоком паросодержании потока // Вестник МЭИ. 2006. №5. С. 100-106.
7. Groeneveld D.C., Shan J.Q., Yang J., etc. The 2006 CHF look-up table // Nuclear Engineering and Design. 2007. №237. P. 1909-1922.
8. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Грневельд Д. и др. Скелетная таблица версии 1995 г. для расчета критического теплового потока в трубах // Теплоэнергетика. — 1997. - №10. С. 43 – 53.
9. Левитан Л.Л. Кризис высыхания в дисперсно-кольцевом режиме течения / Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика. Л.: Наука. Ленинградское отделение. 1987. С. 169-186.

С.В. Захаров, И.Л. Байдаков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ С ЗАВИХРИТЕЛЯМИ

АННОТАЦИЯ

Представлена новая методика расчета кризиса теплоотдачи в каналах с ленточными завихрителями на основе существующей физической модели наступления кризиса теплового потока (КТП) для пузырькового режима кипения [1]. Изменение КТП при использовании винтовых вставок учитывается введением поправок в существующую методику. Проведена верификация настоящей методики на основе экспериментальных работ с данными по КТП при кипении воды с общим количеством 187 точек. Методика показала хорошее согласование с экспериментами в широком диапазоне параметров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений в разработке новых методов отвода тепла является использование интенсификаторов теплообмена при кипении, в т.ч. завихрителей потока. Анализ работ, посвященных моделированию кризиса в потоках с закрученной вставкой, ожидаемо показал, что авторы отдают предпочтение модификациям существующих физических моделей для гладких труб.

В указанных работах отсутствует удовлетворительное физическое описание зависимости КТП от режимных параметров. Например, в их результатах невозможно обнаружить максимумы и минимумы на зависимости $q_{кр} = f(\rho\omega)$ при постоянном

значении $x_{кр}$, которые отчетливо видны, например, в данных скелетных таблиц [2]. Эти зависимости показаны на рис. 1.

Предлагается модифицировать существующую и проверенную в гладких каналах физическую модель наступления КТП, разработанную С. В. Захаровым и Ю. М. Павловым в НИУ «МЭИ», таким образом, чтобы сделать ее пригодной для расчета каналов с винтовыми вставками.

2. БАЗОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Физические обоснования базовой модели

В основе физической модели [1] лежит предположение о том, что при высоких тепловых нагрузках на теплоотдающей поверхности в результате слияния индивидуальных пузырей могут образовываться паровые конгломераты. Между паровым конгломератом и теплоотдающей поверхностью находится тонкий слой жидкости с некоторой толщиной $\delta_{пл}$.

Допускается предположение, что время нахождения конгломерата на стенке или время существования пленки жидкости под ним ограничено либо периодом вторжения в пристенный слой крупномасштабных турбулентных вихрей, либо периодическим обновлением ламинарного подслоя в силу его внутренней динамической неустойчивости.

Таким образом, наступление кризиса связано с высыханием пленки жидкости под паровым конгломератом за время существования конгломерата у теплоотдающей поверхности τ . Критический тепловой поток в таком случае может быть выражен:

$$q_{кр} = \frac{r \rho' \delta_{пл}}{\tau}. \quad (1)$$

Важным допущением является условное деление диапазона массовых скоростей на «малые» и «большие» скорости, соответствующие $d_0 > \delta$ и $d_0 < \delta$, где d_0 и δ — отрывной диаметр парового пузыря и толщина вязкого подслоя соответственно. Было обнаружено, что в исследуемом диапазоне давлений $p/p_{кр} > 0,5$ локальному минимуму на зависимостях $q_{кр} = f(\rho\omega)$ (см. рис. 1) соответствует постоянное значение массовой скорости, увеличивающееся с уменьшением давления, и соответствующее равен-

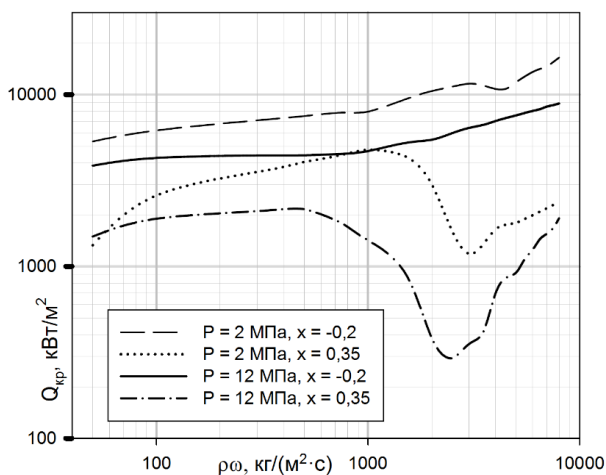


Рис. 1. Зависимость КТП от массовой скорости при постоянной относительной энтальпии по данным [2].

ству $d_0 = \delta$ с достаточно высокой точностью. Разработаны критерии для перехода между этими областями скоростей. Дальнейшие выкладки основаны на раскрытии выражений для динамической скорости потока u^* и для периода вторжения турбулентных вихрей в пристенную область τ :

$$\tau \approx \frac{d_r}{u_*} \quad (2)$$

Вопрос о существовании подобного временного масштаба турбулентности изучен достаточно давно, например, в работах [3], [4].

2.2. Применимость базовой модели

Данная модель процесса является сегодня единственной, объясняющей характер зависимости величины КТП от режимных параметров в широком диапазоне изменения массовой скорости потока (рис. 2).

Диапазон применимости ограничен областью существования снарядного режима течения при давлениях $0,05 \leq p/p_{кр} < 0,5$ и диапазоном истинных объемных паросодержаний $0,25 < \varphi < 0,65$.

Конечное выражение для расчета $q_{кр}$ выглядит следующим образом:

$$q_{кр} = C_1 \cdot \frac{r \cdot \rho'}{\tau_{1,2}} \cdot \left(C_2 \cdot \frac{r \cdot \rho'' \cdot q_{кр}}{\lambda' \cdot \sigma \cdot T_s} + \frac{\varphi}{d_{01,2}^2} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

и позволяет итерационными методами быстро определить $q_{кр}$.

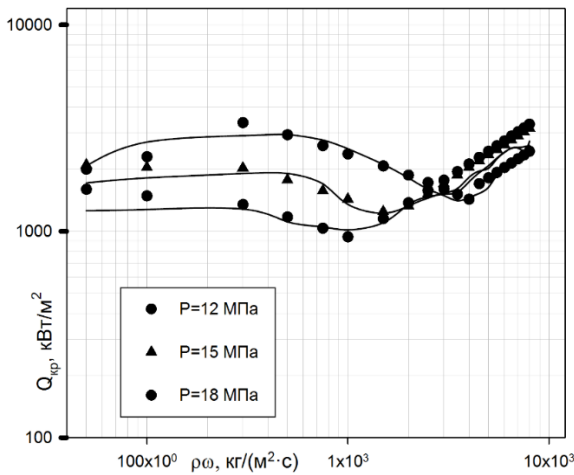


Рис. 2. Сопоставление расчета кризиса теплоотдачи по [1] с данными [2] для $p = 12, 15, 18$ МПа и паросодержания $x = 0,15$. Точки — расчет, линии — данные скелетных таблиц.

Именно предположение о влиянии периодичности τ является основным положением, принятым для разработки модели. Низкие отклонения от экспериментальных значений подтверждают верность данного предположения.

Около 90% данных скелетных таблиц, не относящихся к снарядному режиму, при расчете по [1] имеют среднеквадратичное отклонение 0,200. Дан-

ная методика дает убедительные результаты в т. ч. при сопоставлении с экспериментальными данными при кипении азота, гелия, различных фреонов и на различных геометриях канала.

3. ВНЕСЕНИЕ ПОПРАВОК В ФИЗИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ

3.1. Обзор существующих практик

С начала изучения явления кризиса при кипении (1960-е годы) и по сегодняшний день различным механизмам повышения кризиса теплоотдачи, в том числе с помощью винтовых вставок, уделялось достаточно внимание. Наиболее полные перечни таких работ приведены в [5, 6].

Основной причиной, по которой ленточная вставка повышает значение КТП по сравнению с гладкими трубами при тех же $\rho\omega$ и d_r , является изменение структуры потока: тангенциальное ускорение, вызванное закруткой канала, и увеличенная по сравнению с гладкими трубами осевая скорость способствуют более интенсивному перемешиванию фаз и орошению стенки канала.

Очевидная сложность физики закрученных кипящих потоков приводит к разнообразию теоретических описаний. Например, замена ускорения свободного падения g на нормальное ускорение, действующее на теплоноситель при его закрутке [8], или использование коэффициента гидравлического сопротивления, соответствующего трубе с винтовой вставкой [8, 9]. Эти и другие работы пригодны, как правило, в узком диапазоне паросодержаний или других режимных параметров, в отличие от настоящей работы.

Ленточная вставка в канал действует как вытеснитель, уменьшая площадь проходного сечения канала, что приводит к увеличению скорости, а также уменьшает гидравлический диаметр канала.

Поэтому для того, чтобы обеспечить соответствие расчетной модели условиям нахождения закрученной ленты в круглой трубе, предлагается ввести наиболее очевидные здесь поправки:

- 1) поправка к выражению для гидравлического диаметра трубы d_r ;
- 2) поправка к массовой скорости потока $\rho\omega$.

3.2. Поправка к гидравлическому диаметру

В имеющихся исследованиях КТП в трубе с закрученной лентой гидравлический диаметр рассчитывался идентично, без учета закрутки, принимая, что в трубу вставлена прямая лента:

$$d_r = \frac{4 \cdot F}{P} = \frac{4 \cdot (\pi \cdot d^2 / 4 - \delta \cdot d)}{\pi \cdot d + 2 \cdot d - 2\delta} \quad (4)$$

Предложено записать формулу для гидравлического диаметра в «объемном» виде, что позволяет учесть закрутку ленты:

$$d_{Г, \text{объемн}} = \frac{4 \cdot V}{F} = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot t - S \cdot \delta \right)}{\pi \cdot d \cdot t + 2 \cdot S - 2 \cdot \delta \cdot L_{\text{сп}}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{сп}}$, S — длина спирали и площадь поверхности закрученной ленты, рассчитанные для винтовой фигуры геликоида:

$$S = 2 \cdot \pi \left[r \sqrt{r^2 + b^2} + b^2 \ln \frac{r + \sqrt{r^2 + b^2}}{b} \right],$$

$$b = \frac{t}{2\pi} = \frac{d \cdot y}{\pi}, \quad L_1 = \sqrt{t + (\pi d)^2}.$$

Показатель степени закрутки $y = H_{180^\circ} / d_{Г}$ есть отношение шага ленты при повороте на 180° к внутреннему диаметру канала.

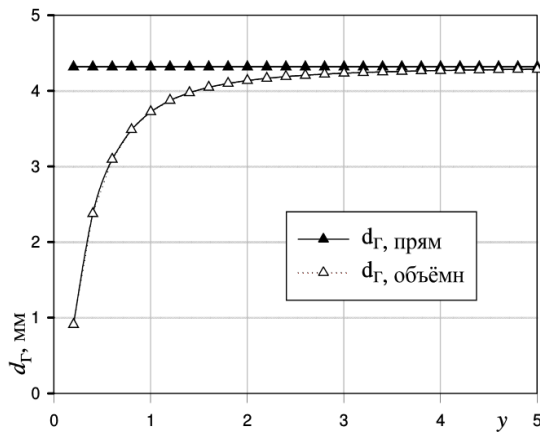


Рис.3. Зависимость величины гидравлических диаметров от степени закрутки для винтовой вставки толщиной 1 мм в трубе диаметром 8 мм.

Зависимость $d_{Г, \text{объемн}}(y)$ на рис. 3 наглядно показывает, что в диапазоне $y < 2$ площадь ленты по отношению к объему, который она замыкает, очень значительна. Следует ожидать, что влияние закрутки именно в этом диапазоне нелинейно; в данном случае это учитывается с помощью рассчитанного $d_{Г, \text{объемн}}(y)$.

3.3. Поправка к скорости потока

Из общих представлений о процессах, происходящих при пузырьковом кипении в канале, ясно, что повышение теплоотдачи при закрутке потока с помощью ленты обусловлено следующими факторами:

- 1) увеличением пристеночной скорости;
- 2) перестройкой потока и появлением вторичных течений и вихрей;
- 3) повышением турбулентности потока.

Базовая модель, используемая в настоящей работе, уже учитывает влияние осевой скорости потока на его структуру в виде зависимостей динамической скорости u^* , коэффициента гидравлического сопротивления $\xi(\rho\omega)$ и периодичности отвода паровых конгломератов $\tau(\rho\omega, u^*)$. Если допустить, что влияние вторичных токов, создаваемых закруткой, не

нарушает физических предположений базовой модели, то следует ожидать, что внесения поправки к $\rho\omega$ будет достаточно для верного описания физической картины при закрутке.

Встречается несколько вариантов внесения изменений в пристеночную скорость потока в связи с наличием закрученной ленты в канале. Так, Gambill и Jaehwan в работах ([10], [11]), а также Tong [12] скорость вдоль стенки трубы рассчитывали по формуле:

$$\omega_{sw} = \omega \cdot \frac{(4y^2 + \pi^2)^{\frac{1}{2}}}{2y}. \quad (6)$$

Авторы Nata, Masuzaki в своей работе [13] вводят поправку к значению $q_{кр}$ в гладкой трубе на основе единственной поправки к скорости в пристеночной области:

$$\omega_{sw} = \omega \cdot \frac{\pi d_0^2}{\pi d_0^2 - 4w\delta} \cdot \frac{(4y^2 + \pi^2)^{\frac{1}{2}}}{2y}. \quad (7)$$

В работе [14] получено выражение для $\omega_{закр}$ на основе анализа закона сохранения импульса, записанного для напряжений и сил, возникающих и действующих в трубе с винтовой вставкой. Опуская теоретические выкладки, результат записывается как:

$$\omega_{закр} = \omega \cdot \frac{1}{\pi + 2} \times \left[\pi \cdot \sqrt{1 + A^2} + A \cdot \left[\sqrt{1 + A^{-2}} + A^{-2} \cdot \ln \left(A + \sqrt{1 + A^2} \right) \right] \right], \quad (8)$$

$$\text{где } A = \frac{2\pi R_0}{H} = \frac{\pi}{2y}.$$

Расчет по каждому из указанных вариантов дает значение $\omega_{закр} / \omega$ в диапазоне 1,34-1,72 при $y = 1$ и в диапазоне 1,06-1,28 при $y = 1$ (см. рис. 4).

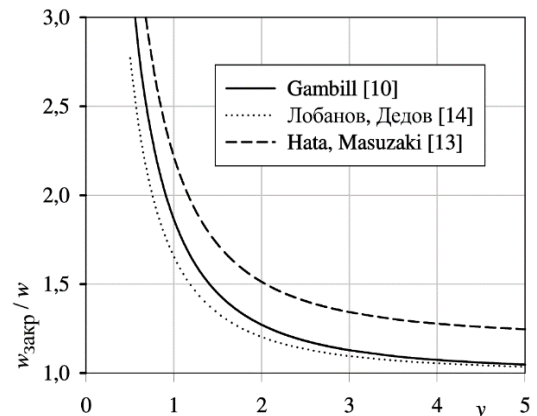


Рис.4. Значение поправок к скорости потока по выражениям (6 — 8) в трубе диаметром 8 мм с вставкой толщиной $\delta = 1$ мм.

В формуле (8), в отличие от указанных выше, учитывается также толщина и ширина ленты, принимаемые как известные параметры. Используя поочередно соотношения (6 — 8) для определения скорости потока при расчете по (3), данная поправ-

ка показала наилучшее соотношение с экспериментальными данными. Она принята в настоящей методике для расчета КТП в каналах с ленточными закрутилителями.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

4.1. Отбор данных по КТП в трубах с закрученной лентой

К первоначальному рассмотрению привлекались все данные по достижению КТП в круглых трубах с винтовыми вставками с равномерным обогревом по длине труб. Поскольку область режимных параметров, которым удовлетворяют принятые ранее допущения базовой модели, ограничена, то к поверочному расчету приняты только точки, удовлетворяющие критериям: $P \geq 1$ МПа и $0 < \varphi < 0,65$.

Полученный массив экспериментальных данных разделен на два: с равномерным обогревом труб по периметру окружности (угол обогрева 360° , 95 точек) и с частичным обогревом (углы обогрева $90, 180, 270$ градусов, всего 92 точки). Кроме того, отдельно рассматривались точки с недогретой и насыщенной жидкостью на входе в исследуемый канал.

Таким образом, для верификации предложенной модели собрана база данных экспериментальных значений $q_{кр}$, включающая суммарно 187 точек из 7 исследований.

В табл. 2 приведен список наборов точек по отдельным исследованиям и крайние значения параметров в этих наборах.

4.2. Анализ результатов расчета

Предложенная методика имеет склонность к занижению значений $q_{кр,закр}$ по отношению к экспериментальным данным $q_{кр}$. Единичные наибольшие отклонения от экспериментальных значений составили +37% и -65% в сторону превышения и занижения $q_{кр,закр}$ соответственно.

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показано на рис. 5 и 6. Из рис. 6 видно, что почти все точки с неравномерным обогревом оказались правее линии равенства расчетных и экспериментальных значений $q_{кр,закр}$, т.е. оказались заниженными. Это может объясняться данными [18]: критическая тепловая нагрузка больше при неравномерном обогреве по окружности трубы, чем при равномерном. При этом зависимости $q_{кр,закр} = f(\beta)$ авторам выявить не удалось. Известные модели и методики расчета $q_{кр,закр}$ не вводят специальных корректирующих факторов в зависимости от угла β .

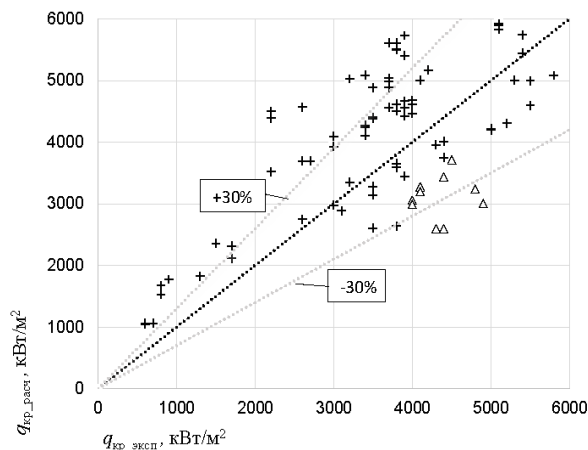


Рис.5. Диаграммы погрешностей расчета $q_{кр,закр}$ для значений до 6000 кВт/м^2 .

«+» — насыщенная жидкость, равномерный обогрев;
 Δ — насыщенная жидкость, равномерный обогрев;
 \bullet — недогретая жидкость, частичный обогрев.

Рисунок 6 аналогичен предыдущему за исключением масштабов осей.

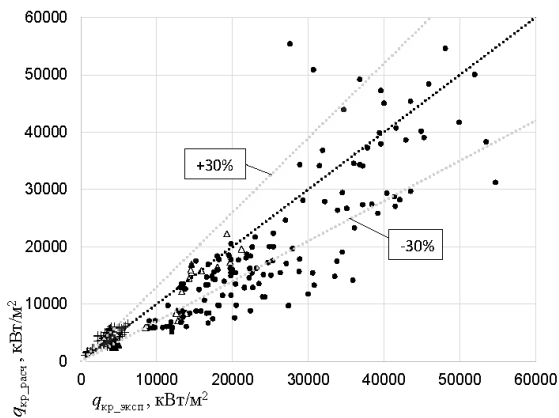


Рис. 6. Диаграммы погрешностей расчета $q_{кр,закр}$ для значений до 60000 кВт/м^2 . Обозначения как на рис. 5.

Среднеквадратичные и среднearифметические отклонения расчета сведены в табл. 1.

Таблица 1. Отклонения расчетных значений КТП от данных экспериментов

Набор точек	Кол-во точек	Средне-квдр. откл.	Средне-ариф. откл.
Деление массива точек по признаку недогретая / насыщенная жидкость			
Недогретая жидкость	125	0,344	-0,106
Насыщенная жидкость	78	0,294	-0,211
Деление массива точек по способу обогрева			
Равномерный обогрев трубы (360°)	110	0,335	-0,125
Неравномерный обогрев ($90, 180, 270^\circ$)	93	0,315	-0,171
Все точки			
Все рассматриваемые	203	0,33	-0,15

Таблица 2. Перечень использованных источников экспериментальных данных для верификации модели

Автор работы	p , МПа	$\rho\omega$, кг/(м ² ·с)	$x_{кр}$	d_r , мм	$q_{кр}$, МВт/м ²	φ , %	Кол-во точек $\beta = 360^\circ /$ $\beta \neq 360^\circ$
Недогретая жидкость							
Viskanta (недогр.) [15]	13,8	680...1360	-0,06...0	8	4,0...4,9	16...34	10/0
Araki [16]	1,0...1,49	4060...13980	-0,36...-0,28	7	19,8...39,6	0...27	0/7
Euroatom [17]	1,0...3,6	3000...16000	-0,13...-0,46	10,14,18	16,8...68,6	0...61	0/42
Kinoshita [18]	1,1...1,5	4600...9000	-0,16...-0,24	6	14,3...28,9	1...5	7/31
Inasaka [12]	0,10	6400...11500	-0,06...-0,08	6	7,3...14,1	1...4	
Малаховский [19]	1,0	1100...9900	-0,22...-0,31	4	11,4...51,0	0...10	0/12
Насыщенная жидкость							
Кисина [20]	14,7...20,1	2030...2800	0,22...0,44	11,14	0,8...1,7	59...63	11/0
Viskanta (насыщ.) [15]	13,8	680...2700	0,01-0,25	8	2,2...5,0	27...64	35/0
Mayinger [21]	6,8...9,8	2340...3590	0 – 0,15	7	3,5...6,2	43...65	32/0
Диапазоны значений и количество точек по всем перечисленным источникам							
-	1,0...20,1	680...16000	-0,36...0,44	4...18	2,2...68,6	0...65	110/93

Согласно данным табл. 2, методика показывает отличную точность расчета значений $q_{кр,закр}$ в приведенных выше диапазонах расчетных параметров. Почти незаметна зависимость отклонений от угла обогрева и состояния жидкости.

Соотношение $q_{кр,закр} / q_{кр}$, указывающее на «задержку» наступления КТП в трубах со спиральной вставкой по сравнению с гладкими каналами при одних и тех же режимных параметрах, по результатам расчетов по [1] и по настоящей методике составило от 1,1 до 1,4. Эти данные согласуются с результатами абсолютного большинства исследований по кипению в трубах с закрученной вставкой, например, [22]. Однако, часть исследователей расширяет диапазон $q_{кр,закр} / q_{кр}$ до 1,7 при высоких массовых скоростях.

5. СРАВНЕНИЕ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ МЕТОДИКАМИ

Для объективной оценки значимости разработанной модели были проведены расчеты по другим известным методикам, предназначенным для оценки кризиса теплоотдачи в каналах с ленточными завихрителями. Ввиду большого количества научной литературы на данную тему, этот раздел не может претендовать на полный обзор существующих методик и подходов. Представлены результаты расчетов по данным наиболее цитируемых работ или дающих наименьшую погрешность при расчете.

Перечень методик дан в табл. 3.

Таблица 3. Перечень исходных данных для расчета КТП в каналах с ленточными завихрителями

Методика	Ограничения для расчета согласно данным используемых работ						
	P , МПа	$\rho\omega$, кг/(м ² ·с)	$x_{кр}$	d_r , мм	y	L_r / d	Примечание
Круг, Кузма-Кичта (1) [6]	0,1...13,8	200...39000	-0,45...0,9	-	1...12,3	1,75...88	обобщающая формула
Круг, Кузма-Кичта (2) [6]	0,1...18	200...39000	-0,45...0,9	-	1...12,3	1,75...250	$0,45 < x_{кр} < 0,9$
Inasaka [23]	0,1...3,81	-	-	3,45...10,2	2,08...∞	-	$4,5 < \omega, \text{ м/с} < 47,5$
Koski [24]	6,9...13,8	700...6000	-	3...10	-	-	-
Drizius [25]	0,4...1,4	4000...25000	-	1,6	1...5	-	принято $0 < d_r < 10$
Schlosser [26]	6,9...13,8	700...6000	-	3...10	-	-	-
Настоящая работа	1...22	-	-	-	-	-	$0 < \varphi < 65\%$

Из табл. 3 видно, что настоящая работа имеет наименьшее количество критериев отбора точек, но в то же время является единственной, использующей в качестве критерия истинное объемное паро-

содержание. Данный факт обуславливается физическими предположениями, выдвинутыми при разработке модели, и не является недостатком или преимуществом.

Значение среднеарифметической и среднеквадратичной ошибок и количество расчетных точек (согласно ограничениям, из таблицы выше) указано в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета по известным методикам с учетом ограничений по расчетным точкам

Методика	Средне-арифм. ошибка, %	Средне-квадр. ошибка, %	Кол-во точек для расчета
Круг, Кузма-Кичта (1) [6]	1	21	535
Круг, Кузма-Кичта (2) [6]	22	66	608
Inasaka [23]	-17	30	263
Koski [24]	-98	127	87
Drizius [25]	147	187	210
Schlosser [26]	-129	172	87
Настоящая работа	-15	33	203

Анализ данные табл. 4, приводит к выводу о том, что предлагаемая методика обеспечивает наибольшую точность расчета в пределах ограничений по давлению и паросодержанию, конкурируя по величине ошибки расчета только с работой Inasaka или с обобщающей формулой Круга, Кузма-Кичта.

6. ВЫВОДЫ

Представлена новая методика расчета кризиса теплоотдачи в каналах с ленточными завихрителями на основе существующей методики расчета КТП для пузырькового режима кипения.

Низкое среднеквадратичное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений подтверждает достоверность принятой за основу физической модели и физические обоснования принятых поправок. Характер отклонений от экспериментальных значений указывает на возможность внесения уточнений, связанных с особенностями гидро- и термодинамических условий при кипении в канале с закрученной лентой. В особенности это касается поведения методики при высоких тепловых потоках и массовых скоростях.

Обзор экспериментальных работ показал, что заслуживают внимания методы повышения КТП, связанные с изменением условий обогрева: неравномерный обогрев по длине, по окружности канала, в т. ч. обогрев половины и четверти окружности канала; теоретических наработок по данной теме недостаточно. То же можно сказать о данных по структуре закрученного потока при разных режимных параметрах.

Предложенный в работе механизм определения наступления кризиса в закрученных потоках дает вполне удовлетворительный результат в широком диапазоне давлений (для воды $p = 1 \div 22$ МПа), не имея ограничений по остальным режимным параметрам, кроме истинного объемного паросодержания ($\varphi = 0 \div 65$ %), тем самым имея значительное

преимущество перед другими рассмотренными методиками.

Дальнейшее развитие теоретических исследований, посвященных разработке достоверных физических моделей по данной теме, во многом зависит от появления новых экспериментальных работ по кризису теплового потока.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КТП — кризис теплового потока;
 q — критический тепловой поток, кВт/м²;
 d_0 — отрывной диаметр парового пузыря, м;
 d — диаметр канала, м;
 F — площадь поперечного сечения канала, м²;
 P — давление, МПа, или смоченный периметр канала, м;
 r — теплота парообразования воды, Дж/кг;
 L — длина спирали ленты, м;
 L/d — относительная длина нагрева канала, безразм.;
 S — площадь поверхности закрученной ленты, м²;
 T — температура насыщения, К;
 t — шаг ленты при повороте ее на 360°, м;
 u_* — динамическая скорость потока, м/с;
 w — ширина ленточной вставки, м;
 x — относительная энтальпия в сечении потока, безразм.;
 y — степень закрутки ленты, безразм.;
 φ — истинное объемное паросодержание, %;
 β — «угол обогрева» канала, градусы;
 δ — толщина, м;
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 τ — временной масштаб турбулентности, с;
 φ — объемное паросодержание, б/разм;
 $\rho\omega$ — массовая скорость, кг/(м²·с);
 ρ — плотность, кг/м³;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 ω — осевая скорость потока в прямой трубе (в пристеночной области для закрученного потока), м/с.

Индексы:

' , " - жидкость и пар соответственно;
кр — критический (в сечении кризиса);
пл — пленка;
объемн — объемный;
расч — расчетный;
эксп — экспериментальный;
закр — в условиях закрученного потока ;
г — гидравлический;
01, 02 — отрывной диаметр парового пузыря в области «малых» и «больших» скоростей соответственно;
s — в условиях насыщения;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zakharov S., Pavlov Yu.** A procedure for predicting the critical heat flux with the nucleate boiling of liquids in channels // J. Thermal engineering. 2004. Vol. 51. P. 246-251.
2. **Goeneveld D.C., Shan J.Q., Yang J., etc.** The 2006 CHF look-up table // Nuclear Engineering and Design. 2007. №237. P. 1909-1922.
3. **Hogenes J., Hanratty T., etc.** The use of multiple wall probes to identify coherent patterns of the viscous wall region // J. fluid mech. 1982. №124.

4. **Ибрагимов М. Х., Субботин В. И., В. П. Бобков** и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах // М.: Атомиздат, 1978.
5. **Arment, Todreas** и др. Critical heat flux and pressure drop for tubes containing multiple short-length twisted-tape swirl promoters // Nuclear Engineering and Design. №257. 2012.
6. **А.Ф. Круг, Ю. А. Кузма-Кичта** и др. Обобщение экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока // Труды 4-й РНКТ. 2006. Т. 6.
7. **Кутателадзе С. С.** Теплопередача при конденсации и кипении // М.: МашГиз, 1952.
8. **Lopina, Bergles** и др. Heat transfer and pressure drop in tape-generated swirl flow of single-phase water // Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME. 1969. №3.
9. **Ягов В. В., Пузин В. А.** Кризис кипения в условиях вынужденного движения недогретой жидкости // Теплоэнергетика, №10, 1985.
10. **W. Gambill, R. Bundy.** Heat transfer, burnout, and pressure drop for water in swirl flow tubes with internal twisted tapes // Oak Ridge National Laboratory, Preprint at Chemical Engineering Progress Symposium Series. 1961. Vol. 57. №32.
11. **Park, Jaehwan.** A study on the effect of the twisted tape on CHF enhancement in the circular tube with R-134a // Masters thesis. – Korea Advanced Institute of Science and Technology. 2008.
12. **F. Inasaka, H. Nariai.** Evaluation of subcooled critical heat flux correlations for tubes with and without internal twisted tapes // Nuclear Engineering and Design. 1996. № 16.
13. **K. Hata, S. Masuzaki.** Critical Heat Fluxes of Subcooled Water Flow Boiling in a Short Swirl Tube // NURETH13 Conference Paper. 2009.
14. **Лобанов И. Е., Дедов А. В.** Теоретическое и экспериментальное исследование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с применением ленточных закручивателей потока // Альманах совр. науки и образования. 2010. №10.
15. **Viskanta R.** Critical Heat Flux for water in swirling flow // Nuclear Science Engineering. 1961. №10. P. 202-203.
16. **Araki M., Sato K., Suzuki S. and Akiba M.** Critical-heat-flux experiment on the screw tube under one-sided-heating conditions. // Fusion Technology. 1996. №29. P. 519-528.
17. **Schlosser J., Boscaro J. and Fabre J.** Critical heat flux of water subcooled flow in one-side heated swirl tubes // Int. J. Heat Mass Transfer. 1999. №31. P. 287-301.
18. **Kinoshita H., Nariai H., Inasaka F., Yoshida T.** Study on the Mechanism of Critical Heat Flux Enhancement for the Subcooled Flow Boiling in Tube with Internal Twisted Tape under Non-Uniform Heat Condition // Jap. Soc. Mec. Eng. B. 1996. №62 P. 1459-1466.
19. **Малаховский С.А.** Теплообмен при кипении в условиях вынужденного течения закрученного потока // Дисс. к.т.н. МЭИ. Москва. 2008.
20. **Кисина В.И., Леонтьев А.И.** Кризис теплообмена при подъемном движении пароводяной смеси в вертикальных трубах с винтовыми вставками // Теплоэнергетика. 2006. №1. С. 65-70.
21. **Mayinger F., Schad O. and Weiss E.** Untersuchung der Kritischen Heizflächenblastung bei Seidendem Wasser.: Final Report // Nuremburg: Maschinenfabrik Augsburg-Nuernberg A. G. (MAN). 1966. - Report No. 09.03.01.
22. **Araki M., Dairaku M.** и др. Burnout experiments on the externally-finned swirl tube for steady-state and high-heat flux beam stops // Fusion Engineering and Design. 1989. Vol. 9.
23. **Inasaka F., Naria H., Ishikawa A. and Fujisaki W.** Critical Heat Flux of Subcooled Flow Boiling in Tubes with Internal Twisted Tape // Proceeding of the 1991 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference. 1991. P. 65-70.
24. **J.A. Koski.** Thermal-hydraulic considerations in the surface contouring of a limited head for Tore Supra // 7th Proc. Nuclear Thermal Hydraulics, ANS Winter Meeting. 1991.
25. **M.R. Drizius, R.K. Skema, A.A. Slanciauskas.** Boiling crisis in swirled flow of water in pipes // Heat Transfer Sov. Res. 10 (4). 1978. P. 1–7.
26. **J. Schlosser, A. Cardella, P. Massmann, P.** и др. Thermal-hydraulic tests on net divertor targets using swirl tubes // 7th Proc. Nuclear Thermal Hydraulics, ANS Winter Meeting. 1991.

В.О. Киндра, И.Б. Капланович, М.В. Смирнов, В.Ю. Наумов, А.С. Зонов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЗАМКНУТОГО ЦИКЛА С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена термодинамическим исследованиям полужакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива. Подробно описаны подходы к моделированию и проведению параметрической оптимизации. Приведены зависимости КПД нетто кислородно-топливного энергетического комплекса от давления на выхлопе углекислотной турбины и начального давления паровой турбины. Представлена оценка снижения тепловой экономичности производства электроэнергии вследствие потерь на охлаждение. Установлено, что максимальный КПД нетто полужакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива и одноконтурным котлом-утилизатором, равный 52,5 %, при начальной температуре и давлении, равных 1400 °С и 60 бар, достигается при давлении на выхлопе углекислотной турбины, равном 0,5 бар, и начальном давлении паровой турбины, равном 90 бар. В случае учета потерь на охлаждение максимальный КПД нетто, равный 47,76 %, достигается при давлении на выхлопе углекислотной турбины, равном 1 бар, и начальном давлении паровой турбины, равном 90 бар.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия загрязнение атмосферы приобрело глобальный характер. При этом около четверти антропогенного углекислого газа производится энергетическим сектором [1]. Большие объемы выбросов диоксида углерода в атмосферу усугубляют проблему парникового эффекта, решение которой одна из важнейших задач промышленно развитых стран.

В настоящее время на тепловых электрических станциях успешно применяются методы борьбы с оксидами азота и серы [2-4]. Однако предотвращение выбросов углекислого газа, образующегося в больших количествах при сжигании органического топлива, до сих пор вызывает трудности [5].

Важной задачей энергетической стратегии России на период до 2035 года является разработка и принятие мер по снижению выбросов вредных веществ при выработке электрической и тепловой энергии. Достигнуть ее можно за счет перехода на экологически безопасные источники энергии на органическом топливе: кислородно-топливные циклы, использующие чистый кислород для сжигания органического топлива, с последующим захоронением диоксида углерода.

Простейшей схемой среди кислородно-топливных циклов обладает цикл SCOC-CC [6]. Он представляет собой кислородно-топливный полужакрытый газотурбинный цикл с утилизацией теплоты выхлопных газов углекислотной турбины в котле-утилизаторе, производящем пар для паротурбинной установки (рисунок 1).

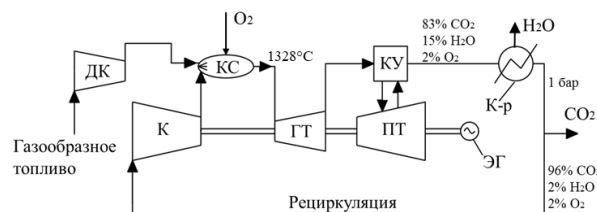


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема цикла SCOC-CC.

В камеру сгорания подается газообразное топливо и кислород высокой чистоты в стехиометрическом соотношении. Поскольку температура факела при горении подобной смеси может достигать 3500°C, в камеру сгорания подается также третий поток – смесь с большим содержанием CO₂, служащая для ограничения максимальной температуры. Образующийся поток газов, примерно на 80% состоящий из CO₂, при температуре 1300-1400°C направляется в газовую углекислотную турбину, приводящую во вращение электрогенератор. После расширения в углекислотной турбине рабочая среда поступает в котёл-утилизатор. За счёт утилизации теплоты продуктов сгорания на выходе турбины в котле-утилизаторе генерируется перегретый пар, питающий паровую турбину, также служащую для выработки электроэнергии. Дымовые газы на выходе из котла-утилизатора направляются в конденсатор, в котором протекает процесс сепарации большей части воды за счёт её конденсации при давлении, близком к атмосферному. Затем часть потока углекислого газа выводится из цикла с целью последующего секвестирования. Остальной поток, состоящий преимущественно из диоксида углерода, подвергается рециркуляции, поступая на вход компрессора.

Исследование влияния начальных параметров цикла SCOC-CC на эффективность производства электроэнергии подробно изложено в [7,8]. Согласно результатам исследований, изложенным в [9],

при начальной температуре рабочей среды углекислотной турбины, равной 1400°C, оптимальное значение начального давления равно 60 бар, КПД нетто цикла равно 46 %, а суммарный относительный расход хладагента – 21 %.

Поскольку цикл является полужакрытым минимальное давление не обязательно должно равняться атмосферному. С одной стороны, увеличение минимального давления приводит к уменьшению габаритов турбомашин и котла-утилизатора, с другой - к увеличению толщин стенок энергетического оборудования.

Исследования влияния минимального давления на эффективность полужакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива показали, что его увеличение с 1 до 10 бар приводит к изменению КПД на всего лишь на 0.5% [9]. Однако важной проблемой при повышении давления является организация охлаждения лопаток турбины. С одной стороны, увеличенное рабочее давление снижает объемный расход, а, следовательно, и площадь поверхности, которую необходимо охладить. С другой стороны, увеличиваются коэффициенты теплоотдачи с обеих сторон охлаждаемых каналов, а, следовательно, и суммарный тепловой поток через стенки лопатки. Это, в свою очередь, приводит к увеличению перепада температур по толщине лопатки, уменьшая допустимый рост температуры охладителя во внутренних охлаждающих каналах. В результате для снятия такого же теплового потока необходим больший расход хладагента. Перечисленные факторы подтверждает тот факт, что увеличивать давление на выхлопе углекислотной турбины свыше 1 бар нецелесообразно. В свою очередь, исследования влияния снижения давления на выхлопе углекислотной турбины ниже атмосферного на тепловую экономичность цикла SCOC-CC отсутствуют.

Целью настоящего исследования является повышение тепловой экономичности цикла SCOC-CC за счет параметрической оптимизации тепловой схемы. Для ее достижения поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать математическую модель цикла SCOC-CC, позволяющую проводить термодинамические исследования.
2. Исследовать влияние давления на выхлопе углекислотной турбины на тепловую экономичность цикла SCOC-CC.
3. Исследовать влияние начального давления паровой турбины на тепловую экономичность цикла SCOC-CC.
4. Оценить влияние потерь с охлаждением углекислотной турбины на тепловую экономичность цикла SCOC-CC.

2. МЕТОДИКА

2.1. Методика и исходные данные для моделирования цикла SCOC-CC

Для параметрической оптимизации цикла SCOC-CC разработана математическая модель в программном пакете AspenONE (рисунок 2). Тепловая схема включает в себя такие элементы как углекислотный компрессор, кислородно-топливная камера сгорания, углекислотная газовая турбина, котел-утилизатор, охладитель-сепаратор, многоступенчатый компрессор с промежуточным охлаждением, топливный и кислородный компрессоры, паровая турбина, конденсатор, насосы, деаэрактор. Особенностями данной схемы является отсутствие забора потоков хладагента для углекислотной турбины, а также одноконтурная схема котла-утилизатора

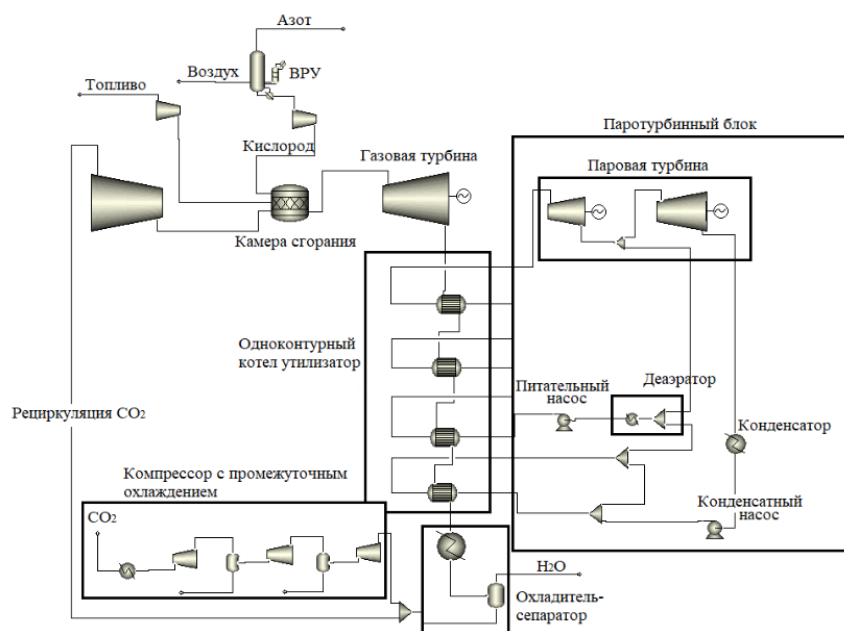


Рис. 2. Схема цикла в Aspen One.

Расчет теплофизических свойств многокомпонентной рабочей среды производился с использованием базы данных NIST REFPROP. В качестве топлива использовался чистый метан при давлении и температуре, равных 15 °С и 7 бар соответственно. В качестве окислителя рассматривался чистый кислород, затраты энергии на производство которого

выбраны равными 900 кВт/кг/с согласно рекомендациям, изложенным в [10]. Давление удаляемого на захоронение диоксида углерода выбрано равным 100 бар, а температура – 28°С [11]. Исходные данные для моделирования тепловой схемы цикла SCOC-CC представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования тепловой схемы цикла SCOC-CC

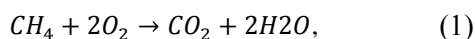
Параметр	Единица измерения	Значение
Температура на входе в углекислотную турбину	°С	1400
Давление на входе в углекислотную турбину	бар	60
Расход рабочей среды на входе в компрессор	кг/с	100
Температура топлива	°С	15
Давление топлива	бар	7
Низшая теплота сгорания топлива	кДж/кг	50025
Давление топлива на выходе из дожимного компрессора	бар	60
Температура O ₂ , производимого воздухоразделительной установкой	°С	30
Давление O ₂ , производимого воздухоразделительной установкой	бар	10
Удельные затраты энергии на производство O ₂	кВт/кг/с	900
Давление топлива на выходе из дожимного компрессора	бар	60
Температура на входе в паровую турбину	°С	560
Давление на выходе из паровой турбины	бар	0,05
Давление в конденсаторе	бар	0,05
Давление среды за конденсатным насосом	бар	1,44
Температура на входе в газовый подогреватель конденсата	°С	55
Недогрев температуры на выходе из газового подогревателя конденсата до температуры насыщения в деаэраторе	°С	14
Давление в деаэраторе	бар	1,26
Недогрев в точке пинча для поверхностей нагрева котла-утилизатора	°С	10
Разница между температурой рабочей среды на выходе из экономайзера и температурой насыщения в барабане	°С	10
Давление захоронения CO ₂	бар	100
Температура захоронения CO ₂	°С	28
Внутренний относительный КПД углекислотной турбины	%	89
Внутренний относительный КПД компрессора	%	91
КПД электрогенератора	%	99
Внутренний относительный КПД паровой турбины	%	87
Механический КПД	%	99

При расчете углекислотных компрессоров и турбин использовался метод изоэнтропийного рас-

ширения, согласно которому задавались следующие исходные данные: степень сжатия/расширения тур-

бомашины, механический и внутренний относительный КПД турбомашины. Вводными данными для расчета насосов были внутренний относительный, механический КПД и степень сжатия среды в насосе.

Камера сгорания моделировалась как стехиометрический реактор. Исходными данными являлись: расход топлива, рабочей среды и кислорода, уравнение реакции горения метана в кислороде (1).



Поскольку экспериментальные данные об эффективности процесса горения кислородно-топливной смеси в среде избыточного диоксида углерода отсутствуют, то потери теплоты в атмосферу не учитывались, а коэффициент полноты сгорания топлива принят равным 1.

Для оценки расходов на охлаждение теплонапряженных лопаток углекислотной турбины использовались подходы, описанные в [12]. При её моделировании предполагалось, что общее количество ступеней равно 7, среди которых 4 ступени выполнены охлаждаемыми [13]. При этом распределение теплоперепадов по ступеням равномерное.

Схема расположения охлаждаемых и неохлаждаемых отсеков углекислотной турбины, представленная на рисунке 3, предполагает, что поток хладагента, отобранный за компрессором, подается в каналы системы охлаждения сопловых и рабочих лопаток, проходя по которым нагревается и выбрасывается в проточную часть через отверстия пленочного охлаждения и щелевое отверстие в области выходной кромки. Снижение эффективности проточной части турбины вследствие смешения потоков хладагента и рабочей среды оценивалось согласно методике, описанной в [13].

2.2. Подход к параметрической оптимизации цикла SCOC-CC

Параметрическая оптимизация цикла SCOC-CC производилась с использованием метода перебора.

Фиксированными параметрами для всех расчетных случаев являлись начальные температура и давление углекислотного цикла, равные 1400°C и 60 бар. Варьируемыми параметрами являлись давление на выходе углекислотной турбины и начальное давление паровой турбины. Для исследований выбрано 35 сочетаний расчетных параметров, проиллюстрированные на рисунке 4.

Предельная влажность на выходе паровой турбины выбрана равной 13% согласно рекомендациям, изложенным в [14].

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Результаты параметрических исследований, представленные на рисунке 5, позволили установить, что увеличение начального давления паровой турбины на 1 бар сопровождается средним приростом КПД нетто цикла SCOC-CC на 0,016%. При этом допустимая влажность пара на выходе паровой турбины (сплошная линия) наблюдается для начальных давлений не выше 90 бар. При увеличении давления на входе в паровую турбину выше 90 бар влажность пара превышает 13 % (пунктирная линия). Максимальный КПД, равный 52,5%, достигается при давлении на выходе углекислотной турбины, равном 0,5 бар, и начальном давлении паровой турбины, равном 90 бар.

Рост КПД нетто цикла SCOC-CC с увеличением давления паровой турбины обусловлен тем, что дополнительная вырабатываемая паровой турбиной электрическая мощность превышает дополнительный прирост мощности собственных нужд. В частности, увеличение начального давления паровой турбины на 1 бар в рассматриваемом диапазоне сопровождается ростом вырабатываемой паровой турбиной электрической мощности на 0,03 МВт (рисунок 6) и увеличением потребляемой питательным насосом электрической мощности на 0,005 МВт (рисунок 7).

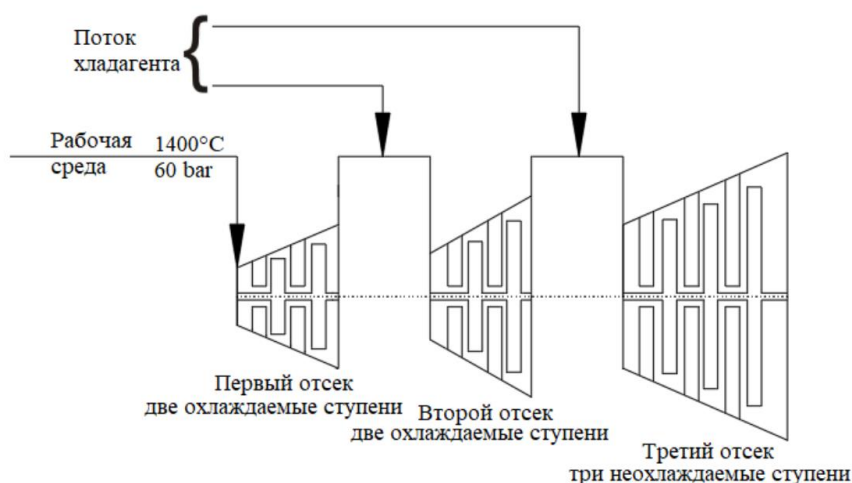


Рис. 3. Схема расположения охлаждаемых и неохлаждаемых отсеков углекислотной газовой турбины

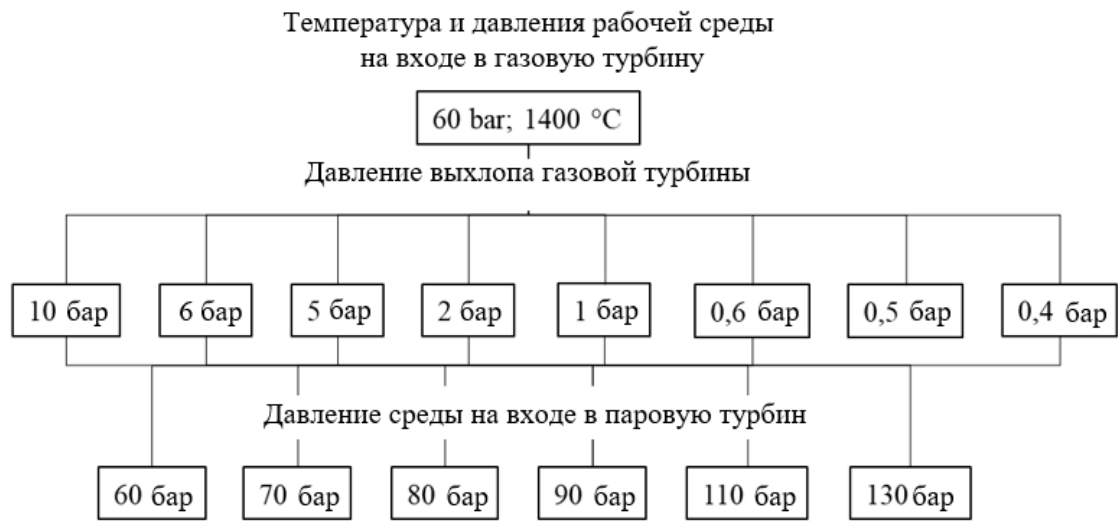


Рис. 4. Сочетания расчетных параметров.

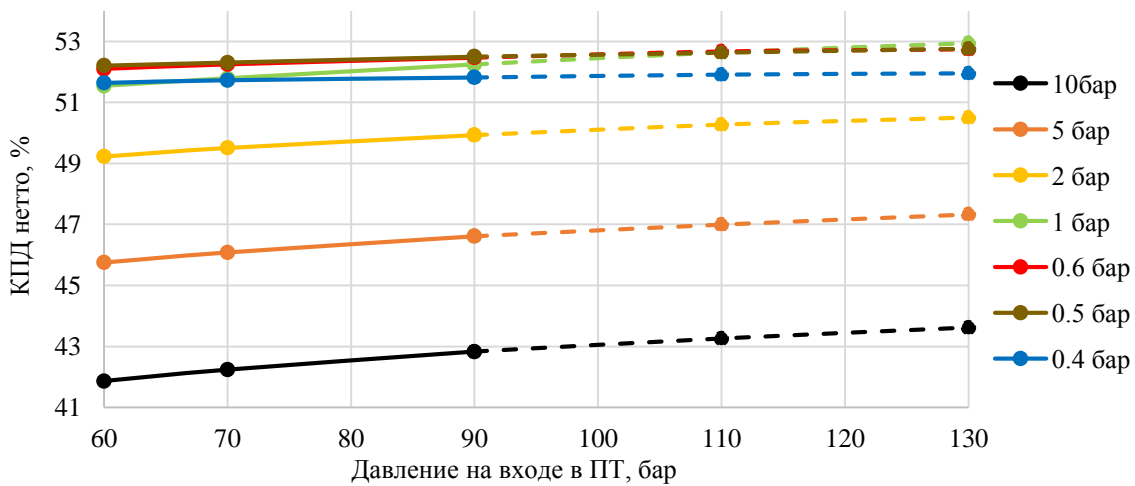


Рис. 5. Влияние давления пара на входе в паровую турбину на КПД нетто цикла SCOC-CC при различных давлениях рабочей среды на выходе из углекислотной турбины.

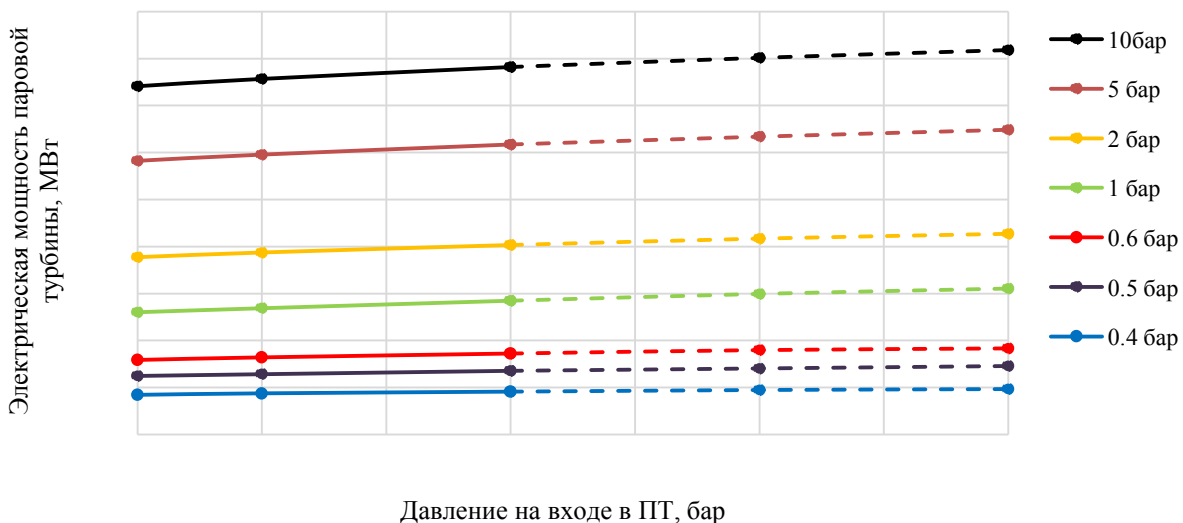
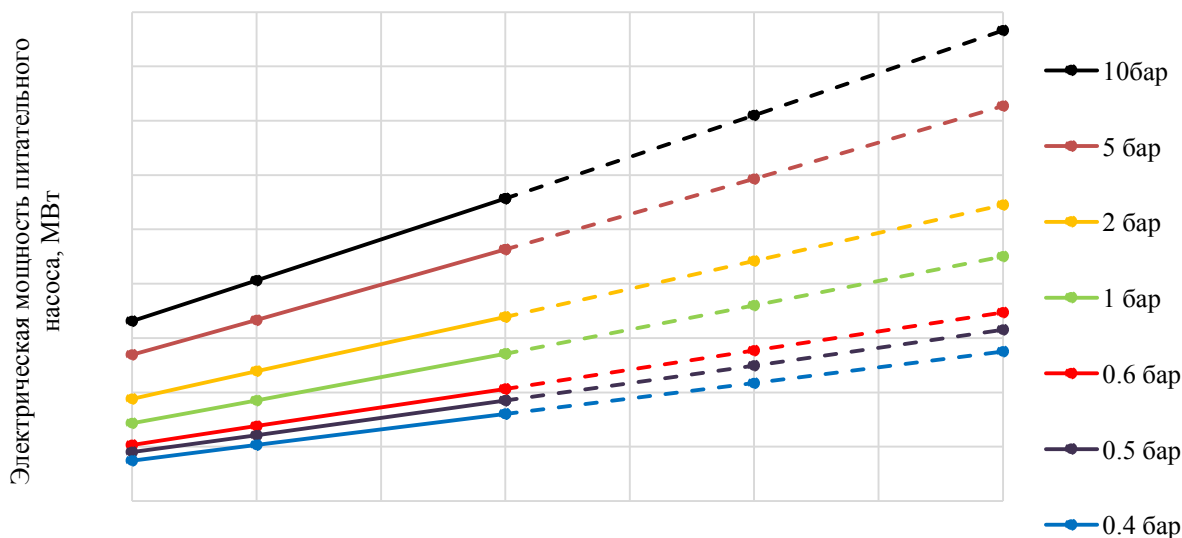


Рис. 6. Влияние давления пара на входе в паровую турбину на вырабатываемую ей электрическую мощность при различных давлениях рабочей среды на выходе из углекислотной турбины.



Давление на входе в ПТ, бар

Рис. 7. Влияние давления пара на входе в паровую турбину на потребляемую электрическую мощность питательного насоса при различных давлениях рабочей среды на выходе из углекислотной турбины.

Увеличение давления на выхлопе углекислотной турбины свыше оптимального значения, равного 0,5 бар при начальном давлении паровой турбины, равном 90 бар, на 0,1 бар приводит к снижению КПД нетто цикла SCOC-CC на 0,1%. В свою очередь, уменьшение давления на выхлопе турбины сопровождается падением эффективности на 0,7%. Подобная тенденция обусловлена тем, что увеличение противодавления выше оптимального значения на 0,1 бар приводит к снижению мощности, вырабатываемой турбиной, на 0,8% вследствие уменьшения располагаемого теплоперепада, и в тоже же время к уменьшению мощности, потребляемой компрессором, на 6,6%. При уменьшении давления на выхлопе турбины ниже оптимального значения на 0,1 бар прирост мощности, вырабатываемой турбиной незначителен, и составляет 1%, тогда как мощность, потребляемая компрессорами, увеличивается на 8%. Таким образом, в результате проведенной оптимизации параметров без учета потерь на охлаждение высокотемпературных элементов удалось установить, что смещение давления на выхлопе углекислотной турбины с 1 бара до 0,5 бар позволяет увеличить КПД нетто на 0,25% (рисунок 8). При этом в данном случае не учитывался факт появления присосов воздуха в охладителе-сепараторе, которые снизит полезный эффект от понижения давления ниже атмосферного уровня.

С учетом потерь, связанных с охлаждением углекислотной турбины, наибольшее значение КПД нетто цикла, равное 47,76 %, достигается при давлении на выхлопе турбины равном 1 бар, тогда как при понижении давления выхлопа до 0,5 бар этот параметр уменьшается до 47,67 %. Это объясняется тем, что выброс низкотемпературного хладагента в проточную часть привел к снижению температуры выхлопных газов с 627 до 538 °С (давление на выхлопе турбины 0,5 бар), и как следствие, снижению начальных параметров рабочей среды парового цикла. Расход пара снизился на 28,4 % температура на входе в турбину уменьшилась с 560 до 538 °С, а давление с 90 бар до 70 бар для обеспечения требуемого уровня влажности за последней ступенью. В тоже время, с учетом потерь на охлаждение, при давлении выхлопа углекислотной турбины равном 1 бар, начальные параметры парового цикла не изменяются, а уменьшение температуры выхлопных газов с 713 до 609 °С приводит лишь к уменьшению расхода пара на 30,0 %. Таким образом, смещение оптимального давления связано с изменением мощности, вырабатываемой паровой частью цикла. Учет охлаждения привел к снижению мощности паровой турбины на 30,6 и 32,3 % при давлении выхлопа равным 1 и 0,5 бар соответственно.



Давление на выходе углекислотной турбины, бар

Рис. 8. Влияние давления на выхлопе газовой турбины на КПД нетто цикла SCOC-CC при давлении на входе в паровую турбину 90 бар.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С использованием программного продукта AspenONE разработана математическая модель полузакрытого цикла с кислородным сжиганием топлива и одноконтурным котлом-утилизатором.
2. По результатам параметрических исследований установлено, что максимальный КПД нетто цикла SCOC-CC с одноконтурным котлом-утилизатором для начальной температуры газовой турбины, равной 1400 °С, достигается при давлении на выхлопе углекислотной турбины, равной 0,5 бар и начальном давлении паровой турбины, равном 90 бар.
3. Увеличение начального давления паровой турбины в диапазоне от 60 до 130 бар на 1 бар сопровождается приростом КПД нетто на 0,016%, что обусловлено увеличением располагаемого теплоперепада турбины.
4. Отклонение давления на выхлопе углекислотной турбины от оптимального значения, равного 0,5 бар, на 0,1 бар сопровождается снижением КПД нетто цикла на 0,1-0,7 %. Это вызвано как увеличением потребляемой мощности на собственные нужды, так и снижением мощности, вырабатываемой турбиной.
5. В случае учета потерь на охлаждение высокотемпературных элементов изменение давления на выхлопе углекислотной турбины от 1 до 0,5 бар приводит к снижению КПД нетто на 0,08 %. Это обусловлено тем, что часть среды, сжимаемой в компрессоре, направляется в систему охлаждения газовой углекислотной турбины минуя камеру сгорания, что в совокупности с уменьшением противодействия приводит к снижению температуры выхлопных газов. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость снижения начальных параметров парового цикла, что приводит к значительному уменьшению мощности, вырабатываемой паровой частью цикла.

Благодарность

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Climate change 2001: the scientific basis** / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al.; Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2001. 881 p.
2. **Wang M., Lawal A., Stephenson P., Sidders J. and Ramshaw C.** Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review // *Chemical Engineering Research and Design*. London, 2011. № 89. P. 1609-1624.
3. **Oexmann J., Kather A., Linnenberg S. and Liebenthal U.** Post-combustion CO₂ capture: chemical absorption processes in coal-fired steam power plants // *Greenhouse Gases: Science and Technology*. New York, 2012. № 2. P. 80-98.
4. **Zhao L., Riensche E., Menzer R., Blum L. and Stolten D.** A parametric study of CO₂/N₂ gas separation membrane processes for post-combustion capture // *Journal of Membrane Science*, London, 2008. № 325. P. 284-294.
5. **Nejat P., Jomehzadeh F., Taheri M., Gohari M. and Majid M.** A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries) // *Renewable and sustainable energy reviews*, Londond, 2015. № 43. P. 843-862.
6. **O. Bolland, S. Saether.** New concepts for natural gas fired power plants which simplify the recovery of carbon dioxide // *Energy Conversion and Management*, 1992. № 33. P. 467-475.
7. **Thorbergsson E. and Grönstedt T.** A thermodynamic analysis of two competing mid-sized oxyfuel combustion combined cycles // *Journal of Energy*, Zagreb, 2016.
8. **Rogalev A., Kindra V. and Osipov S.** Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid // *17th Conference of Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Mechanics*. Pilsen, 2018. 020020.
9. **Chiesa P. and Lozza G.** CO₂ emission abatement in IGCC power plants by semiclosed cycles: part a-with oxygen-blown combustion // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Washington, 1999. № 121. P. 635-641.
10. **Rogalev A.N., Kindra V.O., Rogalev N.D., Sokolov V.P. et al.** Methods for efficiency improvement of the semiclosed oxy-fuel combustion combined cycle / *14th International Scientific and Technical Conference on Problems of Energy Systems and Thermal Power Complexes*. Saratov, 2018. 012003.
11. **Allam R., Martin S., Forrest B. et al.** Demonstration of the Allam Cycle: An update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture // *Energy Procedia*. London, 2017. № 114. P. 5948-5966.
12. **Rogalev A., Kindra V., Zonov A., Rogalev N. and Agamirov L.** Evaluation of Bleed Flow Precooling Influence on the Efficiency of the E-MATIANT Cycle / *Mechanics and Mechanical Engineering*, Warsaw, 2018. № 22. P. 593-602.
13. **Rogalev A.N., Grigoriev E.Yu., Kindra V.O. and Rogalev N.D.** Thermodynamic optimization and equipment development for a high efficient fossil fuel power plant with zero emissions / *Journal of Cleaner Production*. London, 2019. № 236. 117592.
14. **Hoznedl M. et al.** Influence of Wet Steam on the Five-Stage Steam Turbine Efficiency / *ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Oslo, 2018.

А.А. Коршикова¹, С.П. Печенкин², П. Н. Борисова²

¹ ООО «Инконтрол», Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ТЭЦ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена математическая модель установки для производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом на базе объекта генерации с паротурбинной установкой теплофикационного типа.

ВВЕДЕНИЕ

Углекислый газ имеет широкое промышленное применение. В химической отрасли CO_2 используется для производства синтетических веществ. В медицине, фармацевтике и пищевой промышленности CO_2 применяют для создания определенной среды, для охлаждения и заморозки. Углекислый газ используют в металлургической, целлюлозно-бумажной отраслях промышленности и в электронике. Характерной особенностью использования CO_2 является его применение в различных фазовых состояниях: в газообразном, жидком и твердом.

Абсорбционно-десорбционный метод производства диоксида углерода выгодно использовать на теплофикационных установках, так как для осуществления процесса необходим греющий пар. Таким образом, появляется возможность повышения эффективности работы как самой ТЭЦ, так и установки получения двуокиси углерода, за счет обеспечения работы основного оборудования ТЭЦ в режимах, близких к номинальным, которые характеризуются пониженными удельными расходами топлива. [1]

1. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЯ ОТ ОБЪЕКТА ГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ТИПА И УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА АБСОРБЦИОННО-ДЕСОРБЦИОННЫМ МЕТОДОМ

2.1. Технологическая схема

На рисунке 1 представлена технологическая схема энергоснабжения потребителя от объекта генерации с паротурбинной установкой теплофикационного типа и установкой для производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом [2].

В представленной структурной схеме производства диоксида углерода рассматривается получение всех видов CO_2 (газообразного, жидкого, твердого).

Однако не всегда требуется объединять производство всех видов товарного CO_2 на одной установке. Поэтому возможны разные комплектации схемы для производства как одного вида CO_2 , так и нескольких.

Рассматриваемая схема энергоснабжения позволяет обеспечивать потребителя электрической энергией, теплом и диоксидом углерода в газообразном, жидком или твердом состоянии.

Основным сырьем для обеспечения работы данного объекта генерации является топливо, используемое для паротурбинной установки, в результате сжигания которого образуются дымовые газы, служащие сырьем для производства диоксида углерода.

Основные энергетические затраты:

- расход воды для отвода тепла от отработавшего пара в конденсаторе;
- расход сетевой воды для теплоснабжения потребителя;
- расход воды для скрубберной системы очистки дымовых газов;
- расход пара в десорбер;
- расход электроэнергии для привода компрессора, насосов и другого вспомогательного оборудования;
- расход охлаждающей воды.

Основные технологические процессы – этапы преобразования энергии первичного сырья в установке, технологическая схема которой приведена на рисунке 1:

- 1) Подготовка топлива на электростанции. Узел подготовки топлива.
- 2) Генерация пара. Котельный агрегат.
- 3) Получение механической работы. Турбина.
- 4) Генерация электроэнергии. Электрогенератор.
- 5) Генерация тепла. Сетевые подогреватели.
- 6) Очистка дымовых газов на входе в установку для производства диоксида углерода. Система скрубберной очистки.
- 7) Абсорбция CO_2 раствором абсорбента. Абсорбер.
- 8) Десорбция CO_2 из насыщенного раствора абсорбента с подводом потока пара. Десорбер.
- 9) Охлаждение полученной парогазовой смеси CO_2 , воды и абсорбента. Холодильник газа.

10) Очистка и получение газообразного CO_2 , направляемого потребителю. Блок очистки газообразного CO_2 .

11) Получение жидкого CO_2 , направляемого потребителю. Система компрессоров.

12) Получение твердого CO_2 , направляемого потребителю. Система дросселей.

13) Аккумулирование диоксида углерода в газообразном, жидком или твердом виде.

14) Транспортировка диоксида углерода потребителю в газообразном, жидком или твердом виде.

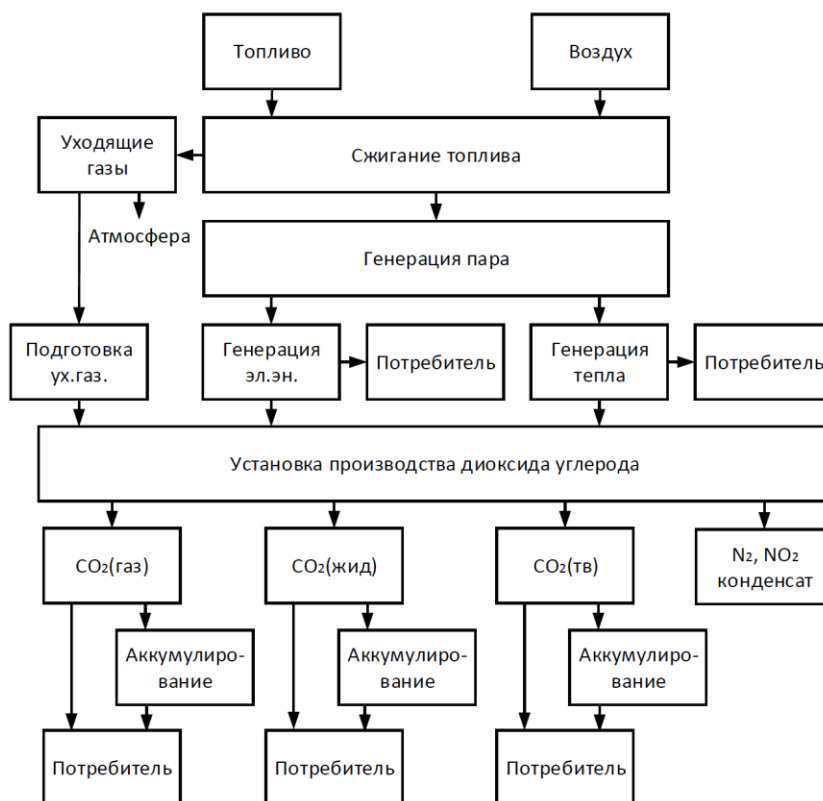


Рис. 1. Технологическая схема энергоснабжения потребителя от объекта генерации с паротурбинной установкой теплофикационного типа и установкой производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом.

2.2. Установка для производства диоксида углерода (газообразного, жидкого и твердого) абсорбционно-десорбционным методом

Принцип получения промышленной двуокиси углерода [3].

Дымовые газы по линии подаются на установку производства диоксида углерода, проходят блок охлаждения и промывки от примесей, содержащий многоступенчатую скрубберную систему. Очищенные и охлажденные дымовые газы подаются в абсорбер, где происходит абсорбция из дымовых газов раствором абсорбента. Оставшиеся не поглощенными азот, диоксид азота удаляются в атмосферу, а насыщенный диоксидом углерода раствор абсорбента подается в десорбер, где происходит десорбция CO_2 из раствора абсорбента путем нагрева и кипячения водяным паром, поступающим в десорбер. Парогазовая смесь диоксида углерода, воды и абсорбента подается в холодильник газа, в качестве которого применяют кожухотрубчатые и элементные аппараты. В результате охлаждения парогазовой смеси образуется конденсат вторичных водяных паров, насыщенный газообразным CO_2 и содержащий абсорбент. Для восстановления первоначальной концентрации и количества раствора конденсат возвращается в абсорбер. После охлаждения

влажный CO_2 направляется на очистку и сжатие в компрессоре в блок очистки, где газ промывается в промывных колонах раствором марганцовокислого калия и водой. Подготовленный газообразный CO_2 направляется потребителю. Также возможно получение жидкого CO_2 , для этого газообразный диоксид углерода отводится в блок ожижения, где сжимается до давления конденсации при отводе тепла в окружающую среду. Жидкий CO_2 направляется потребителю в виде транспортных емкостей (баллонов, изотермических цистерн). Для получения сухого льда (твердого CO_2) необходимо подать жидкий диоксид углерода в специальный блок, где после ступенчатого дросселирования получающуюся при этом снегообразную массу уплотняют в готовый сухой лед.

Процесс получения диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом состоит из следующих операций:

- очистка дымовых газов;
- абсорбция CO_2 раствором абсорбента;
- десорбция CO_2 из насыщенного раствора абсорбента;
- охлаждение полученной парогазовой смеси CO_2 , воды и абсорбента;
- очистка и получение газообразного CO_2 , направляемого потребителю;

- получение жидкого CO₂, направляемого потребителю;
- получение твердого CO₂, направляемого потребителю.

2.3. Математическая модель системы энерго-снабжения потребителя от объекта генерации на базе паротурбинной установки теплофикационного типа и установки для производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом

Принятые условия:

- вид используемого топлива и его параметры;
- тип и характеристики ПТУ теплофикационного типа;
- график рабочих нагрузок ПТУ;
- характеристики установки для производства диоксида углерода:
 - расход и состав дымовых газов;
 - параметры дымовых газов (давление, температура, влажность);
 - тип абсорбента;
 - расход и параметры пара на десорбер;
 - производительность установки по получению газообразного, жидкого и твердого диоксида углерода;
 - электрическая мощность привода компрессора блока ожижения;
 - характеристики основного и вспомогательного оборудования.

Принятые ограничения:

- на установку для производства диоксида углерода направляются неостребованные потребителями электроэнергия и пар из отборов турбины, получаемые в результате обеспечения работы ПТУ в номинальном режиме;
- установка для производства диоксида углерода работает в переменном режиме.

Система уравнений

Математические зависимости, описывающие работу основного оборудования объекта генерации - паротурбинной установки теплофикационного типа [4]:

- 1) Общий тепловой баланс турбины, кВт:

$$Q_{0к.т} = Q_3 + Q_T + Q_K, \quad (1)$$

где Q_3 - часть общей подведенной к турбине теплоты, которая полностью затрачивается на выработку электроэнергии, кВт; Q_T - количество теплоты, отпущенной с паром регулируемых отборов, кВт; Q_K - теплота конденсации пара в конденсаторе, кВт.

- 2) Вырабатываемая электрическая мощность, кВт:

$$N_3 = D_{0к.т}(h_0 - h_T) + (D_{0к.т} - D_T)(h_T - h_K) \quad (2)$$

где $D_{0к.т}$ - расход пара на входе в турбину при ее работе в режиме с регулируемыми отборами и конденсацией, кг/с; D_T - расход пара в регулируемый отбор, кг/с; h_0, h_T, h_K - энтальпии пара соответственно на входе в турбину в местах отбора на теплофикацию и на входе в конденсатор, кДж/кг.

- 3) Расход топлива на производство электроэнергии, кг/с:

$$B_3 = \frac{Q_3}{Q_n^p \eta_{тр} \eta_K} \quad (3)$$

где $Q_3 = Q_{0к.т} - Q_T$ - количество теплоты, затраченной турбиной на производство электроэнергии, кВт; Q_n^p - низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $\eta_{тр}$ - КПД транспортировки теплоты; η_K - КПД котла (брутто).

- 4) Коэффициент полезного действия турбоустановки для производства электроэнергии:

$$\eta_{ту}^э = \frac{N_3}{Q_3} \quad (4)$$

- 5) Удельный расход топлива на единицу выработанной электроэнергии, г/(кВт·ч):

$$b_3 = B_3 / N_3, \quad (5)$$

- 6) Количество теплоты, полученной внешним потребителем из регулируемых отборов, кВт:

$$Q_{т.от} = Q_T \eta_{ту}^T = D_T (h_T - h_{0к}) \eta_{ту}^T \quad (6)$$

где $h_{0к}$ - энтальпия конденсата отбираемого пара.

- 7) КПД теплофикационной турбоустановки по отпуску теплоты:

$$\eta_{ту}^T = Q_{т.от} / Q_T \quad (7)$$

- 8) Расход топлива на производство теплоты, переданной внешнему потребителю, кг/с:

$$B_T = \frac{Q_{т.от}}{Q_n^p \eta_{ту}^T \eta_{тр} \eta_K} \quad (8)$$

- 9) Удельный расход топлива, затраченного на производство единицы теплоты, переданной внешнему потребителю, кг/Гкал:

$$b_{т.э} = B_T / Q_{т.от} \quad (9)$$

- 10) Общий расход топлива, кг/с:

$$B = B_3 + B_T \quad (10.1)$$

$$B = \frac{Q_{0к.т}}{Q_n^p \eta_{тр} \eta_K} \quad (10.2)$$

Математические зависимости, описывающие работу установки для производства диоксида углерода (газообразного, жидкого и твердого) абсорбционно-десорбционным методом [3]:

- 1) Удельное количество диоксида углерода, получающегося при полном сжигании топлива (для твердого в кг/кг и жидкого топлива в $\text{нм}^3/\text{кг}$):

$$g_{CO_2} = 3,67 C_T^p / 100 \quad (11)$$

$$v_{CO_2} = 3,67 C_T^p / 100 \rho_{CO_2}^n = 0,02 C_T^p \quad (12)$$

для газового топлива в $\text{кг}/\text{нм}^3$ и $\text{нм}^3/\text{нм}^3$:

$$g_{CO_2} = v_{CO_2} / \rho_T \quad (13)$$

$$v_{CO_2} = 0,01(CO^T + CH_4^T + \sum m C_m H_n^T + CO_2^T) \quad (14)$$

где C_T - количество углерода, входящего в топливо, % по массе; $CO^T, CH_4^T, \sum m C_m H_n^T, CO_2^T$ - горючие элементы, содержащие углерод, % по объему.

2) Теоретический расход топлива, необходимого для обеспечения выработки газообразного CO_2 (в кг/ч) при полном его извлечении из дымовых газов:

$$B_T = G_{CO_2,r} / g_{CO_2} \quad (15)$$

где G_{CO_2} - расход газообразного CO_2 .

3) Фактический расход топлива, зависящий от доли извлечения:

$$B_T = k G_{CO_2,r} C_1 / g_{CO_2} (C_1 - C_2) \quad (16)$$

где k - коэффициент потерь CO_2 ; C_1 и C_2 - содержание CO_2 в дымовых газах до и после абсорбера.

4) Количество дымовых газов:

$$V_{д.г}^H = B_T V_T \quad (17)$$

где V_T - полный удельный объем дымовых газов, получающихся при сжигании 1 кг топлива, nm^3/kg [3].

5) Удельный расход топлива:

$$g_T = 1 / g_{CO_2} \quad (18)$$

6) Расход воды на охлаждение дымовых газов в скруббере, кг/с:

$$G_B = Q / c_B (t_{B2} - t_{B1}) \quad (19)$$

где c_B - теплоемкость воды, $kJ/(kg \cdot K)$; t_{B1} и t_{B2} - температура воды до и после скруббера; Q - тепловой поток, отводимый водой, определяется по количеству и составу дымовых газов и температурам на входе и выходе, кВт. [3]

7) Мощность электродвигателя эксгаузера и других нагнетательных аппаратов:

$$N = V_p H / \eta \quad (20)$$

где V_p - количество подаваемого рабочего тела; H - полное давление, создаваемое аппаратом; η - КПД аппарата.

8) Баланс тепла в десорбере, kJ/kg :

$$q = q_{хим} + q_p + q_{вт.п} + \sum q_{пот} \quad (21)$$

где q - общее удельное количество теплоты, вносимой в десорбер греющим паром, равное общему удельному количеству расходуемой теплоты; $q_{хим}$ - удельное количество теплоты, затрачиваемой на осуществление реакции; q_p - удельное количество теплоты, затрачиваемой на процесс догрева раствора до температуры десорбции; $q_{вт.п}$ - удельное количество теплоты со вторичными водяными парами, которые уходят из дефлегматора в холодильник; $\sum q_{пот}$ - удельные потери.

9) Поверхность теплообмена используемых теплообменных аппаратов определяется, исходя из общеизвестного стандартного уравнения теплопередачи.

2.4. Определение термодинамической эффективности системы энергоснабжения. Выбор критерия оценки термодинамической эффективности.

Рассматриваемая система энергоснабжения генерирует помимо электроэнергии и тепла также дополнительный произведенный продукт, который с одной стороны может использоваться как энергоноситель для хладоснабжения потребителя, с другой стороны является полезным продуктом необхо-

димым в различных технологических процессах, например, пищевой промышленности.

При определении термодинамической эффективности энергоснабжения для систем, генерирующих только произведенные энергоносители, рекомендуется принять следующие условия:

1) В качестве критерия термодинамической эффективности для систем энергоснабжения следует принять эксергетический КПД [5]. Такой выбор определяется спецификой работы систем энергоснабжения на базе технологии мультигенерации, в которых предполагается генерировать энергию различных видов.

2) Эксергетический КПД рассматривать как отношение суммы эксергии выходящих потоков эксергии к сумме входящих потоков эксергии.

3) В качестве выходящих потоков эксергии учитывать только полезно используемые в дальнейшем потоки эксергии, рассматривая не используемые потоки эксергии как потери.

4) Расчет эксергетического КПД рекомендуется проводить по методу «черного ящика», т.е. рассматривая эксергии различных энергоносителей на входе и на выходе системы энергоснабжения.

В тех случаях, когда генерируемый в системе энергоснабжения наряду с электроэнергией и теплом продукт не может рассматриваться как источник энергии, то энергетическая (термодинамическая) эффективность не может играть существенной роли и в качестве критериев следует рассматривать экономическую эффективность создания системы на базе технологии мультигенерации, а также улучшение экологических характеристик системы энергоснабжения.

Разберем в рассматриваемом случае *критерий термодинамической эффективности* системы энергоснабжения на базе паротурбинной установки теплофикационного типа и установки для производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом.

Для рассматриваемой системы энергоснабжения:

1) Входящие потоки:

- топливо на входе в котел;
- воздух на входе в котел;
- обратный поток сетевой воды от потребителя на входе в сетевой подогреватель;
- обратный поток циркулирующей воды на входе в конденсатор;
- поток воды на входе в скрубберную систему очистки дымовых газов;
- обратный поток охлаждающей воды на входе в холодильник газа;
- поток воды на входе в узел очистки газообразного диоксида углерода.

2) Выходящие потоки:

- электроэнергия, направляемая потребителю;
- тепло с прямым потоком сетевой воды потребителю на выходе из сетевого подогревателя;
- уходящие газы на выходе из котла, часть из которых поступает на установку для производства диоксида углерода и часть выбрасывается в атмосферу;

- прямой поток циркулирующей воды на выходе из конденсатора;
- поток воды со шламом на выходе из скрубберной системы очистки дымовых газов;
- поток оставшихся не поглощенными элементов на выходе из абсорбера (азот, диоксид азота);
- прямой поток охлаждающей воды на выходе из холодильника газа;
- поток воды с примесями на выходе из узла очистки газообразного диоксида углерода;
- поток газообразного диоксида углерода, направляемый потребителю;
- поток жидкого диоксида углерода, направляемый потребителю;
- поток твердого диоксида углерода, направляемый потребителю.

Таким образом, *эксергетический КПД* системы энергоснабжения на базе паротурбинной установки и установки для производства диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом запишется в виде:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{E_3 + E_{\text{пр.св}} + E_{\text{ух.г.}CO_2} + E_{CO_2,г} + E_{CO_2,ж} + E_{CO_2,т}}{E_{\text{т}} + E_{\text{в-ха}} + E_{\text{об.св}} + E_{\text{об.цв}} + E_{\text{в.скр}} + E_{\text{об.дхл.в}} + E_{\text{в.оч}}}$$

где $E_{\text{т}}$ - эксергия топлива на входе в котел ПТУ; $E_{\text{в-ха}}$ - эксергия потока воздуха на входе в котел ПТУ; $E_{\text{об.св}}$ - эксергия обратного потока сетевой воды от потребителя на входе в сетевой подогреватель; $E_{\text{об.цв}}$ - эксергия обратного потока циркулирующей воды на входе в конденсатор; $E_{\text{в.скр}}$ - эксергия потока воды на входе в скрубберную систему очистки дымовых газов; $E_{\text{об.дхл.в}}$ - эксергия обратного потока охлаждающей воды на входе в холодильник газа; $E_{\text{в.оч}}$ - эксергия потока воды на входе в узел очистки газообразного диоксида углерода; E_3 - эксергия электроэнергии, направляемой потребителю; $E_{\text{пр.св}}$ - эксергия прямого потока сетевой воды потребителю на выходе из сетевого подогревателя; $E_{\text{ух.г.}CO_2}$ - эксергия уходящих газов, направляемых на установку для производства диоксида углерода;

$E_{CO_2,г}$ - эксергия потока газообразного диоксида углерода, направляемого потребителю; $E_{CO_2,ж}$ - эксергия потока жидкого диоксида углерода, направляемого потребителю; $E_{CO_2,т}$ - эксергия потока твердого диоксида углерода, направляемого потребителю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленную математическую модель системы энергоснабжения потребителя от объекта генерации на базе паротурбинной установки теплофикационного типа и установки получения диоксида углерода абсорбционно-десорбционным методом возможно использовать при определении эффективности и выборе оптимальной схемы энергоснабжения потребителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Клименко А.В.** Сравнение термодинамической эффективности систем энергоснабжения с отдельной и совмещенной генерацией произведенных энергоносителей / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, П.Н. Борисова, Г.А. Романов // Теплофизика и аэромеханика. 2019. т.25. №2. С.6-29.
2. **Разработка** теоретической базы создания мультигенерирующих комплексов с высокими термодинамическими, технико-экономическими и экологическими показателями и организации централизованного снабжения потребителей энергией различных видов [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): НИО НТИЦ ЭТТ; рук. Клименко А.В.; испол.: Агабабов В.С. [и др.]. – М.; 2019. – 197 с. - №13.3233.2017/ПЧ. – Пер. № НИОКТР АААА-А17-117012350131-5.
3. **Пименова Т.Ф.** Производство и применения сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода /Т.Ф Пименова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 208 с.
4. **Тепловые** электрические станции: учебник для вузов. / В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др. под ред. В.М. Лавыгина, А.С. Седлова, С.В. Цанева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 466 с.
5. **Бродянский В.М.** Эксергетический метод термодинамического анализа. –М.: Энергия. 1973. – 296 с.

А.М. Латынов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Москва, Россия

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ СИСТЕМ ГИБРИДНОГО И СУХОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЭС И АКТУАЛЬНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены разновидности систем сухого и гибридного охлаждения, описан их принцип действия, конструктивные характеристики, а также преимущества и недостатки данных систем. Приведена область применения альтернативных систем охлаждения, произведено технико-экономическое сравнение данных систем с системами прямого и обратного охлаждения ТЭС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для большинства ТЭС производство электроэнергии сопряжено с потреблением большого количества водных ресурсов.

Для каждого электрогенерирующего объекта потребности в водных ресурсах 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 для охлаждения. Необходимым условием для работы любой тепловой электростанции, использующей паротурбинный цикл Ренкина, является конденсация отработавшего в турбине пара. В значительной степени эффективность цикла Ренкина зависит от конечного давления пара в конденсаторе. Более совершенная система охлаждения позволяет снизить давление в конденсаторе, что повышает эффективность работы всей электростанции.

Большинство существующих на сегодняшний день электростанций имеют системы влажного охлаждения (прямочные и обратные), которые подразумевают под собой значительное потребление количества воды. Ежегодное повышение тарифов на водопользование (постановление Правительства РФ от 26 декабря 2014 г. №1509) вынуждает электрогенерирующие компании снижать потребление воды на существующие системы охлаждения или переводить их на альтернативные системы, которые потребляют значительно меньше водных ресурсов по сравнению с нынешними.

2. ВИДЫ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Современные технологии охлаждения циркуляционной и технической воды на ТЭС делятся на четыре типа: прямочное, обратное, сухое и гибридное охлаждение.

Наибольшее распространение в отечественной и зарубежной энергетике получили системы прямо-

точного и обратного охлаждения, которые используются для охлаждения естественные и искусственные водоемы, а также специальные оросительные сооружения: градирни, пруды охладители. Данные системы относятся к классическим системам охлаждения и обладают более высокой эффективностью наряду с альтернативными системами охлаждения (сухие и гибридные), однако имеют довольно высокие требования к водным ресурсам, что зачастую служит причиной отказа от использования подобных систем.

В данной статье рассматриваются альтернативные системы охлаждения, а также производится сравнение их эффективности с классическими системами охлаждения.

Сухие системы охлаждения или сухие градирни представляют собой теплообменные сооружения, в которых теплопередающей поверхностью служат радиаторы из оребренных трубок. Такие градирни используют естественную тягу или могут быть оборудованы средствами принудительной тяги (вентиляторами). Сухие градирни применяются как для непосредственной конденсации отработавшего пара, так и для охлаждения циркуляционной воды. Передача тепла от охлаждаемой среды, протекающей внутри трубок радиатора, атмосферному воздуху осуществляется без непосредственного контакта через сильно развитую поверхность ребер, имеющихся на трубках, за счет теплопроводности и конвекции. Для интенсификации процессов теплопередачи ребристые трубы могут орошаться снаружи водой.

Радиаторы изготавливаются самых разнообразных конструкций, главным образом, из стали или алюминия.

Сухие градирни применяются в случаях:

- когда необходимо иметь закрытый, изолированный от контакта с атмосферным воздухом контур охлаждаемой среды (отработавший пар/циркуляционная вода);
- высоких температур нагрева оборотной воды в теплообменных технологических аппаратах, не допускающих ее охлаждения в градирнях испарительного типа;
- отсутствия или дефицита добавочной воды на восполнение безвозвратных потерь циркуляционной воды (испарение/капельный унос) в оборотных циклах.

Системы сухого охлаждения могут быть как прямыми (*direct dry cooling*), так и косвенными (*indirect dry cooling*). Прямые системы сухого охла-

ждения конденсируют отработавший пар в конденсаторе с воздушным охлаждением (*Air Cooled Condenser - ACC*), принципиальное изображение работы данной системы охлаждения представлено на рисунке 1.

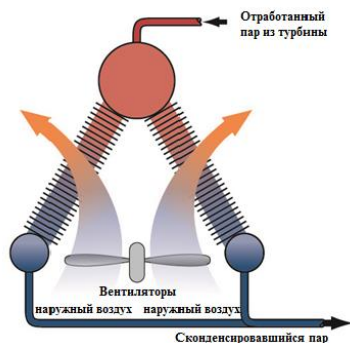


Рисунок 1. Система прямого сухого охлаждения.

Косвенные системы сухого охлаждения используют контур охлаждающей воды для конденсации пара в обычном поверхностном конденсаторе или конденсаторе смешивающего типа. Охлаждающая вода на выходе из конденсатора подается в теплообменник с воздушным охлаждением перед её возвратом обратно в конденсатор. Принципиальная схема косвенной системы охлаждения представлена на рисунке 2.

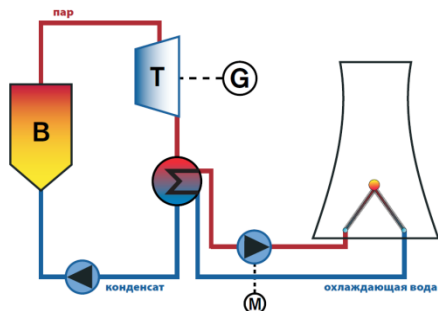


Рисунок 2. Принципиальная схема косвенной системы охлаждения споверхностным конденсатором.

Хотя сухое охлаждение обеспечивает значительную экономию воды, капитальные затраты данных систем в пять и более раз выше, чем в системах обратного (влажного) охлаждения. Кроме того, температура конденсации пара при прямом сухом охлаждении и температура циркуляционной воды на выходе из охладителя при косвенном сухом охлаждении ограничена температурой окружающего воздуха. В результате сухие системы охлаждения могут отводить на 10-15% меньше сбросного тепла в самое жаркое время по сравнению с мокрыми системами [1].

Одним из недостатков систем воздушного охлаждения с сухими градирнями является зависимость их холодопроизводительности от температуры наружного воздуха θ , которая резко меняется не только в течение года, но и в течение суток. Для устойчивой работы таких градирен требуется обеспечивать стабильную тепловую нагрузку, в особенности при холодном атмосферном воздухе. При эксплуатации промышленных производств и паротурбинных установок ТЭС имеет место значительная неравномерность тепловых нагрузок на градирни, что сопряжено с повышенной опасностью замерзания и выхода

из строя дорогостоящего теплообменного оборудования сухих градирен.

Расчет сухих градирен заключается в определении поверхности охлаждения радиаторов для заданных параметров охлаждаемой среды, наружного воздуха и необходимого расхода воздуха.

Поверхность охлаждения радиаторов F_p определяется по формуле 1

$$F_p = \frac{W}{q} \quad (1)$$

Значение плотности теплового потока q принимается от 1163 до 2093 Вт/м² [1000 - 1800 ккал/(м²·ч)]. Большое значение q соответствует большему значению разности $t_1 - \theta$ и $t_2 - \theta$. При $t_2 - \theta \leq 5^\circ\text{C}$ $q = 233$ Вт/м² [200 ккал/(м² · ч)].

Расход воздуха в сухой градирне определяется по формуле 2 для косвенной системы и по формуле 3 для прямой системы.

$$G_B = [G_{ц.в.} \cdot (t_1 - t_2) \cdot c_{ц.в.}] / [(\theta_{вых} - \theta) \cdot c_B] \quad (2);$$

$$G_B = [D_{пара.} \cdot (h''_k - h'_k)] / [(\theta_{вых} - \theta) \cdot c_B] \quad (3)$$

Необходимая тяга, создаваемая вентиляторами или вытяжной башней, определяется аэродинамическим сопротивлением градирни, которое равно сумме аэродинамических сопротивлений радиаторов при движении охлаждающего воздуха через них [2].

2.1. Прямые системы охлаждения - конденсаторы с воздушным охлаждением (ACC)

Конденсатор с воздушным охлаждением представляет собой конструкцию, в которой используются вентиляторы с электродвигателями. Большие размеры гиперболических градирен делают вариант с принудительной тягой оптимальным применением для электростанций, располагающих небольшой территорией. На рисунке 3 представлена одна из секций конденсатора с воздушным охлаждением и принудительной тягой.

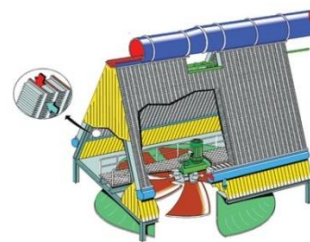


Рисунок 3. Секция конденсатора с воздушным охлаждением и принудительной тягой.

Отработавший пар из последних ступеней паровой турбины поступает в распределительный коллектор, расположенный сверху воздушного конденсатора. Затем пар распределяется в теплообменники с ребристыми трубками, которые расположены в виде «крыши» с конфигурацией А-образной формы. Из-за нагрева окружающего воздуха, проходящего сквозь наружную ребристую поверхность труб, происходит конденсация пара внутри теплообменников. Вентиляторы расположены в нижней части каркаса А-образной формы. Конденсат отводится из оребренных теплообменников в конденсатные коллекторы, а затем сливается в конденсаторный сборник.

Конструктивно воздушные конденсаторы от разных поставщиков оборудования отличаются в строении теплообменных элементов и их оребрения. Существуют два типа теплообменников: однорядные и многорядные (рисунок 4). Есть много аргументов в пользу преимуществ каждой конструкции. Однорядная конструкция по своей природе более надёжна в условиях низких температур.

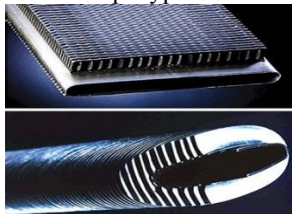


Рисунок 4. Конфигурация труб воздушного конденсатора. Сравнение однорядной (сверху) и многорядной конструкции оребренных поверхностей теплообмена (снизу).

Важным фактором является материал, из которого изготавливаются оребренные трубы. Плавники, напаянные на плоские голые трубы, выполненные из алюминия, и овалы оцинкованные оребренные трубы обычно считаются самыми надежными для использования на электростанциях.

К основным преимуществам систем, использующих прямое сухое охлаждение, относится их размер. Поэтому, объекты электрогенерации, на которых используются данные системы, имеют более компактный вид и меньшую высоту установок за счёт применения принудительной тяги воздуха (рисунок 5). К примеру, системы Геллера, использующие естественную тягу, имеют вдвое большую площадь, чем классические мокрые охлаждающие градирни. Кроме того, они обладают более высоким клиренсом, необходимым для подачи воздуха, поэтому их высота так же существенно отличается от классических влажных систем охлаждения [3].



Рисунок 5. Система воздушного охлаждения конденсатора для парогазовой тепловой электростанции мощностью 805 МВт.

2.2. Косвенное сухое охлаждение (системы Геллера)

В отличие от систем прямого сухого охлаждения, косвенное сухое охлаждение использует обычный поверхностный, либо смешивающий конденсатор, в котором рабочей (охлаждающей) средой выступает вода, а подача охлаждающего воздуха в большинстве случаев обеспечивается естественной тягой. Система непрямого воздушного охлаждения схожа с классической оборотной системой, за исключением того, что охлаждение рабочей среды происходит без испарения в конвективном воздушном теплообменнике.

В сухих градирнях системы Геллера отработанный в турбоустановке пар конденсируется в поверхностном или смешивающем конденсаторе при помощи циркуляционной воды. Далее, нагретая в процессе конденсации пара, вода при помощи циркуляционных насосов перекачивается в охлаждающие модули (дельты), вертикально расположенные по окружности у основания гиперболической градирни. Рабочая среда охлаждается и поступает обратно в конденсатор. Поток воздуха вокруг охлаждающих элементов создается естественной тягой градирни. Как и в конденсаторе с воздушным охлаждением, ребристые трубопроводы являются ключевыми элементами (рисунок 6). Сухая градирня непрямого охлаждения оснащена овальными трубами с закрученными стальными ребрами.



Рисунок 6. Градирня с установленными вертикально по окружности основания дельтами.

Система распределения воды имеет два основных распределительных кольца. “Горячее” кольцо подаёт циркуляционную воду после конденсатора, а “холодное” кольцо собирает охлаждённую воду. Оба кольца соединены между собой, чтобы обеспечить циркуляцию. Каждый сектор оснащен индивидуальной системой распределения воды, соединенной с основными кольцами. Циркуляция воды обеспечивается насосами, установленными снаружи башни.

2.3. Гибридные системы охлаждения

Системы сухого охлаждения как прямого, так и косвенного, могут работать как отдельно, так и в паре с системой влажного оборотного охлаждения (гибридное охлаждение). На рисунке 7 изображена система гибридного охлаждения с использованием воздушного конденсатора, а на рисунке 8 изображена гибридная система с градирней Геллера.



Рисунок 7. Гибридная система охлаждения в купе с воздушным конденсатором.

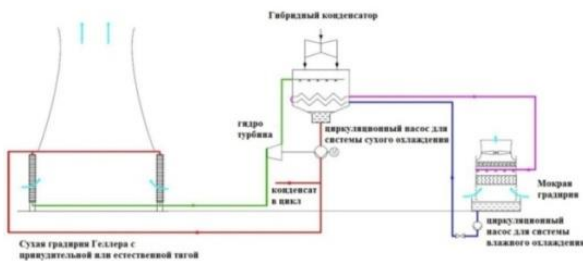


Рисунок 8. Гибридная система охлаждения с градирней Геллера и смешивающим конденсатором.

3. МИРОВОЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ СУХОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Системы сухого охлаждения применяются активно в США. В странах, обладающих богатыми водными ресурсами, такими как: Англия, Ирландия, Бельгия, Люксембург и северная Италия есть внедрения технологии систем сухого охлаждения. Системы сухого охлаждения, в частности, конденсаторы с воздушным охлаждением широко используются в Китае, ввиду отсутствия водных ресурсов в отдельных регионах страны, на Ближнем Востоке и Южной Африке.

Таблица 1. ТЭС, использующие установки сухого охлаждения [5]

Системы прямого сухого охлаждения			
Станция	Установленная мощность, МВт	Страна	Год введения в эксплуатацию
Neil Simpson- (Black Hills P&L)	20	США (Вайоминг)	1968
Utrillas	160	Испания	1970
Wyodak	330	США (Вайоминг)	1977
Touss	4x150	Иран	1987
Matimba	6x665	Южная Африка	1991
Majuba	6x665 (3 с сухим охлаждением)	Южная Африка	1998
Системы косвенного сухого охлаждения с естественной тягой			
Rugeley	120	Великобритания	1962
Ibbenbüren	150	Германия	1967
Gagarin	2x100; 2x220	Венгрия	1969/1972
Grootvlei №5	200	Южная Африка	1971
Razdan	2x200; 2x210	Армения	1971/1974
Grootvlei №6	200	Южная Африка	1978
Schmehausen (АЭС)	300	Германия	1977
Esfahan 1	4x200	Иран	1980 ые
Esfahan 2	4x200	Иран	1990 ые
ShahidRajai	4x250	Иран	1995
Arak	4x325	Иран	1998-2002
MontarezGhaem	3x360	Иран	1998-2001
Билибинская АЭС	4x12	Россия	1970 ые
ТЭЦ Международная	260	(Москва) Россия	2008
ТЭЦ Строгино	2x200	(Москва) Россия	2008
Сочинская ТЭЦ	2x80	(Сочи) Россия	2004-2008
ТЭЦ-12 Мосэнерго	220	(Москва) Россия	2015
Trakia	1200	Турция	1987-1997
Bursa	1400	Турция	1999
Gebze& Adapazari	3x777	Турция	2002
Can power plant	320	Турция	2003-2004

пользующих суховоздушные системы охлаждения.

4. СРАВНЕНИЕ ВЛАЖНЫХ, ПРЯМЫХ И КОСВЕННЫХ ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

На сегодняшнее время на рынке представлено огромное множество различных технических решений систем охлаждения, каждая из них уникальна и имеет как свои преимущества, так и недостатки. Ниже приведено детально сравнение трёх основных систем охлаждения: влажного оборотного, прямого и косвенного воздушного.

Основным отличием данных систем охлаждения является количество потребляемой воды. В таблице 2 приведены требования к водным ресурсам для различного электрогенерирующего оборудования и различных систем охлаждения.

Рассмотрим пылеугольный блок ПГУ мощностью 500 МВт с использованием различных систем охлаждения в качестве примера. В таблицах 3,4 приведены сравнительные экономические и эксплуатационные характеристики систем охлаждения для данного блока [4].

Таблица 2. Удельные расходы охлаждающей воды для различных электрогенерирующих объектов ($\text{м}^3/\text{МВт}\cdot\text{ч}$) [6]

Тип станции	Расход охлаждающей воды на конденсатор	Дополнительное охлаждение и собственные нужды	Всего
Стандартный цикл ПТУ	163,53	6,814	170,34
Стандартный цикл ГТУ	0	34,07	34,07
Цикл ПГУ (2/3 $N_{\text{ГТУ}}+1/3 N_{\text{ПТУ}}$)	54,51	25	79,5
Цикл ПГУ с сухим охлаждением	0	25	25
Цикл ПТУ с сухим охлаждением	0	6,8	6,8

Таблица 3. Характеристики рассматриваемого энергоблока ПГУ 500 МВт

Исходные данные для сравнения различных систем охлаждения	
Вид используемого топлива	Пылеугольная ПТУ
Мощность	500 МВт
Расход пара	1134 т/ч
Тепловая нагрузка на систему охлаждения	732677,6 МВт
Температура окружающего воздуха	32.2°C
Температура окружающего воздуха (по влажному термометру)	21.1°C

Таблица 4. Основные стоимостные и эксплуатационные характеристики рассматриваемых систем охлаждения

Тип системы охлаждения	Расчётное давление в конденсаторе, кПа	Стоимость системы охлаждения, млн. \$	Относительная стоимость системы, по отношению к оборотной системе	Потери воды с испарением и капельным уносом, $\text{м}^3/\text{МВт}\cdot\text{ч}$	Температура конденсации пара, °C	Расход циркуляционной охлаждающей воды, $\text{м}^3/\text{ч}$.
испарительные градирни	8,466	20-25	1,00	1,893-2,65	43,3	34068-45425
воздушный конденсатор	16,9319	60-100	2,5-5	0	57,2	0
прямоточная система охлаждения	8,466	10-15	0,4-0,75	0,757-1,1356	43,3	45425-68137
гибридная система охлаждения	10,159	40-75	2-4	0,378541-1,89271	46,1	11356-34068

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малое потребление водных ресурсов или полное его отсутствие является одним из основных преимуществ современных суховоздушных систем охлаждения.

Однако данные системы имеют капитальные затраты, в несколько раз превосходящие затраты на системы прямоточного и оборотного охлаждения, а также более низкую эффективность по сравнению с ними.

Более низкая эффективность работы воздушных систем охлаждения сопряжена с более высоким расходом потребления топлива и, соответственно, более высокими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу. Также, вследствие более низкой эффективности станции, использующие суховоздушные системы охлаждения, получают более низкую маржинальную прибыль, повышается объём штрафных санкций за

недовыработку электрической энергии в жаркие периоды года.

Таким образом, использование сухих систем охлаждения на современных электростанциях целесообразно в регионах, испытывающих острый дефицит в водных ресурсах, таких как Иран, Турция, Китай.

В регионах с хорошей гидрологической обстановкой использование сухих систем охлаждения является нецелесообразным.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЭС – тепловые электрические станции;
 ПГУ – парогазовая установка;
 W- тепловая нагрузка радиатора, Дж/ч;
 q – плотность теплового потока, Вт/м², отнесенная к площади оребренной поверхности радиатора.

$\theta_{\text{вых}} - \theta$ – разность температур воздуха на выходе и входе из радиатора, °С;

$G_{\text{ц.в.}}$ – расход циркуляционной воды, кг/с;

$c_{\text{ц.в.}}, c_{\text{в}}$ – удельная теплоёмкость воды и охлаждающего воздуха соответственно, кДж/кг·°С;

$D_{\text{пара}}$ – расход отработавшего пара в конденсатор, кг/с;

$h_{\text{к}}^{\text{н}}, h_{\text{к}}^{\text{к}}$ – энтальпии пара и конденсата соответственно, кДж/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sean Bushart**. Advanced Cooling Technologies for Water Savings at Coal-Fired Power Plants. Cornerstone the official journal of the world coal industry, 2014 2(1), 52-57;
2. **Пономаренко В.С.,** Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий, М., «Энергоатомиздат», 1998. 376с.;
3. **William Wurtz**. Air-cooled condensers eliminate plant water use. POWER Magazine, 2008 15(9);
4. **Electric Power Research Institute (EPRI)**. Power Plant Cooling System Overview for Researchers and Technology Developers, 2013;
5. **GEA EGI Contracting/Engineering Co. Ltd.** (Paper for EPRI Workshop on Advanced Thermal Electric Power Cooling Technologies) HELLER System: The Economical Substitute for Wet Cooling - to avoid casting a shadow upon the sky, Charlotte (North Carolina), 2008;
6. **Electric Power Research Institute (EPRI)**. (Consultant report) Comparison of alternate Cooling Technologies for California Power Plants economic, environmental and other tradeoffs. 2002.

*С.Н. Петин*¹, *А.А. Коршикова*²

¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

²ООО «Инконтрол», Москва, Россия

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ В СОСТАВЕ МУЛЬТИГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЯХ ИХ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена проблема повышения эффективности объектов генерации с различным основным оборудованием при их работе в составе мультигенерирующего комплекса. Повышение эффективности работы обеспечивается за счет правильного распределения дополнительно вырабатываемых электрической и тепловой мощностей, используемых для генерации заданных потребителем дополнительных (кроме электроэнергии и тепла) произведенных энергоносителей, между различным основным оборудованием объектов генерации. При этом потребителям направляются произведенные с большей эффективностью электроэнергия и тепло, а невостребованные электроэнергия и тепло, которые также генерируются с большей эффективностью, используются для производства на объекте генерации иных энергоносителей (например, водород, сжатый воздух, холод и т.п.), централизованно поставляемых промышленным и социальным объектам.

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно развивается новое направление повышения эффективности генерации энергии с использованием т.н. мультигенерирующих комплексов (МК) [1 – 7]. В состав мультигенерирующего комплекса входят объекты генерации энергии и объекты потребления энергии. Объекты генерации – это, в основном, электростанции с турбинами либо конденсационного (К), либо теплофикационного (Т и ПТ) типов. Изначально объекты генерации в качестве основных произведенных энергоносителей генерируют либо только электроэнергию, либо электроэнергию и тепло. Объекты потребления, входящие в состав МК, могут быть различного рода предприятиями промышленности и социальной сферы.

В МК на объектах генерации осуществляется совмещенная генерация различных произведенных энергоносителей. При этом, кроме электроэнергии либо электроэнергии и тепла, генерируются иные энергоносители, такие, как холод, сжатый воздух, сжиженный природный газ и т.п. Все произведенные энергоносители централизованно поставляются на объекты потребления.

В статье [6] рассматривались методические вопросы определения термодинамической эффективности технологии мультигенерации для системы энергоснабжения в целом как совмещенной генера-

ции различного рода произведенных энергоносителей по сравнению с отдельной их генерацией. При этом в качестве критерия эффективности был выбран эксергетический КПД. В результате была получена формула для определения изменения эксергетического КПД при переходе от отдельной к совмещенной генерации. В [7] рассмотрены методические подходы по МК как по термодинамическим, так и по экономическим критериям.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем докладе рассматривается иная постановка задачи. Эффективность использования технологии мультигенерации определяется лишь для объектов генерации, входящих в состав МК. При такой постановке задачи в первую очередь решается проблема перевода основного оборудования объектов генерации в более экономичные, близкие к оптимальным режимам генерации электроэнергии и теплоты при сезонных и суточных уменьшениях их потребления. Востребованные электроэнергия и теплота, произведенные с большей эффективностью, чем при неоптимальном режиме работы, направляются внешним потребителям, а невостребованные используются для генерации иных произведенных энергоносителей (например, водород, сжатый воздух, холод и т.п.) на предназначенном для этого оборудовании.

Повышение эффективности работы входящих в мультигенерирующий комплекс объектов генерации может достигаться за счет правильного распределения дополнительно вырабатываемых электрической и тепловой мощностей, используемых для генерации заданных потребителем дополнительных (кроме электроэнергии и тепла) произведенных энергоносителей, между различным основным оборудованием объектов генерации.

При такой постановке задачи необходимо ответить на два вопроса:

1. Каковы возможности генерации различных, заданных потребителем дополнительных произведенных энергоносителей на входящих в мультигенерирующий комплекс объектах генерации?

2. Как с наибольшей эффективностью для объектов генерации использовать установленное на них основное оборудование для генерации иных кроме

электроэнергии и тепла произведенных энергоносителей в периоды снижения потребности в электроэнергии и тепле с использованием дополнительных, не востребованных потребителями (профицитных) электрической и тепловой мощностей?

Ответ на первый вопрос может дать анализ типов основного оборудования, используемого для производства электроэнергии и тепла, а также характерных режимов его работы. Ответ на второй вопрос может быть получен при анализе нормативных характеристик основного оборудования объектов (либо одного объекта) генерации.

Для пояснения сказанного может быть рассмотрен следующий пример. На объекте генерации «большой» энергетики установлены энергоблоки конденсационного типа К-300-240 и К-200-130, различной электрической мощности 300 и 200 МВт соответственно, а потребитель нуждается в произведенном энергоносителе, для генерации которого необходима электрическая мощность 100 МВт. При этом блок К-300-240 в рассматриваемом периоде времени работает с мощностью 200 МВт, а блок К-200-130 - с мощностью 100 МВт. На каком из энергоблоков эффективнее увеличить выработку электрической мощности, переведя оборудование в работу в номинальном режиме?

Для ответа на этот вопрос необходимо определить влияние двух основных факторов. Так, с одной стороны, удельный расход топлива на выработку электроэнергии на энергоблоке К-300-240 меньше, чем на энергоблоке К-200-130, и на выработку дополнительных 100 МВт мощности на энергоблоке К-300-240 потребуется топлива меньше, чем на К-200-130. Однако, с другой стороны, отклонение от номинального режима работы энергоблока К-200-130 гораздо большее, чем у К-300-240, и экономия топлива, определяемая уменьшением удельного расхода топлива на выработку электроэнергии из-за перевода энергоблока К-200-130 в номинальный режим работы, при выработке 200 МВт электрической мощности может оказаться больше, у энергоблока К-300-240.

В рассмотренном примере, для принятия окончательного решения необходимые расчеты требуют применения зависимостей удельных расходов топлива на выработку электроэнергии от электрической мощности энергоблоков К-300-240 и К-200-130, полученные из нормативных характеристик оборудования [8, 9].

3. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ В СОСТАВЕ МУЛЬТИГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЯХ ОСНОВНОГО БОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ

При постановке задачи, принятой в настоящем докладе, основная решаемая проблема – на каком оборудовании эффективнее производить заданный потребителем дополнительный энергоноситель. Здесь следует в качестве термодинамического кри-

терия при определении эффективности объекта генерации (или нескольких объектов генерации) с разнотипным оборудованием применять в отличие от задачи, рассмотренной в [6], энергетический критерий – затраты первичного энергоносителя на производство электроэнергии, тепла и дополнительных произведенных энергоносителей, сравнивая между собой суммарные расходы первичного энергоносителя на их производство. Таким образом в данном случае критерием оценки эффективности будет суммарный расход топлива на генерацию необходимых объемов электроэнергии либо электроэнергии и тепла, а также всех дополнительных продуктов, независимо от того, являются они энергоносителями (например, водород, сжиженный газ и т.п.), либо не являются таковыми (например, химические удобрения и т.п.), для каждого из сравниваемых типов основного оборудования объекта генерации.

4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Задаются следующие условия:

1) На объекте генерации, входящем в мультигенерирующий комплекс, установлены две ПТУ различного типа и мощности, а также оборудование для генерации дополнительных произведенных энергоносителей, для привода которого может использоваться и электроэнергия, и тепло.

2) Обе ПТУ работают в неоптимальном режиме с пониженной электрической и тепловой мощностью из-за сниженной потребности в этих энергоносителях, что приводит к увеличению удельного расхода топлива по сравнению с его величиной при работе в оптимальном режиме.

3) Появляется востребованная потребителями возможность генерации дополнительных произведенных энергоносителей за счет увеличения на ΔN электрической мощности и на ΔQ тепловой мощности основного оборудования, что позволяет повысить эффективность работы энергоблоков за счет обеспечения их работы в оптимальном, либо более близком к оптимальному, режиме.

В наиболее общем виде, когда используются все возможные резервы и по электроэнергии, и по теплу, суммарный расход топлива B_{Σ} можно оценить, как

$$B_{\Sigma} = b_{11Э}(N_{10} + \Delta N_1) + b_{11Т}(Q_{10} + \Delta Q_1) + b_{21Э}(N_{20} + \Delta N_2) + b_{21Т}(Q_{20} + \Delta Q_2) \quad (1)$$

Здесь: $b_{11Э}$, $b_{21Э}$ – удельные расходы на выработку электроэнергии 1-го и 2-го блоков; $b_{11Т}$, $b_{21Т}$ – удельные расходы на выработку тепла 1-го и 2-го блоков; N_{10} , N_{20} – электрические мощности 1-го и 2-го энергоблоков в исходном режиме; ΔN_1 , ΔN_2 – увеличение электрической мощности 1-го и 2-го блоков; Q_{10} , Q_{20} – тепловые мощности 1-го и 2-го энергоблоков в исходном режиме; ΔQ_1 , ΔQ_2 – увеличение тепловой мощности 1-го и 2-го блоков.

Соотношение (1) дает возможность рассчитать суммарный расход топлива для различных частных случаев:

1) Две конденсационные турбины, нагружается одна из них. В соотношении (1) члены, отражающие производство тепла, исключаются. Если присвоить номер 1 блоку, получающему дополнительную нагрузку, то

$$B_{\Sigma} = b_{11Э}(N_{10} + \Delta N) + b_{20}N_{20} \quad (2)$$

2) Две теплофикационные турбины, нагружается одна из них (у нее №1) только по теплу ΔQ .

$$B_{\Sigma} = b_{11Э}N_{10} + b_{11Т}(Q + \Delta Q) + b_{20Э}N_{20} + b_{20Т}Q_{20}, \quad (3)$$

где $b_{20Э}$, $b_{20Т}$ – удельные расходы на выработку электроэнергии и тепла вторым энергоблоком в исходном состоянии.

3) Конденсационная (1) и теплофикационная (2) турбины, первая нагружается дополнительно на ΔN по электроэнергии, вторая на ΔQ по теплу.

$$B_{\Sigma 1} = b_{11Э}(N_{10} + \Delta N) + b_{20Э}N_{20} + b_{21Т}(Q + \Delta Q) \quad (4)$$

5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

5.1. Два энергоблока конденсационного типа

Сравнение производится для двух типов оборудования: энергоблоков К-200-130 и К-300-240 и для двух вариантов распределения дополнительной электрической мощности $N_{доб}$, равной 20 МВт. В варианте 1 дополнительные 20 МВт вырабатывает блок К-200-130, при этом блок К-300-240 работает с первоначальной нагрузкой 280 МВт. В варианте 2 дополнительная мощность вырабатывается блоком К-300-240 неизменной мощности блока К-200-130, равной 180 МВт.

5.1.1. Условия, принятые при проведении расчетов

Энергоблок типа К-200-130:

1) Энергоблок К-200-130 работает с нагрузкой 180 МВт с удельным расходом топлива на выработку электроэнергии 0.3143 кг у.т./кВт·ч при расходе топлива 56.58 т у.т./ч.

2) Мощность энергоблока увеличивается до 200 МВт, что приводит к уменьшению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии до 0.3127 кг у.т./кВт·ч.

Энергоблок типа К-300-240

1) Энергоблок К-300-240 работает с нагрузкой 280 МВт с удельным расходом топлива на выработку электроэнергии 0.3019 кг у.т./кВт·ч при расходе топлива 84.53 т у.т./ч.

2) Мощность энергоблока увеличивается до 300 МВт, что приводит к уменьшению удельного расхода топлива на выработку электроэнергии до 0.3002 кг у.т./кВт·ч.

Для определенности блок К-200-130 обозначен номером 1, блок К-300-240 – номером 2.

В соответствии с принятыми условиями расчетов для сравнения эффективности блоков с ПТУ конденсационного типа для расчетов B_{Σ} по формуле (2) используются следующие величины мощностей

энергоблоков и удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии (таблица 1).

5.1.2. Результаты расчетов

Вариант 1:

$$\begin{aligned} B_{\Sigma 1} &= b_{11Э}(N_{10} + \Delta N) + b_{20}N_{20} = \\ &= 0.3127(180000 + 20000) + 0.3019 \cdot 280000 = \\ &= 147072 \text{ кг у.т./ч} \end{aligned}$$

Вариант 2:

$$\begin{aligned} B_{\Sigma 2} &= b_{11Э}(N_{10} + \Delta N) + b_{20}N_{20} = \\ &= 0.3143 \cdot 180000 + 0.3002(280000 + 200000) = \\ &= 146634 \text{ кг у.т./ч} \end{aligned}$$

Таким образом, при принятых условиях расчета вариант 2 с суммарным расходом условного топлива, равным $B_{\Sigma 2} = 146.634$ т у.т./ч, оказывается термодинамически более эффективным варианта 1 с суммарным расходом условного топлива, равным $B_{\Sigma 1} = 147.072$ т у.т./ч.

5.2. Два ПТУ теплофикационного типа Т-50-130 и Т-100-130

5.2.1. Условия, принятые при проведении расчетов

1) ПТУ Т-50-130 работает с электрической мощностью $N_{0Т50} = 30$ МВт и тепловой мощностью $Q_{0Т50} = 40$ Гкал/ч.

2) ПТУ Т-100-130 работает с электрической мощностью $N_{0Т100} = 80$ МВт и тепловой мощностью $Q_{0Т100} = 110$ Гкал/ч.

3) В варианте 1 дополнительные 10 Гкал/ч вырабатывает ПТУ Т-50-130 при постоянной электрической мощности, равной 30 МВт, при этом режим работы ПТУ Т-100-130 остается без изменений.

4) В варианте 2 дополнительная тепловая мощность, равная 10 Гкал/ч, вырабатывается ПТУ Т-100 при постоянной электрической мощности 80 МВт, режим работы ПТУ Т-50-130 остается без изменений.

Расчеты для энергоблоков с ПТУ теплофикационного типа, в соответствии с данными, приведенными в нормативных характеристиках и предлагаемой методикой определения термодинамической эффективности, требуют предварительного расчета удельных характеристик при начальных нагрузках энергоблоков.

5.2.2. Расчет удельных характеристик при начальных нагрузках энергоблоков

В соответствии с нормативной характеристикой ПТУ Т-50-130 [10] при электрической мощности $N_{0Т50} = 30$ МВт и тепловой мощности $Q_{0Т50} = 40$ Гкал/ч удельный расход тепла $q_{0Т50}$ на выработку электроэнергии составляет 1810 ккал/кВт·ч.

При КПД котельного агрегата, принимаемом в расчете равном $\eta_{КА} = 0.9$, удельный расход тепла $q_{0КАТ50}$ в котельном агрегате на выработку электроэнергии в этом случае составляет

$$q_{0КАТ50} = q_{0Т50} / \eta_{КА} = 1810 / 0.9 = 2011 \text{ ккал/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Таблица 1. Исходные данные для расчетов для двух ПТУ с турбинами К-200-130 и К-300-240

Наименование характеристики	Вариант 1		Вариант 2	
	К-200	К-300	К-200	К-300
ПТУ				
Мощность начальная, N_0 , МВт	180	280	180	280
Мощность конечная, $N_{кон}$, МВт	200	280	180	300
Удельный расход на выработку электроэнергии начальный*, b_0 , кг у.т./кВт·ч	0.3143	0.3019	0.3143	0.3019
Удельный расход на выработку электроэнергии конечный*, b_1 , кг у.т./кВт·ч	0.3127	0.3019	0.3143	0.3002

* В соответствии с [8] и [9].

При этом удельный расход $b_{Э0Т50}$ условного топлива на выработку электроэнергии (низшая теплотворная способность $Q_H^p = 7000$ ккал/кг у.т.) будет равен

$$b_{Э0Т50} = q_{0КАТ50} / Q_H^p = 2011 / 7000 = 0.287 \text{ кг у.т./кВт·ч},$$

а часовой расход топлива на выработку электроэнергии

$$V_{Э0Т50} = b_{Э0Т50} N_{0Т50} = 0.287 \cdot 30000 = 8619 \text{ кг у.т./ч} = 8.619 \text{ т у.т./ч}.$$

Тепло, которое должно быть затрачено в котельном агрегате на выработку тепловой мощности $Q_{0КАТ50}$, определяется выражением

$$Q_{0КАТ50} = Q_{0Т50} / \eta_{КА} = 46.52 / 0.9 = 51.69 \text{ МВт}.$$

При этом расход условного топлива $V_{Т0Т50}$ на выработку тепла составит

$$V_{Т0Т50} = Q_{0КАТ50} / Q_H^p = 51.69 / (7000 \cdot 4.1868) = 1.764 \text{ кг у.т./с} = 6.349 \text{ т у.т./ч}$$

Таким образом, общий расход топлива на энергоблок Т-50-130 при заданных начальных условиях расчета составит

$$V_{\Sigma Т50} = V_{Э0Т50} + V_{Т0Т50} = 8.619 + 6.349 = 14.968 \text{ т у.т./ч}.$$

Удельный расход топлива на выработку тепла при этих условиях составит:

$$b_{Т0Т50} = V_{Т0Т50} / Q_{0Т50} = 6349 / 46520 = 0.136 \text{ кг у.т./кВт·ч}$$

ПТУ Т-100-130 генерирует электрическую мощность $N_{0Т50} = 80$ МВт и тепловую мощность $Q_{0Т100} = 110$ Гкал/ч (127.93 МВт). В соответствии с нормативной характеристикой ПТУ Т-100-130 [11] в этом режиме расход тепла $q_{0Т100}$ на выработку электроэнергии составляет 1425 ккал/кВт·ч.

При КПД котельного агрегата, принимаемом равном $\eta_{КА} = 0.9$, расход тепла $Q_{0КАТ100}$ в котельном агрегате в этом случае составляет

$$q_{0КАТ100} = q_{0Т100} / \eta_{КА} = 1425 / 0.9 = 1583 \text{ ккал/кВт·ч}.$$

При этом удельный расход на выработку электроэнергии условного топлива $b_{Э0Т50}$ с низшей теплотворной способностью $Q_H^p = 7000$ ккал/кг у.т., будет равен

$$b_{Э0Т100} = q_{0КАТ100} / Q_H^p = 1583 / 7000 = 0.226 \text{ кг у.т./кВт·ч},$$

а часовой расход топлива на выработку электроэнергии

$$V_{Э0Т100} = b_{Э0Т100} N_{0Т100} = 0.226 \cdot 80000 = 18095 \text{ кг у.т./ч} = 18.095 \text{ т у.т./ч}.$$

Тепло, которое должно быть затрачено в котельном агрегате на выработку тепловой мощности $Q_{0КАТ100}$, определяется выражением:

$$Q_{0КАТ100} = Q_{0Т100} / \eta_{КА} = 127.93 / 0.9 = 142.14 \text{ МВт}.$$

При этом расход условного топлива $V_{Т0Т50}$ на выработку тепла составит

$$V_{Т0Т50} = Q_{0КАТ100} / Q_H^p = 142.14 / (7000 \cdot 4.1868) = 4.850 \text{ кг у.т./с} = 17.460 \text{ т у.т./ч}$$

Таким образом, общий расход топлива на ПТУ Т-100-130 при заданных начальных условиях расчета составит

$$V_{\Sigma Т100} = V_{Э0Т100} + V_{Т0Т100} = 18.095 + 17.460 = 35.555 \text{ т у.т./ч}.$$

Удельный расход топлива на выработку тепла при этих условиях составит

$$b_{Т0Т100} = V_{Т0Т100} / Q_{0Т100} = 17460 / 127930 = 0.136 \text{ кг у.т./кВт·ч}.$$

5.2.3. Расчет при различных вариантах генерации дополнительной тепловой мощности

В соответствии с принятыми условиями расчетов для сравнения эффективности блоков с ПТУ теплофикационного типа для расчета V_{Σ} по формуле (3) используются следующие величины мощностей энергоблоков и удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии (таблица 2).

Таблица 2. Исходные данные для расчетов для двух ПТУ с турбинами Т-50-130 и Т-100-130

Наименование характеристики	Вариант 1		Вариант 2	
	Т-50	Т-100	Т-50	Т-100
ПТУ				
Электрическая мощность начальная, N_0 , МВт	30	80	30	80
Электрическая мощность конечная, $N_{кон}$, МВт	30	80	30	80
Тепловая мощность начальная, Q_0 , МВт	46.52	127.93	46.52	127.93
Тепловая мощность конечная, $Q_{кон}$, МВт	58.15	127.93	46.52	139.56
Изменение тепловой мощности, ΔQ , МВт	11.63	0	0	11.63
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии начальный**, b_0 , кг у.т./кВт·ч	0.287	0.226	0.287	0.226
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии конечный**, b_1 , кг у.т./кВт·ч	0.260	0.226	0.287	0.213
Удельный расход топлива на выработку тепла конечный**, b_2 , кг у.т./кВт·ч	0.136	0.136	0.136	0.136

**В соответствии с [10] и [11] при КПД котла, равном 0.9.

Вариант 1

Суммарный расход топлива на два блока в варианте 1 определится из выражения

$$V_{\Sigma 1} = b_{110} N_{10} + b_{11T} (Q_{11T} + Q_{доб}) + b_{20} N_{20} + b_{20T} Q_{20T}$$

Подставляя численные значения

$$V_{\Sigma 1} = 0.260 \cdot 30000 + 0.136 \cdot (46520 + 11630) + 0.226 \cdot 80000 + 0.136 \cdot 127930 = 51186 \text{ кг у.т./ч.}$$

Вариант 2

Суммарный расход топлива на два блока в варианте 2 определится из выражения

$$V_{\Sigma 2} = b_{100} N_{10} + b_{10T} Q_{10T} + b_{220} N_{20} + b_{22T} (Q_{22T} + Q_{доб})$$

$$V_{\Sigma 2} = 0.287 \cdot 30000 + 0.136 \cdot 46520 + 0.213 \cdot 80000 + 0.136 (127930 + 11630) = 50957 \text{ кг у.т./ч.}$$

Таким образом, при принятых условиях расчета вариант 2 с суммарным расходом условного топлива, равным $V_{\Sigma 2} = 50.957$ т у.т./ч, оказывается термодинамически более эффективным, чем вариант 1 с суммарным расходом условного топлива, равным $V_{\Sigma 1} = 51.186$ т у.т./ч.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены основы методики анализа термодинамической эффективности объектов генерации в составе мультигенерирующих комплексов при различных сочетаниях их основного оборудования.
2. Приведены примеры расчетов термодинамической эффективности объектов генерации в составе мультигенерирующих комплексов при различных составах оборудования в характерных для России условиях эксплуатации.

*Авторы доклада выражают благодарность за помощь в его подготовке участникам научного коллектива, выполнявшего НИР «Разработка теоретической базы создания мультигенерирующих комплексов с высокими термодинамическими, технико-экономическими и экологическими показателями и организации централизованного снабжения потребителей энергией различных видов» в соответствии с Гос. заданием в рамках конкурсного отбора

научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и научных лабораторий образовательных организаций высшего образования (№ заявки 13.3233.2017/ПЧ): А.В. Клименко, В.С. Агабабову, А.В. Корягину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chicco G., Mancarella P.** Distributed multi-generation: a comprehensive view // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, Iss. 3. P. 535-551.
2. **Mancarella P.** MES (multi-energy systems): an overview of concepts and evaluation models // Energy. 2014. Vol. 65. P. 1-17.
3. **Jana K., Ray A., Majoumerd M.M., Assadi M., De S. Polygeneration as a future sustainable energy solution a comprehensive review // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 88-111.**
4. **Тувальбаев Б.Г., Моисеев В.И.** Работа ТЭС в постоянном режиме с выработкой дополнительной продукции на неустраиваемой энергии // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 4 (84). С. 24-27.
5. **Клименко А.В., Агабабов В.С., Рогова А.А., Тидеман П.А.** Особенности комбинированного производства электроэнергии, тепла и холода на базе парогазовой установки // Теплоэнергетика. 2015. № 3. С. 11-15.
6. **Klimenko, A.V.** Comparing thermodynamic efficiency of power supply systems with separate and combined generation of produced energy carriers / A.V. Klimenko, V.S. Agababov a, A.V. Koryagin, P.N. Borisova, and G.A. Romanov // Thermophysics and Aeromechanics, 2019, Vol. 26, No. 5, S.769-780.
7. **Клименко, А.В.** Основы мультигенерации: учеб. пособие / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, С.Н. Петин, А.А. Коршикова, П.Н. Борисова. – М.: Издательство МЭИ, 2019. – 92 с.
8. **РД 34.30.706** Типовая энергетическая характеристика нетто турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ // М.: СПО Союзтехэнерго, 1972.
9. **РД 34.30.717** Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата К-300-240 ЛМЗ (для турбин до заводского №1198) // М.: СПО ОРГРЭС, 1976.
10. **РД 34.30.706** Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата Т-50-130 ТМЗ // М.: СПО Союзтехэнерго, 1979.
11. **РД 34.30.716** Типовая нормативная характеристика турбоагрегата Т-100-130 ТМЗ // М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1971.

А.С. Сураев¹, В.М. Котов², М.К. Скаков², Р.А. Иркимбеков²

¹Государственный университет имени Шакарима города Семей, Казахстан

²Филиал Институт Атомной Энергии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

КОНЦЕПЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ АЭС С ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

АННОТАЦИЯ

В работе показаны технические возможности увеличения эффективности атомных электростанций путем использования технологии канального реактора на тепловых нейтронах с газовым теплоносителем и водным замедлителем. Рассмотрены основные характеристики активной зоны, топливной кампании и теплообменного оборудования.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ходе развития атомной энергетики в качестве перспективных вариантов рассматривались различные типы реакторов. На сегодняшний день в мире ведутся разработки реакторов четвертого поколения, отвечающим новейшим требованиям безопасности и нераспространения. По данным [1] наибольший потенциал к дальнейшему развитию представляют три типа: реакторы на быстрых нейтронах (БН), высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) и водо-водяные корпусные (ВВЭР). В рамках данной работы будет рассмотрен реактор с тепловым спектром нейтронов, сочетающий в себе лучшие качества высокотемпературных газоохлаждаемых и водо-водяных реакторов.

В настоящее время реакторы с газовым теплоносителем рассматриваются в основном в варианте с циклом Брайтона и графитовым замедлителем [2,3], при этом топливом являются сферические микротвэлы [4]. Несмотря на достаточно большой срок разработки таких реакторов и представление их в качестве лидеров завтрашней атомной энергетики эффект от их внедрения не наблюдается.

Цель данной статьи: показать технические решения [5], применение которых позволяет построить концепцию эффективной АЭС на основе канального газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем.

В работе [6] показано, что в тяжеловодных реакторах с газовым теплоносителем и с хорошо отработанными стержневыми твэлами достигим термодинамический КПД на уровне 45.6 % при нагреве теплоносителя до 500 °С, тогда как у типового ВТГР это значение достигается только при 800 – 1000 °С. Эффект достигается за счет полного использования энергии деления ядер, в том числе энергии замедления нейтронов, высокого давления

пара в цикле Ренкина и тройного перегрева пара. Положительным качеством данного цикла является высокая сухость отработанного пара (на уровне 93 % против порядка 70 % в турбинах легководных реакторов), что снижает затраты на изготовление лопаток турбины [7].

Преимущества тяжеловодных реакторов в полной мере могут быть использованы, как и быстрых реакторов, при включении замкнутого топливного цикла с переработкой отработавшего топлива. В противном случае, их достоинства приближаются по величине к недостаткам – дороговизне тяжелой воды, осложнении в эксплуатации систем циркуляции тяжелой воды, большими габаритами активной зоны. Технология переработки отработавшего топлива внедряется малыми темпами. Имеются факторы как технического, так и экономического характера для такого сдерживания [8].

2. ОПИСАНИЕ РЕАКТОРА

Рассмотрим канальный реактор с тепловой мощностью 1000 МВт. Большая замедляющая способность легкой воды в сравнении с тяжелой делает шаг решетки размещения каналов небольшим. Если в тяжеловодном реакторе шаг треугольной решетки превышает 25 см, то в рассматриваемом реакторе с простой водой он установлен ~12 см. В активной зоне размещено 549 ТВС с внешним диаметром корпуса 10 см. Диаметр активной зоны составляет 3.0 м, высота топлива в ТВС – 2.2 м. В каждой ТВС установлено 59 твэлов с внешним диаметром 6.8 мм [9].

Давление замедлителя установлено равным 2.5 МПа, давление теплоносителя на входе в ТВС – 6.0 МПа. В качестве теплоносителя используется гелий, который в свою очередь обладает следующими преимуществами: отсутствие фазового перехода в диапазоне высоких температур; низкая температура плавления; малое коррозионное воздействие на конструкционные материалы; стабильность свойств под воздействием излучения и температуры; малая аварийная опасность и опасность, вызванная наведенной активностью; отсутствие неблагоприятного влияния на баланс нейтронов в реакторе. Плотность гелия 0.955 г/см³, общая масса гелия в активной зоне порядка 13.6 тонн.

Температура замедлителя на входе в активную зону равна 170 °С, на выходе 182 °С, недогрев до температуры кипения на выходе из активной зоны составляет порядка 44 °С.

Схема активной зоны реактора представлена на рис. 1.

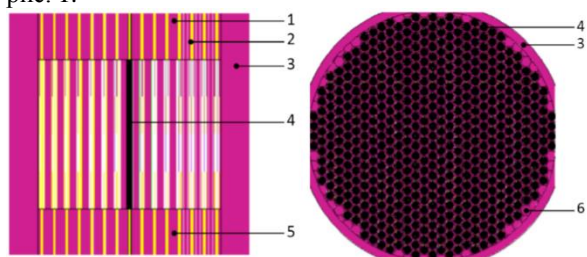


Рис. 1. Схема активной зоны канального газоохладимого реактора: 1 – верхний отражатель; 2 – теплоноситель; 3 – боковой отражатель; 4 – ТВС; 5 – нижний отражатель; 6 – замедлитель.

Таблица 1. Параметры активной зоны.

Параметр	Значение	
	Шаг размещения ТВС, см	12
Высота, см	220	
Радиус, см	152	202
Высота бокового отражателя, см	420	
Толщина бокового отражателя, см	100	
Высота верхнего и нижнего отражателя, см	100	
Радиус верхнего и нижнего отражателя, см	252	302

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНОЙ КАМПАНИИ

Восемь различных модификаций реактора с газовым теплоносителем мощностью 1000 МВт были рассчитаны для выбора оптимального варианта комбинации топлива, замедлителя / отражателя и шага размещения ТВС в активной зоне.

Подача теплоносителя в каналы с ТВС осуществляется снизу-вверх с помощью интегральных коллекторов [10]. Над верхним интегральным коллектором размещается цилиндрическая камера с диаметром равным диаметру активной зоны и высотой равной высоте ТВС, обеспечивающая возможность перестановки ТВС.

Система регулирующих стержней в представленном варианте размещается снизу активной зоны. Аналогом такого решения является система регулирования кипящего реактора ABWR [11]. Возможна обратная компоновка, когда камера перестановки ТВС размещается под активной зоной, а система регулирования над ней. В таком варианте потребуется большая высота подреакторных помещений. Характеристики активной зоны приведены в табл. 1.

Во всех просчитанных вариантах (табл. 2) применяется урановое топливо обогащением 2.5 % по изотопу ^{235}U , что выгодно с экономической стороны.

Во всех просчитанных вариантах применяется урановое топливо обогащением 2.5 % по изотопу ^{235}U , что выгодно с экономической стороны.

Таблица 2. Варианты конфигурации активной зоны.

Параметр	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Топливо	Uмет				UO ₂			
Шаг размещения ТВС в активной зоне, см	12		16		12		16	
Обогащение по U ²³⁵ , %	2.5							
Замедлитель / отражатель	D ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O	D ₂ O	H ₂ O

Таблица 3. Характеристики вариантов кампании реактора.

Параметр	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Глубина выгорания, МВт·сут/кг	19.92	18.19	45.62	~10 ⁻¹⁴	15.92	18.79	45.40	~10 ⁻¹⁴
Длительность кампании, сут	313	373	1105	-	251	399	1086	-

Из просчитанных вариантов наиболее лучшими критериями обладают реакторы, в которых топливом является металлический уран или диоксид урана, замедлитель / отражатель – тяжелая вода, шаг размещения ТВС в активной зоне – 16 см. Реактор

на металлическом уране обладает рядом преимуществ:

- низкообогащенное топливо (2.5 % по изотопу ^{235}U);

- ТВС предлагаемого реактора не содержит теплового экрана, что снижает затраты на её создание, затраты на прокачку теплоносителя, потери нейтронов, габариты активной зоны;

- требуется около 100 тонн тяжелой воды, что в два раза меньше, чем в реакторе CANDU близкой мощности.

По сравнению с другими просчитанными вариантами для этой (вариант 3) компоновки активной зоны характерны следующие показатели (табл. 3):

- самая продолжительная кампания – 1105 суток;
 - наибольшее выгорание делящегося материала (^{235}U выгорело 97.8 %);

- наибольшее значение глубины выгорания – 45.62 МВт·сут/кг;

- доля использования природного урана (1.24 %) достигает значения, характерного для реакторов CANDU, лучших из тепловых реакторов в этом отношении. Однако, в реакторах CANDU достигаемое выгорание примерно в четыре раза ниже, а количество тяжелой воды требует много больших затрат.

Таблица 4. Характеристики кампании.

Параметр	ТВС с экраном	ТВС без экрана
Тип топлива	UO ₂	
Масса ^{235}U в начале кампании, кг	403	
$K_{\text{эфф}}$, о.е.	1.196	1.353
Утечка, %	4.2	2.55
Поглощение в протии, %	8.99	5.86
Поглощение в ^{235}U , %	9.91	10.6
Деление на ^{235}U , %	46.19	53.9
Поглощение в ^{238}U , %	28.5	24.6
Деление на ^{238}U , %	2.5	1.44
Выгорание топлива, МВт·сут/кг	25.37	39.6
Масса ^{235}U в конце кампании, кг	89.9	16.5

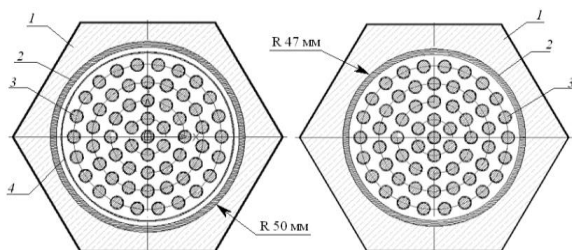


Рис. 2. Схема ТВС с экраном и без него: 1 – замедлитель; 2 – чехол ТВС; 3 – твэл; 4 – тепловой экран.

Исходные данные и результаты расчетов представлены в табл. 4. Данные по характеристикам замедлителя не учитывают энерговыделение за счет замедления нейтронов. Величина этого энерговыделения близка к величине перераспределения тепла из канала упрощенной схемы ТВС без теплового экрана (ТЭ).

Температура теплоносителя на выходе ТВС 615 °С достигается без превышения допустимой

4. УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ КОНСТРУКЦИЯ ТВС

Проведены расчеты теплофизических характеристик двух вариантов ТВС с использованием программы [12]. Первый из них выполнен по традиционной схеме ТВС канальных реакторов с теплоизолирующей газовой тракта теплоносителя, содержащей экран и газовый зазор между трактом теплоносителя и корпусом ТВС. Второй вариант выполнен по упрощенной схеме и не содержит теплового экрана. В нем поток теплоносителя непосредственно соприкасается с корпусом ТВС. В каждом из вариантов ТВС рассмотрена возможность использования твэлов с топливом в виде двуокиси урана и топливом из металлического урана. Были рассмотрены и другие варианты конструкции ТВС. Варианты ТВС и окружающего их слоя замедлителя представлены на рис. 2.

температуры материалов сердечников твэлов и их оболочек во всех вариантах.

Упрощенный вариант ТВС передает до 6 % мощности ТВС в замедлитель, что меньше допустимого значения, разрешенного предлагаемой технологией передачи энергии в цикл Ренкина. При этом обеспечивается экономия энергии на прокачку теплоносителя в реакторе на уровне ~1.7 МВт.

Помимо представленных вариантов ТВС рассматривались и другие, отличающиеся, например, типом теплоносителя [13,14], однако существенных улучшений характеристик найдено не было.

5. КОНЦЕПЦИЯ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС

Потенциал предлагаемого в настоящей работе технического решения во многом обусловлен схемой передачи тепловой энергии от реактора в цикл Ренкина (рис. 3). В известных АЭС с газовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем [15] энергия в паровой контур передается только от га-

зового теплоносителя. При этом теряется полностью энергия замедления нейтронов, и энергия утечек тепла из каналов в замедлитель. Суммарные потери могут превышать 10 % от полной энергии, связанной с делением ядер.

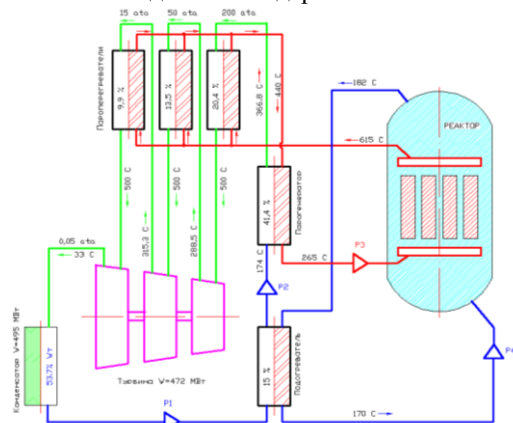


Рис. 3. Схема АЭС

Кроме того, высокие требования к минимизации утечек тепла усложняют конструкцию ТВС. В предлагаемом решении энергия замедления и утечек тепла из ТВС передается воде, образованной из отработанного пара турбины [16].

Максимальное давление пара в контуре равно 20.0 МПа, максимальная температура перегрева

Таблица 5. Параметры трехступенчатого перегрева пара

Наименование процесса	Диапазон температур, °С		Доля энергии, %
Нагрев воды	31.0	365.7	41.27
Превращение воды в пар	365.7	365.8	14.32
Первый перегрев пара	365.8	500	20.11
Второй перегрев пара	300.0	500	12.64
Третий перегрев пара	278.3	500	11.66
Итого:			100.0

При давлении, развиваемом первым водным насосом, максимальная температура воды может составить 275 °С, и максимальное количество тепловой энергии, переносимой замедлителем, в этом случае, будет равно ~30.0 % от всей энергии, выделяемой в реакторе. Если энергия замедления нейтронов равна 7 % от общей энергии, выделяемой в реакторе. Если энергия замедления нейтронов равна 7 % от общей энергии, то на утечку из ТВС и интегральных коллекторов в замедлитель можно допустить до 23 % энергии, выделяемой в ТВС. Это способствует упрощению конструкции ТВС и интегральных коллекторов. Кроме того, утечка тепла из самой ТВС снижает максимально необходимый расход теплоносителя, а значит и затраты на его прокачку.

6. ТЕПЛООБМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС

Все АЭС с газоохлаждаемыми реакторами выполняются по двухконтурной схеме с использованием эффективных паровых турбин традиционной энергетики [18]. Такой подход значительно упрощает и удешевляет проекты. Создание одноконтурной АЭС с гелиевым теплоносителем пока не представляется возможным, так как в этом случае давление газа будет на уровне 9 МПа. При таком давлении

пара в обоих нагревателях – 500 °С. Температура гелия на выходе из реактора в данной схеме принята равной 615 °С, но она может варьироваться в широких пределах.

Все теплообменники в данной схеме выполнены с противотоком отдающих и принимающих энергию рабочих тел [17]. Схема дополнена емкостью, обеспечивающей защиту ТВС от протечек пара высокого давления в контур газового теплоносителя реактора. При возникновении течи пара высокого давления в контур теплоносителя пар будет расширяться, его давление падать как за счет увеличения объема в дополнительной емкости, так и за счет снижения давления в контуре пара.

В контуре вода-пар установлены два насоса. Первый повышает давление воды до значения равного давлению замедлителя в реакторе, второй – до максимального давления в цикле Ренкина. Это решение упрощает требования к теплообменнику, передающему тепло от замедлителя.

Для обеспечения передачи энергии от замедлителя в цикл Ренкина поднимается давление в замедлителе и его температура. При указанных выше температурах пара и его давлении баланс энергии в цикле Ренкина стремя перегревами имеет вид, представленный в табл. 5.

из-за высокой текучести гелия нормальная эксплуатация реактора будет затруднена.

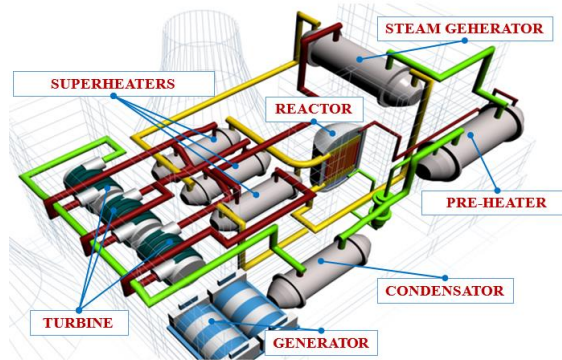


Рис. 4. Компоновка теплообменного оборудования АЭС с газоохлаждаемым реактором

Предлагаемая АЭС на основе газоохлаждаемого реактора так же выполнена по двухконтурной схеме (рис. 3). Отличительной особенностью является использование энергии замедления нейтронов и утечек тепла из ТВС, тройной перегрев пара до начальных параметров перед каждой ступенью турбины, высокий термодинамический КПД схемы передачи тепла от реактора в контур турбины [19,20].

В исследуемом газоохлаждаемом реакторе схема передачи тепла от реактора к турбине реализована пятью теплообменными аппаратами различной мощности и назначения. Такой подход обеспечивает распределение нагрузки и способствует повышению надежности всего контура.

Примерный вид компоновки теплообменного оборудования первого контура АЭС на основе газоохлаждаемого реактора показан на рис. 4.

Таблица 6. Баланс энергии первого контура

Теплообменник	Нагреватель (гелий)				Приемник тепловой энергии (пар-вода)				
	Температура, °С		Мощность тепл, МВт	Расход, кг/с	Температура, °С		Мощность тепл, МВт	Расход, кг/с	
	вход	выход			вход	выход			
Подогреватель	182	170	150	2851	33	174	149	251	
Парогенератор	370	265	273	500	174	365.7	270		
	440	370	182		365.7	366.8	146		
Пароперегреватели	1	615	440	212	233	366.8	500		197
	2			140	153	288.5			137
	3			103	113	315.3			100
Итого:			1060				1003		

Правильность выбора основных параметров оборудования схемы подтверждается результатами расчета баланса энергий (табл. 6). Справочные данные для расчета и свойства материалов найдены в специализированной литературе [21]. Как видно из табл. 4, наблюдается хорошее согласование параметров установки, таких как мощность, расход теплоносителя, температура теплоносителя и т.д. Был

Таблица 7. Параметры турбины с тремя ступенями.

Ступень	Параметры воды/пара					Мощность МВт
	Р, МПа	Т, С	Энтальпия, кДж/кг	Энтропия кДж/кг·°С	Удельный объем, м³/кг	
I	20	500	3241.19	6.14	0.015	88.65
	5	288.5	2887.99	6.14	0.043	
II	5	500	3434.47	6.97	0.069	91.01
	1.5	315.19	3071.89	6.97	0.17	
III	1.5	500	3473.56	7.57	0.24	292.28
	0.005	33	2309.1	7.57	25.25	
Суммарная мощность турбины, МВт						471.9

7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

7.1. Теплофизический расчет

Основной целью проведения теплофизического расчета является нахождение площади поверхности теплообмена трубного пучка. Исходя из приведенной выше схемы контуров передачи энергии, были заданы требуемые мощности всех теплообменников, а также граничные условия. Далее, пользуясь

Паровая турбина выполняется по классической конструкции. Она имеет три рабочих цилиндра высокого, среднего и низкого давления и работает по циклу Ренкина. Высокая сухость пара на всех ступенях турбины позволяет повысить ее надежность и долговечность.

проведен оценочный расчет мощности турбины. При тепловой мощности реактора 1000 МВт мощностью турбины с тремя ступенями составляет 471.9 МВт (табл. 7). Для сравнения характеристик турбины рассмотрены варианты с различным количеством ступеней – от двух до четырех. Вариант с тремя ступенями является наиболее предпочтительным.

справочными данными [22–24], был определен ряд теплофизических параметров теплообменников.

Расчетная скорость теплоносителя находится в допустимых пределах, обеспечивая интенсивный теплообмен и не вызывая при этом опасных вибраций в трубном пучке. Исходные данные и результаты теплофизического расчета представлены табл. 8.

7.2. Расчет массово-габаритных характеристик

Масса оборудования и его размеры влияют на как процесс изготовления, транспортировки, так и на капитальные затраты. По этой причине необхо-

димо следовать курсу на снижение веса оборудования и его размеров.

В рамках данного расчета получены следующие данные (табл. 9): количество трубок и их типоразмер, шаг треугольной решетки, масса трубного пучка и корпуса, оптимальная толщина стенки корпуса. Эти параметры напрямую влияют на ресурсоёмкость конструкций. Выбор материала трубок явля-

Таблица 8. Результаты теплового расчета.

Параметр	Значение				
	Подогреватель	Парогенератор	Пароперегреватели		
			1	2	3
Мощность расчетная, МВт	152.6	415.6	211.4	139.6	102.6
Расход теплоносителя общий, кг/с	2833	454.9	224	148.2	108.7
Скорость теплоносителя, м/с	2.83	50	49.2	49.8	49.9
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К	6242	5300	1569	1584	1565
Площадь теплообмена, м ²	1354	490	550	361	268

Таблица 9. Результаты конструкционного расчета.

Параметр	Значение				
	Подогреватель	Парогенератор	Пароперегреватели		
			1	2	3
Количество трубок, шт	14562	15636	5010	3284	2439
Масса трубок, кг	3641	3909	1252.2	821.2	609.9
Внутренний диаметр, м	2.33	3.36	1.6	1.3	1.3
Масса кожуха, кг	30254	43093	31027	25327	22032
Масса теплообменника, кг	33895	47002	32279.2	26148.2	22641.9

Полученные характеристики полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к теплообменникам АЭС – обеспечивается заданная производительность, простота исполнения, малый вес конструкции (по сравнению с теплообменниками ВВЭР-1000), а, следовательно, и меньшие капитальные затраты. Эти данные свидетельствуют о том, что при нормировке мощностей реакторов на тепловую, теплообменные аппараты газоохлаждаемого реактора имеют только 49 % от массы парогенераторов, используемых на ВВЭР-1000 [28].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена концепция эффективной АЭС на тепловых нейтронах на основе рассматриваемого реактора. Высокая эффективность такой АЭС достигается за счет следующих факторов:

- Предложены конструкция газоохлаждаемого реактора с оптимальными нейтронно-физическими характеристиками активной зоны и лучшими параметрами кампании топлива.

- Предложенная схема реактора и включения его элементов в цикл Ренкина обеспечивает получение термодинамического КПД на уровне 45.6 % при температуре теплоносителя 500 °С, максимальном давлении пара 20.0 МПа, использовании хорошо отработанных стержневых твэлов.

- Показаны технические возможности достижения высокой сухости получаемого пара, что обеспечивает снижение затрат на изготовление лопаток турбины, в первую очередь, за счет уменьшения необходимой толщины легированных материалов.

ется поисковой задачей. В качестве отправной точки выбрана нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т для труб и кожуха [25]. Трубный пучок набирается из трубок (Ø8×1.0×3000 мм), диаметр которых значительно меньше используемых на парогенераторах АЭС с реакторами типа ВВЭР [26,27]. Шаг треугольной решетки равен 10.5 мм.

- Турбина парового контура может быть построена трехступенчатой с минимальным применением легированных материалов её лопаток, т.к. на выходе турбины достигается высокая сухость пара.

- Тепловыделяющая сборка рассматриваемого газоохлаждаемого реактора может быть построена по упрощенной схеме без теплового экрана. Это приведет к значительному снижению затрат на её создание, уменьшит затраты энергии на прокачку теплоносителя, снизит потерю нейтронов, габариты активной зоны.

- Конструкция тепловыделяющей сборки без теплового экрана позволяет передавать энергию продуктов деления на этапе расхолаживания в контур замедлителя без использования газового контура теплоносителя в течение двух суток после останова реактора;

- Снижена суммарная масса теплообменного оборудования, что снижает затраты на их изготовление, транспортировку и обслуживание.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС – атомная электростанция;
 ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
 ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.
 КПД – коэффициент полезного действия;
 ТВС – тепловыделяющая сборка;
 АВWR – усовершенствованный кипящий реактор;
 CANDU – Канадский дейтерий-урановый реактор;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA's web-accessible database ARIS /Advanced Reactors Information System/
<https://aris.iaea.org/sites/overview.html>
2. **Gas-cooled** power reactors. Directory of Nuclear Reactors. International Atomic Energy Agency//Vienna. – 1968. – Vol. 7, – P. 243 – 302.
3. **International** Atomic Energy Agency, 2001. Current status and future development of modular high temperature gas cooled reactor technology [Z].IAEA-TECDOC-1198: 13-26
4. **Zongxin Wu, Dengcai Lin and Daxin Zhong**. The design features of the HTR-10 // Nuclear Engineering and Design, 2002. V 218. P. 25–32.
5. **Котов В.М., Сураев А.С.** Расчет характеристик газоохлаждаемого реактора с водным замедлителем // Вестник НЯЦ РК. 2014. № 3. С. 87-93.
6. **Kotov, V. M.** Thermal Energetic Reactor with High Reproduction of Fission Materials // Science and Technology of Nuclear Installations. 2012. V 2012. P. 5. doi:10.1155/2012/534541
7. **Udo Zirn, Motonari Haraguchi**. Hitachi turbine generator technology for nuclear applications // www.hitachipowersystems.us.
8. **Решетников, Ф.Г.** Проблемы развития ядерной энергетики // Атомная энергия. 2010. Т. 10. Вып. 6. С. 353 – 354.
9. **V.M. Kotov, G.A. Vityuk and A.S. Suraev**. Possibilities of gas-cooled water-moderated reactors // Atomic Energy. 2014. V 116. № 1. P. 6–13.
10. **Котов В. М. Котов С. В.** Канальный ядерный реактор с интегральными коллекторами: инновационный патент Республики Казахстан № 21276. 2009
11. **Advanced** Boiling Water Reactor (ABWR). Plant General Description // General Electric Nuclear Energy. 1999. P. 149.
12. **ANSYS** Fluent Theory Guide. Release 14.5, 2012 [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. – Электрон. дан. и прогр.– [Б. м.], November, 2017.
13. **Котов В.М., Ерыгина Л.А., Иданова Д.С., Сураев А.С.** Тепловой реактор высокой эффективности // Материалы X Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 8-11 сент. 2015 г. Курчатов, НЯЦ РК. 2015. С. 104–111.
14. **Сураев А.С., Котов В.М.** Исследование процессов теплообмена в схеме АЭС с газоохлаждаемым реактором // Вестник НЯЦ РК. 2015. Вып. 3. С. 65–71.
15. **Котов В.М., Зеленский Д.И.** Газоохлаждаемый реактор с высоким коэффициентом полезного действия. // Межотраслевая межрегиональная научно-техническая конференция "Перспектива развития атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения". Москва, 11-12 ноября 2010 г.
16. **Котов В.М., Витюк Г.А., Сураев А.С.** Возможности газоохлаждаемых реакторов с водным замедлителем // Вестник НЯЦ РК. 2012. Вып. 4. С. 20–27.
17. **Сулейменов Н.А., Витюк В.А., Котов В.М.** Тепловой расчет теплообменников газоохлаждаемого канального реактора // Материалы конференции «International scientific review of the problems and prospects of Modern science and education». Мюнхен, Германия, 7-8 мая 2015.
18. **Маргулова Т. Х.** Атомные электрические станции: Учебник для вузов. 5-е изд. М.: ИздАТ, 1994. 289 с.
19. **Сулейменов Н.А., Витюк В.А., Котов В.М.** Построение t-q диаграммы теплообменников газоохлаждаемого реактора // «Проблемы современной науки и образования / Problems of modern science and education»: Научно-методический журнал. – Москва: Изд. «Проблемы науки». – 2015. №5» (35) 2015. С. 26-29.
20. **Kotov, V. M.** Ternal Reactors with High Reproduction of Fission Materials // Nuclear Power – Practical Aspects. Edited by Wael Ahmed. P.179 – 218. <http://dx.doi.org/10.5772/2580>.
21. **В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев.** Стали и сплавы. Марочник: Справ.очник. М.: «Интернет Инжиниринг», 2001. 608 с.: ил.
22. **Исаев А.Н.** Применение шариковых микротрещин реакторов с газовым теплоносителем в малых водородных реакторах // Атомная техника за рубежом. 2007. № 10. С.12–18.
23. **Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) – Brazil, Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling 2007**, IAEA-TECDOC-1536, P. 373, IAEA, Vienna, (2007).
24. **Long-Life Core Small Nuclear Reactor with Closed Vessel Refueling – Atom For Peace Reactor (AFPR-100) – USA, Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling 2007**, IAEA-TECDOC-1536, P. 367, IAEA, Vienna, (2007).
25. **Сулейменов Н.А., Байгожина А.А., Сураев А.С.** Определение рабочих параметров двух типов тепловыделяющих сборок газоохлаждаемого реактора с разными теплоносителями. // Электронный сборник статей по материалам XIX студенческой международной заочной научно-практической конференции, Новосибирск, 2014.
26. **Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А.** и др. Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР / ФГУП ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2005.
27. **Давиденко С.Е., Трунов Н.Б., Григорьев В.А.** и др. Вопросы продления ресурса парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 / ФГУП ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2005.
28. **V. Kotov, M. Skakov, A. Surayev, L. Yerygina.** Characteristics of gas-cooled reactor with water moderator and Rankine cycle //Abstracts of VII Eurasian conf. «Nuclear Science and its application, Baku, October 21-24, 2014», Baku, IRP ANAS, 2014, p. 307-308.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 4

Технологии водородной энергетики

N.A. Ivanova¹, D.D. Spasov^{1,2}

¹National Research Center «Kurchatov Institute» Russia

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute» Russia

INVESTIGATION OF THE OPEN BIFUNCTIONAL CATHODE FOR UNITIZED REVERSIBLE FUEL CELL: COMPOSITION AND PERFORMANCE

ABSTRACT

Unitized regenerative fuel cell (URFC) can operate both in energy generation (EG) and in hydrogen production (HP). Using URFC reduces the weight and size characteristics of the power plant compared to a stationary system with the independent fuel cell and the electrolyzer. However, its performance also reduces. In this work, we study URFC with an open cathode, which applied as the anode in HP. In this case, the air inflow to the FC cathode in EG, and oxygen outflow from the anode into the environment in HP. The investigation of the electrocatalysts composition for the bifunctional cathode is carried out. The advantages of using a mixture of Pt40/RGO (RGO – reduced graphene oxide) with Ir-black (3 :1) for an open cathode of URFC are shown. The cathode composition presented above doubles the efficiency of ERFC in comparison with URFC based on a mixture of Pt-black and Ir-black (2 :1).

1. INTRODUCTION

URFC with a proton exchange membrane (PEM) combines a fuel cell for EG and an electrolyzer for HP [1]. The above technological solution reduces the mass-size of the energy power plant and lowers its cost. However, it increases the technical complexity of the electrochemical system [2]. Significant importance is given to improve the stability and the efficiency of the catalytic layers in both URFC modes [3,4], which determines the performance and lifetime of the device.

A stable and highly active bifunctional oxygen catalyst, as is known, is one of the critical problems for the oxygen reduction reaction (ORR) and the oxygen evolution reaction (OER) on the URFC air electrode (cathode). Nowadays, the absence of an optimal bifunctional electrocatalyst is the main barrier to the introduction of URFC as an effective electrochemical device. The performance of the URFC depends on the reversibility of the electrode reaction, which is closely related to the activity of bifunctional catalysts [5]. Regarding bifunctional catalysts, the use of various supports is critical to ensure a high surface area and dispersion of catalytic particles. Different bifunctional catalysts based on multiple carriers (carbon, modified carbon, and non-carbon carriers) are studied [6].

Platinum is the long-using and still the most efficient and stable bifunctional hydrogen catalyst for URFC [7]. Great efforts were to reduce the electrocata-

lyst loading to 0.5 mg/cm², given the deficit and high cost of Pt.

The cathode catalytic layers (CL) participate in the reaction of reduction and oxygen evolution. These catalysts should have high catalytic activity, long-term stability, high electronic conductivity, and low cost. Currently, the selection of cathode catalysts for URFC is still limited to noble metal catalysts. Various research works were carried out, including the optimization of both composition and the support of the catalyst [8].

Today, most cathode electrocatalysts used in URFC are still noble metals based on a combination of platinum (Pt), ruthenium (Ru), iridium (Ir), and their oxides. Pt is the preferred catalyst for the ORR, but not suitable for the OER. In contrast, preferred catalysts for the OER, such as Ru, Ir, and their oxides, are not suitable for ORR. Therefore, a compromise is achieved by combining Pt with Ru, Ir, or their oxides in a composite electrocatalytic layer.

The authors of [9] found that the Pt-Ir double interaction region is highly active, both ORR and OER with improved corrosion resistance. However, the activity and stability of a mixture of Pt-Ru-Ir were slightly lower than Pt-Ir. Ru and its oxides turn out to be unstable under operating conditions of URFC [10]. Thus, the combination of Pt and Ir or its oxides is currently the leading choice of a cathode electrocatalyst. Now, various studies are being carried out on their elemental ratio, the method of preparation of the catalyst, microstructure, etc.

From [11], it follows that there is no specific optimal ratio between Pt-black and Ir-black, of which the proportion of Ir (or IrO₂) can vary from 1 wt. % to 50 wt. % in various studies. This discrepancy may be due to various methods of preparation of the catalyst/electrode. In general, the proportion of Pt-black should be more than half, due to the inability of Ir to participate in the oxygen reduction reaction. In addition to the direct mixing of the catalysts, various synthesis methods have been developed, including Pt supported on IrOx and IrOx supported on Pt [12]. Electrocatalysts obtained by these methods have better characteristics vs the Pt-black and Ir-black mechanic mixture.

The catalyst carrier plays an important role in the operation of the URFC. Vulcan XC-72 carbon black is used as a carrier in a standard FC with PEM. Due to the high anodic potentiodynamic polarization, this carrier is not suitable for URFC [13]. The titanium oxides, titanium carbides, and graphitized carbon are investigated as proposed carriers.

For a cathode in an FC with PEM, hydrophobized carbon paper or carbon cloth is used as gas diffusion electrodes (GDE) [14]. The gas diffusion base, which is pure carbon paper or cloth, is usually one-side coated with a hydrophobic microporous layer (MPL). The primary function of the MPL is to remove water from the active sites of the catalytic layer. A thin titanium plate of titanium powder usually used as an electrode for an electrolyzer [15]. The performance of the URFC battery in both hydrogen production and energy generation requires GDE optimization to provide high efficiency of inflow and outflow of the gases.

It is important to control the water balance in the catalytic layer. On the one hand, an FC operation needs hydrophobic support of CL to prevent flooding of the active sites. On the other hand, the electrolyzer operation needs hydrophilic support of CL. This issue implies a delicate balance between the content of the hydrophobized carbon support and the hydrophilic ionomer into the electrocatalyst layer, especially for the cathode electrode [16].

The aim of our research work was to determine the composition and performance of the bifunctional cathode URFC. We studied the effects of various compositions and GDE on the performance of the MEAs in EG and in HP.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Electrocatalyst synthesis

A reduced graphene oxide (RGO) was used as the support. RGO synthesis was described in [17]. The synthesis of Pt40/RGO (40 wt.% of Pt), Pt black, and Ir black catalysts were carried out by a chemical reduction method using ethylene glycol as described in [18].

2.2 Structural studies

We studied electrocatalysts on a scanning/transmission electron microscope (S/TEM) TitanTM 80-300 S/TEM (Thermo-Fisher Scientific, Beverly, MA, USA) (80-300 kV).

2.3. Electrochemical studies

Cyclic voltammograms (CVs) were recorded using potentiostat Solartron 1285 (AMETEK, Inc., Berwyn, PA, USA) at 25 ± 2 °C with a sweep rate of 20 mV/s in a deaerated 0.5 M H₂SO₄ solution saturated with N₂ at atmospheric pressure. The reference electrode was Ag\AgCl\KCl saturate, and the counter electrode was Pt-wire.

2.4. Electrodes and MEAs preparation

The electrocatalytic layer was placed directly to the Nafion® 212 membrane. The pre-prepared membrane in H⁺-form was fixed using a vacuum. Catalytic ink, which is a mixture of a catalyst and an ionomer in a water-alcohol solvent, was sprayed to the membrane using an airbrush.

The membrane-electrode assemblies (MEAs) consisted of anodic and cathodic gas diffusion layers (GDLs) and a polymer ion-exchange membrane with deposited CL. We used the ELAT® 1400 LT brand with a one-side MPL as the GDL. We also used hydrophilic carbon cloth («RC», Russian) without a MPL. We used a URFC with an open cathode, which applied as the anode in HP. The area of the electrodes is 7 cm².

2.5. The electrochemically performances

Energy generation (EG). The i-V curves were recorded using the Solartron 1285 (AMETEK, Inc., Berwyn, PA, USA) potentiostat in the potential range from 0.9 to 0.1 V in the potentiodynamic mode with a sweep rate of 0.2 mV/s. Registration in the potentiostatic mode was carried out at 0.5 V for 2 hours. The operating temperature of the cell is 35 °C. The URFC was fed by dry hydrogen to the anode and atmospheric air to the open cathode using a compressor without humidity control.

Hydrogen production (HP). The i-V curves were recorded using an automated current source and a multimeter at 60 °C and 80 °C. First, the URFC in HP worked in the potentiostatic mode at 1.5 V, and then the i-V curves were recorded.

URFC tests were also carried out by cycling the operating modes to determine the durability of its operation. The water supply to HP takes place in the anode.

Switch-over between URFC modes was carried out after 1 hour of stable operation of the device. The i-V curves were removed immediately before the regime change. The total number of cycles was 30.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Results of structural studies

Fig. 1 shows TEM images of CL used for the open cathode of the URFC.

For the Pt40/RGO electrocatalyst, the average individual Pt-particles size was about 3.3 nm. As can be seen, platinum particles uniform distributed the surface of the carrier (fig. 1A, B). Figure 1c shows the catalytic layer placed on the membrane with a loading of the catalysts equal to 1 mg/cm² and an ionomer content of 22 wt.%. The thickness of the supported catalyst layer is close to the thickness of the membrane and equal to 40-45 μm.

Fig. 2 shows a SEM image of a mechanical mixture of Pt-black and Ir-black particles (PtIr) in a 2:1 ratio deposited on an MPL of the GDL (ELAT® 1400 LT carbon cloth) and pure carbon cloth RC (Russia). The average size of particles of a PtIr (2:1) was about 6.5

nm. It is noted the high uniform distributed of the deposited layer and the absence of significant agglomeration of particles.

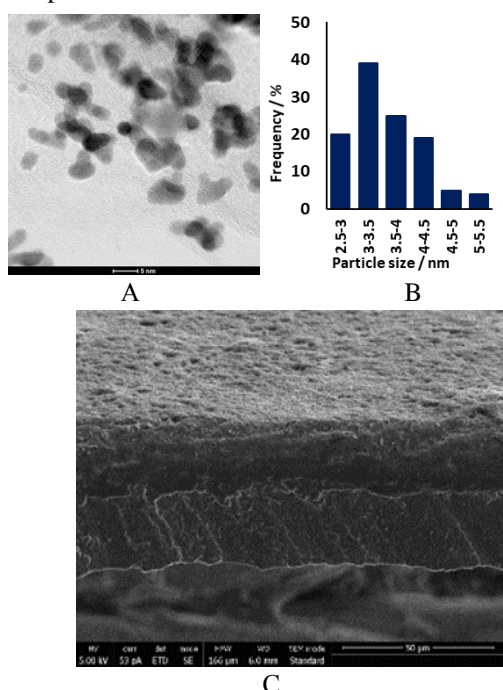


Fig. 1 TEM image of Pt40/RGO (a, scale bar 5 nm) and particle size distribution (A), as well as the CL on the membrane (C, scale bar 50 μm, ionomer content 22 wt.%).

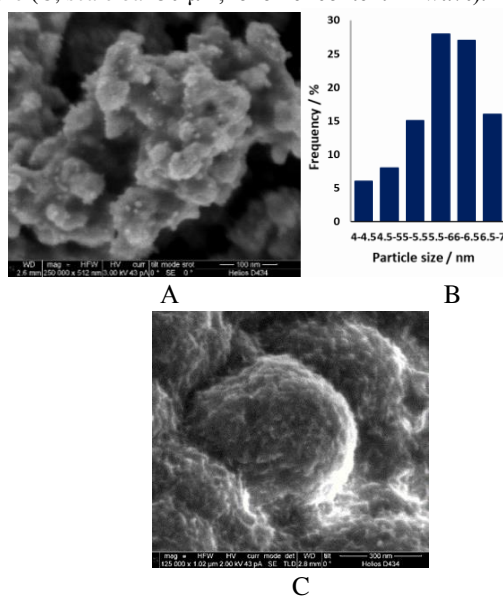


Fig. 2 SEM images of a mechanical mixture in ratio 2:1 of Pt-black and Ir-black (a, scale bar 100 nm) with particle size distribution (B) and pure carbon cloth RC (C, scale bar 300 nm).

3.2. Results of electrochemical studies

The catalyst's electrochemically active surface area (EASA) was calculated using the hydrogen adsorption-desorption peaks at $-0.15 - -0.2$ V vs. Ag/AgCl (sat.) as described in [17]. EASA for the Pt40/RGO sample was 48 m²/g, for the Pt-black was 18 m²/g. On both curves, pronounced peaks are observed in the region of hydrogen desorption, corresponding to reflections from the

face-centred cubic lattice (FCC) of platinum Pt (111) and Pt (200) (fig. 3a). The surface of the carbon-supported catalyst is higher due to the smaller particle size and their more dispersion.

The shape of the CV curve for Ir black (fig. 3b) is characterized by the presence of several broad peaks at potentials > 0.4 V, corresponding to redox transitions in the solid-state that occur due to the adsorption and oxidation of oxygenated particles from the electrolyte.

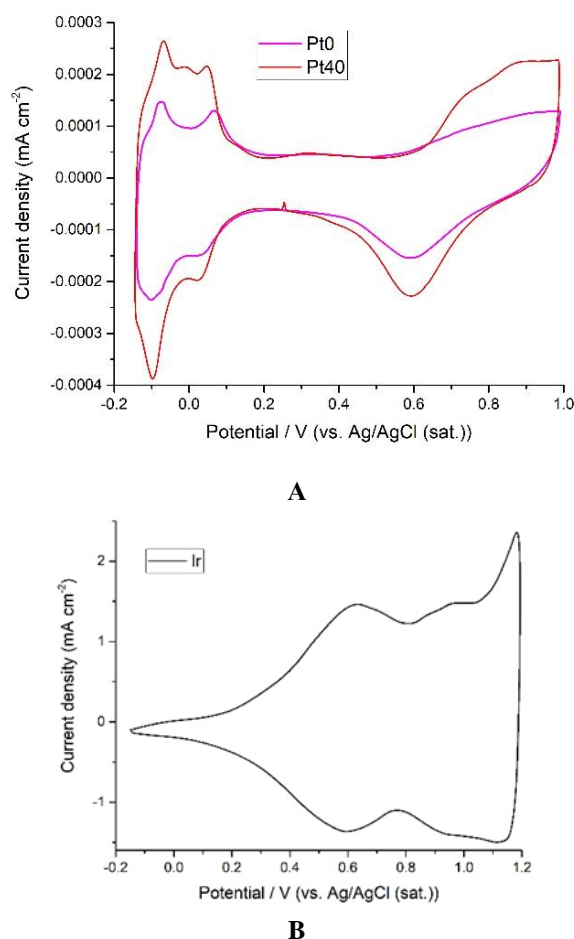


Fig. 3 CVs for Pt40/RGO and Pt-black (F) and for Ir-black (B) catalysts recorded in 0.5 M H₂SO₄ solution at 25 ± 2 °C, and a sweep rate of 20 mV/s

3.3. Testing MEAs URFC

Energy generation

Fig. 4 shows the i-V and power curves of the MEAs with different catalysts composition on the open cathode. The presence of Ir-black did not significantly affect the performance of URFC in EG, regardless of the composition of the catalytic mixture on the cathode and the GDL used (red and green lines in fig. 4).

The MEA in which a mixture of Pt40/RGO and Ir-black was used in a ratio of 3:1, GDL – ELAT® 1400 LT, the current density at an operating mode of 0.5 V is 0.28 A/cm². This performance was the maximum

among all studied MEAs. The result in the case of using a similar cathode, but hydrophilic GDL – «RC» was inferior to the previous one and was 0.22 A/cm^2 . This due to difficulties in the removal of water from active sites of the catalyst and partial flooding of the CL.

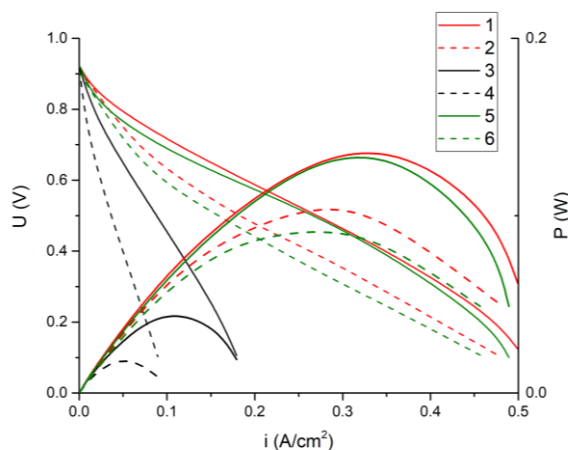


Fig. 4. i-V and power curves for MEAs URFC in EG with various catalysts on the cathode (red lines - Pt40/RGO, green lines - a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black (Pt40/RGO_Ir) in the ratio 3:1, black lines - a mechanical mixture of Pt-black and Ir-black in a ratio of 2: 1) and GDEs (solid line – ELAT® 1400, dotted line - hydrophilic cloth «RC»): 1 –Pt40/RGO, GDE - ELAT; 2 - Pt40/RGO, GDE – «RC»; 3 - PtIr (2: 1), GDE - ELAT; 4 PtIr (2: 1), GDE – «RC»; 5 - Pt40/RGO_Ir (3: 1), GDE - ELAT; 6 - Pt40/RGO_Ir (3: 1), GDE – «RC»). The catalysts loading equal to 2 mg/cm^2 . Anode catalyst was Pt40/C10 (= 40 wt.% of platinum on Vulcan XC-72 with 10 wt. % of PTFE). The loading of the catalyst was 1 mg/cm^2 . Membrane was Nafion 212.

A significantly lower performance was obtained for the MEA, which used a PtIr (2:1). In the case of hydrophobic GDL, this is due to the low performance of the CL, which reduces the rate of electrochemical processes. Another reason was the low EASA of the Pt-based catalyst compared to Pt40/RGO. A significant drop in efficiency when using a PtIr mixture and hydrophilic GDE is explained by the formation of a film of liquid water which flooding the active sites in the volume of the CL. The use of an open cathode causes additional difficulties in supplying reagents to the CL of the cathode, which reduces the overall performance of the URFC in EG.

The use of an open cathode causes additional difficulties in feeding reagents to the CL of the cathode, which reduces the overall performance of URFC in EG. At the same time, the MEAs water balance management under conditions of feed of dry reagents causes considerable difficulties. As shown in figure 5 hydrophilic

GDL allowed improving the quality of water balance control in URFC and maintaining high current density values (voltage 500 mV) for 30 minutes compared to 10 minutes for hydrophobic GDL. Note that both electrodes were carbon cloth of similar thickness and structure.

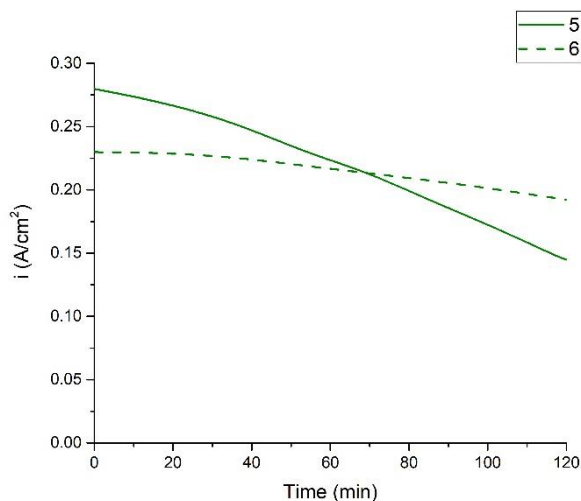


Fig. 5. Potentiostatic curves at a voltage of 500 mV for MEAs 5 - a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black in a ratio of 3:1, GDL - ELAT and 6 - a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black in a ratio of 3:1, GDL – «RC». The catalysts loading equal to 2 mg/cm^2 . Anode catalyst was Pt40/C10. The loading of the catalyst was 1 mg/cm^2 . Membrane was Nafion 212.

Hydrogen production

In HP, the open cathode of URFC operate as the anode of the electrolyzer. We noted that the supply of water in HP was carried out in the cathode of the electrolyzer. Due to the high anodic potentiodynamic polarization, the air electrode should have the highest degradation stability. Therefore, a mechanical mixture of Pt-black and Ir-black was most often used as a bifunctional CL [18]. However, due to the low performance of the catalytic layer in EG, CL based on a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black was also studied. The result obtained is shown in fig. 6.

The use of hydrophobic GDL reduced the performance of URFC regardless of the structure of the electrocatalytic layer (fig. 6) since the determining factor was the low rate of water supply to the cathode through the membrane. Performance of URFC, in this case, determined by the water feed rate.

In turn, the MEA URFC with a bifunctional cathode based on a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black in a ratio of 3:1 was not inferior in performance to a cathode based on a mechanical mixture of Pt-black and Ir-black in a 2:1 rate and even surpassed the latter (fig 6).

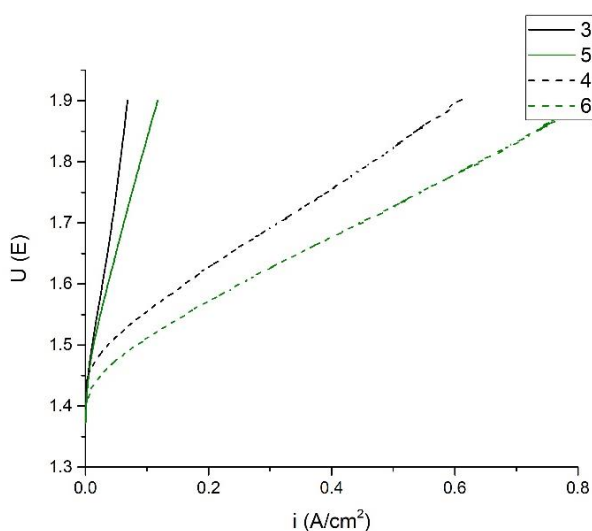


Fig. 6. i-V curves for the MEAs URFC for HP with various catalysts at the cathode (green lines - Pt40/RGO_Ir (3:1), black lines - PtIr (2:1) and GDL (solid line – ELAT® 1400, dotted line - hydrophilic cloth «RC»): 3 -, GDL - PtIr (2:1), ELAT; 4 - PtIr (2:1), GDL – «RC»; 5 - Pt40/RGO_Ir (3:1), GDL - ELAT; 6 - Pt40/RGO_Ir (3:1), GDL – «RC»). The loading density was equal to 2 mg/cm². Anode - Pt40/C10. The loading of the catalyst is 1 mg/cm². Membrane was Nafion 212.

The data obtained are showed that the advantages of using a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-lack in a 3:1 ratio as a bifunctional open cathode of URFC are deposited on a membrane in combination with GDL based on hydrophilic cloth. This result is determined by the low performance of the used CL in EG and the need to supply water through the anode. URFC showed the stability of the obtained characteristics during 30 cycles during the changing of modes. The improved durability of the Pt/RGO catalyst was related to the structure and properties of the RGO-carrier and was described in detail in the [17].

4.CONCLUSION

In the present work, we studied URFC with an open cathode FC, which acts as the anode of the electrolyzer. Air is supplied to FC cathode, and oxygen in the electrolyzer is released into the environment. The study and optimization of the composition of the electrocatalytic layer of the bifunctional cathode was carried out. The advantages of using a mixture of Pt40/RGO and Ir-black as a cathode of URFC of this design were shown in comparison with a mixture of Pt-black and Ir-black both in terms of performance (2 times higher). It was concluded that the advantages of using a mechanical mixture of Pt40/RGO and Ir-black in a ratio of 3:1 as a bifunctional open cathode of URFC are applied to the membrane in combination with GDE based on hydrophilic cloth. This result is determined using RGO as catalytic support in the cathode CL and the need to supply water through the anode. URFC showed stability of

the obtained indicators during 30 cycles of switching modes.

LIST OF DESIGNATIONS

URFC - unified regenerative fuel cell.

GDE - gas diffusion electrode.

S/TEM – scanning and transmission electron microscope.

MEA – membrane-electrode assemblies.

CV - cyclic voltammogram.

EASA - electrochemical active surface area

EG - energy generation

HP – hydrogen production

Acknowledgement

This study was supported by National Research Centre “Kurchatov Institute” (directive No 1808 from 14.08.2019, subprogram 6) and the Russian Foundation for Basic Research according to the research project No 18-29-23030.

REFERENCES.

1. **Rabih, S.**, et al. Experimental study of a PEM reversible fuel cell // International Conference On Renewable Energies And Power Quality (Icrep'11)–Las Palmas De Gran Canaria. 2011.
2. **Gabbasa, Mohamed**, et al. A review of unitized regenerative fuel cell stack: Material, design and research achievements // International Journal of Hydrogen Energy 2014, N 39.31. P. 17765-17778.
3. **Wang, Y. J., Fang, B., Wang, X., Ignaszak, A., Liu, Y., Li, A., ... & Zhang, J.** Recent advancements in the development of bifunctional electrocatalysts for oxygen electrodes in unitized regenerative fuel cells (URFCs) // Progress in Materials Science, 2018. N. 98. P. 108-167.
4. **Pavlov, V. I.**, et al. Degradation of Pt/C electrocatalysts having different morphology in low-temperature PEM fuel cells // Nanotechnologies in Russia, 2016. N. 11. P. 743-750.
5. **Hu, S., Goenaga, G., Melton, C., Zawodzinski, T. A., & Mukherjee, D.** PtCo/CoOx nanocomposites: Bifunctional electrocatalysts for oxygen reduction and evolution reactions synthesized via tandem laser ablation synthesis in solution-galvanic replacement reactions // Applied Catalysis B: Environmental, 2016. N. 182. P. 286-296.
6. **Li, Y., Gong, M., Liang, Y., Feng, J., Kim, J. E., Wang, H., ... & Dai, H.** Advanced zinc-air batteries based on high-performance hybrid electrocatalysts // Nature communications, 2013. N. 4(1). P. 1-7.
7. **Zhang, Y., Ding, Y., & Zhao, X.** Improvement of electrochemical properties of modified unitized regenerative fuel cells through a fluorination technique // Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018. N. 10(4). P. 044302.
8. **Cruz, J. C.**, et al. Nanosized Pt/IrO₂ electrocatalyst prepared by modified polyol method for application as dual function oxygen electrode in unitized regenerative fuel cells // International journal of hydrogen energy, 2012. N. 37.7. P. 5508-5517.
9. **Rivas, S.**, et al. Evaluation of Pt-Ru-Ir as bifunctional electrocatalysts for the oxygen electrode in a unitized regenerative fuel cell // Int. J. Electrochem. Sci., 2012. N. 7.4. P. 3601-3609.

10. **Takasu, Yoshio, Norihiro Yoshinaga, and Wataru Sugimoto.** Oxygen reduction behaviour of RuO₂/Ti, IrO₂/Ti and IrM (M: Ru, Mo, W, V) Ox/Ti binary oxide electrodes in a sulfuric acid solution // *Electrochemistry Communications*, 2008. N. 10.4. P. 668-672.
11. **Antolini, Ermete.** Iridium as catalyst and cocatalyst for oxygen evolution/reduction in acidic polymer electrolyte membrane electrolyzers and fuel cells // *Acs Catalysis*, 2014. N. 4.5. P. 1426-1440.
12. **Cruz, J. C.,** et al. Nanosized Pt/IrO₂ electrocatalyst prepared by modified polyol method for application as dual function oxygen electrode in unitized regenerative fuel cells // *International journal of hydrogen energy*, 2012. N. 37.7. P. 5508-5517.
13. **Huang, Sheng-Yang,** et al. Development of supported bifunctional oxygen electrocatalysts and corrosion-resistant gas diffusion layer for unitized regenerative fuel cell applications // *Journal of Power Sources*, 2012. N. 198. P.23-29.
14. **Park, Sehkyu, and Branko N. Popov.** Effect of a GDE based on carbon paper or carbon cloth on PEM fuel cell performance // *Fuel*, 2011. N. 90.1. P. 436-440.
15. **Grigoriev, S. A.,** et al. Optimization of porous current collectors for PEM water electrolyzers // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009. N. 34.11. P.4968-4973.
16. **Jung, Ho-Young, Prabhu Ganesan, and Branko Popov.** Development of high durability bi-functional oxygen electrode for unitized regenerative fuel cell (URFC) // *ECS Transactions*, 2009. N. 25.1, P. 1261.
17. **Grigoriev S. A.** et al. Reduced graphene oxide and its modifications as catalyst supports and catalyst layer modifiers for PEMFC // *Materials (Basel)*, 2018. N. 11.
18. **Spasov D D, Ivanova N A, Pushkarev A S, Pushkareva I V, Presnyakova N N, Chumakov R G and Fateev V N.** On the Influence of Composition and Structure of Carbon-Supported Pt-SnO₂ Hetero-Clusters onto Their Electrocatalytic Activity and Durability in PEMFC // *Catalysts*, 2019. N. 9. P. 803.
19. **Mosa, I M, Biswas S, El-Sawy A M, Botu V, Guild C, Song W and Suib S L.** Tunable mesoporous manganese oxide for high performance oxygen reduction and evolution reactions // *Journal of Materials Chemistry A*, 2016. N. 4(2). P.620-631.

*Д.В. Блинов^{1,2}, А.В. Бездудный¹, В.И. Борзенко¹, А.Н. Казаков¹, В.Н. Кулешов²,
В.И. Порембский³*

¹Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАЛЫХ РАСХОДОВ ВОДОРОДА ПРИ ПОМОЩИ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО/НАГРЕВАЕМОГО ЗА СЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты разработки металлгидридного реактора РХА-1, охлаждаемого/нагреваемого за счет естественной конвекции воздуха и предназначенном для хранения 2 норм.м³ водорода и питания топливного элемента (ТЭ) с малым расходом (до 0,1 норм.м³/ч). Представлены также экспериментальные исследования тепловых процессов при сорбции/десорбции водорода в реакторе РХА-1.

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология твердофазного обратимого хранения водорода в металлических гидридах (МГ) известна с 60 х годов прошлого столетия и характеризуется повышенной безопасностью при хранении, сравнительно высокой объемной плотностью и некоторыми другими преимуществами по сравнению с хранением жидкого или сжатого водорода [1-3]. Перспективными материалами для комплексного решения проблем аккумулирования, очистки и повышения давления водорода могут быть сплавы низкотемпературных интерметаллических соединений (ИМС) семейства LaNi₅. Сплавы этой группы отличаются высокой устойчивостью к примесным газам, циклической стабильностью, возможностью использования сетевой воды или воздуха в качестве теплоносителя [4-7]. Варьирование состава позволяет подобрать сплав с необходимыми давлениями абсорбции/десорбции в диапазоне температур 0 – 100°С для удовлетворения требований как по хранению, так и по начальному компримированию водорода. При этом стоит отметить, что лимитирующим фактором сорбции водорода является внутренний теплообмен (от металлгидридной засыпки в внешней стенке реактора), т.к. в активированном состоянии ИМС представляют собой мелкодисперсные порошки с размером частиц порядка 1–10 мкм, обладающие сравнительно низкой эффективной теплопроводностью (порядка 1 Вт/м·К), препятствующей интенсивному отводу (подводу) тепла при сорбции (десорбции) водорода. При этом теплопроводность зависит от давления заполняющего

газа и концентрации поглощенного водорода в частицах сплава, а равновесное давление водорода над твердой фазой существенно зависит от температуры частиц сплава [8-10]. Эти обстоятельства в сочетании с большим тепловым эффектом реакции поглощения/выделения водорода (25–70 кДж/моль) приводят к тому, что недостаточно эффективный подвод и отвод тепла к засыпке водородопоглощающего материала существенно снижает скорости поглощения и выделения водорода устройством [11-13].

Большинство разработок металлгидридных устройств направлены на изменение теплофизических свойств засыпок ИМС с целью повышения их эффективной теплопроводности (смешивание и/или спекание с порошками высокотеплопроводных материалов: порошок меди или алюминия, пеномедь и т.п.) или на развитие поверхности теплообмена, заключающееся во введении в засыпку ИМС дополнительных теплообменных поверхностей для интенсификации процесса теплоотдачи (оребрение, спирали, гофрирование и т.п.) [14]. Как правило, для больших расходов газа, чтобы обеспечить необходимую скорость десорбции используют различные методы нагрева ИМС (пар, вода, электронагреватели). Однако, для малых расходов водорода (до 0.1 норм.м³/ч) можно отказаться от использования промежуточного теплоносителя и дополнительных затрат электроэнергии. В работе [15] на основе балансовой модели были предложены критерии бескризисной работы металлгидридного устройства хранения водорода из которых следует, что в случае относительно небольших расходов в МГ реакторах хранения водорода возможен отказ от внешнего теплообменника и использование давления в качестве основной термодинамической движущей силы процесса сорбции.

Целью данной работы было создание экспериментального реактора РХА-1 с заданными техническими характеристиками (Таблица 1), предназначенного для хранения водорода и питания ТЭ, при

этом реактор должен работать за счет свободной конвекции окружающего воздуха для обеспечения сорбции и десорбции водорода.

Таблица 1. Технические характеристики реактора РХА-1

Параметр	Значение, ед. изм.
Емкость по водороду, не менее	2.0 м ³
Номинальное давление водорода при зарядке, не более	1.0 МПа
Номинальное давление водорода при выдаче, не менее	0.2 МПа
Номинальный расход водорода при зарядке	0.1 м ³ /ч
Номинальный расход водорода при выдаче	0.08 м ³ /ч
Температура окружающей среды	20±1.0 °С
Максимальная температура	60 °С

Технические характеристики реактора обусловлены параметрами при совместной работе с топливным элементом и источником генерации водорода (электролизером). В этих условиях подбор композиции гидридообразующего сплава, имеющего равновесное давление должно составлять не ниже 0.2 МПа при комнатной температуре. Такие параметры можно обеспечить за счет использования ИМС на основе системы La-Ce-Ni.

2. ВЫБОР ВОДОРОДПОГЛАЩАЮЩЕГО СПЛАВА

На основе закона Вегарда, равновесное давление водорода и термодинамические функции монотонно изменяются в пределах однофазной области твердых растворов. На основе экспериментальных данных из литературных источников и разработанной в МГУ [16] полуэмпирической модели были определены перспективные составы для использования в системе хранения РХА-1 на основе тройной системы La-Ce-Ni. Методом дугового плавления в аргонной атмосфере были изготовлены лабораторные образцы интерметаллических соединений (ИМС) следующих составов: La_{0.9}Ce_{0.1}Ni₅, La_{0.85}Ce_{0.15}Ni₅, La_{0.8}Ce_{0.2}Ni₅, La_{0.7}Ce_{0.3}Ni₅. Проведен рентгенофазовый анализ, который подтвердил однофазность полученных образцов со структурным типом CaCu₅. После проведенных предварительных исследований водородпоглощающих свойств лабораторных образцов, состав La_{0.85}Ce_{0.15}Ni₅, обладающий подходящими рабочими характеристиками, был отобран для применения в системе РХА-1. Экспериментальная партия массой 20 кг была приготовлена вакуумно-индукционным плавлением. На рисунке 1 представлены изотермы десорбции сплава в виде диаграммы давление-состав-температура (P-C-T), а в табл.2 представлены водородпоглощающие свойства сплава.

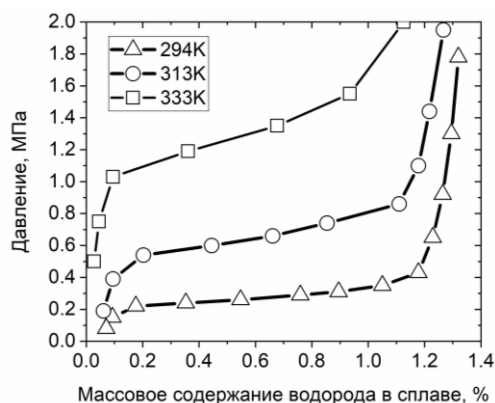


Рис. 1. Изотермы десорбции сплава La_{0.85}Ce_{0.15}Ni₅.

Таблица 2. Водородопоглощающие свойства сплава La_{0.85}Ce_{0.15}Ni₅

Состав ИМС	C _{макс} , %масс.	C _{обр} , %масс.	ΔH _{дес} , кДж/моль	ΔS _{дес} , Дж/моль К
La _{0.85} Ce _{0.15} Ni ₅	1.3	1.15	33.2	121.6

3. КОНСТРУКЦИЯ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО РЕАКТОРА

Металлогидридный реактор РХА-1 является устройством твердофазного обратимого хранения водорода и может быть использован в энергоустановках на основе ТЭ, в качестве источника газаносителя в хроматографии и др. Технические характеристики см. Табл. 1.

Реактор РХА-1 (рис 2) состоит из четырех емкостей (поз. 1) выполненных из нержавеющей стали толщиной 3 мм. Каждая емкость оснащена механическим фильтром (поз. 2) и отсечным ручным шаровым краном (поз. 3). Емкости на 50 % объема заполнены гидридообразующим сплавом и объединены общим коллектором (поз. 4) с внешним отсечным шаровым краном (поз. 5) и стрелочным манометром (поз. 6). Входной/выходной патрубков подсоединяется к внешнему отсечному клапану (поз.5). Соединения выполнены компрессионными уплотнениями типа Swagelok с метрическим типоразмером – 8 мм. Каждая емкость реактора заполнена интерметаллическим сплавом La_{0.85}Ce_{0.15}Ni₅ в количестве 4.5 кг. Общее количество сплава в реакторе РХА-1 – 18 кг.

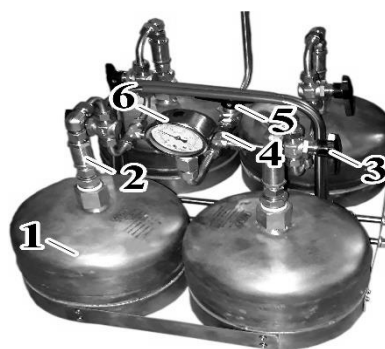


Рис. 2. Металлогидридный реактор РХА-1.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИИ/ДЕСОРБЦИИ

Методика проведения экспериментальных исследований процессов при сорбции водорода заключалась в следующем: предварительно откачанный реактор РХА-1 был подключен к газораспределительной системе установки 12-04 ОИВТ РАН (Рис.3), после чего водород из газового баллона подавался с заданным ограничением по расходу <2 норм.л/мин через расходомер-регулятор компании Bronkhorst серии EL-Flow (РР_{вх} на Рис.3) при открытом кране В_{вх} и В₁. Охлаждение металлургической системы осуществлялось путем естественной конвекции воздуха в помещении. Температура окружающего воздуха составляла 20°C. Входное давление ДД_{вх} составляло 1.08 МПа.

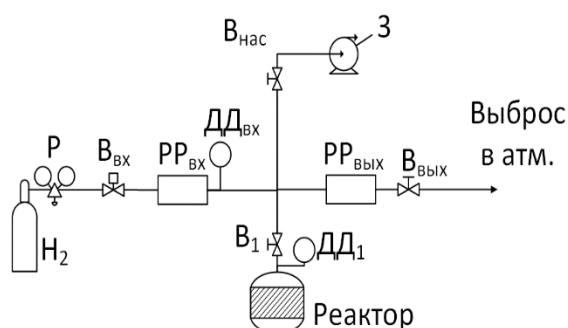


Рис. 3. Схема экспериментального участка.

Эксперимент проводился в два этапа. Первый этап зарядки длился 258 минут, ограничение расхода на входе (РР_{вх}) составляло 1.67 норм.л./мин.

Второй этап зарядки длился 350 минут, ограничение расхода на входе (РР_{вх}) составляло также 1.67 норм.л./мин. Результаты представлены ниже на Рис.4 и Рис. 5. На рис. 4 на 220 мин и рис.5 на 175 мин пики вызваны влиянием вынужденной конвекции воздуха при небольшом обдуве поверхности стенки одной из емкостей реактора РХА-1.

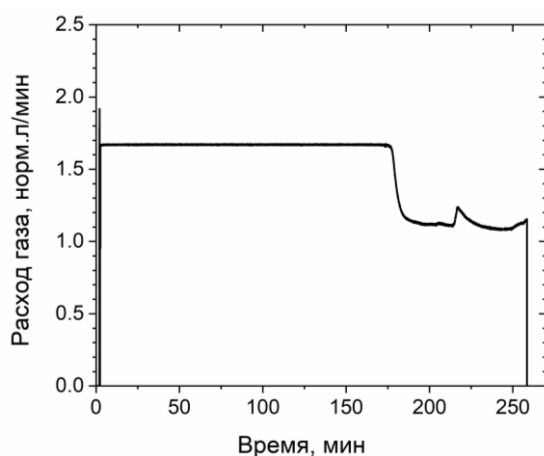


Рис. 4. Фактический расход водорода в ходе сорбции. Первый этап.

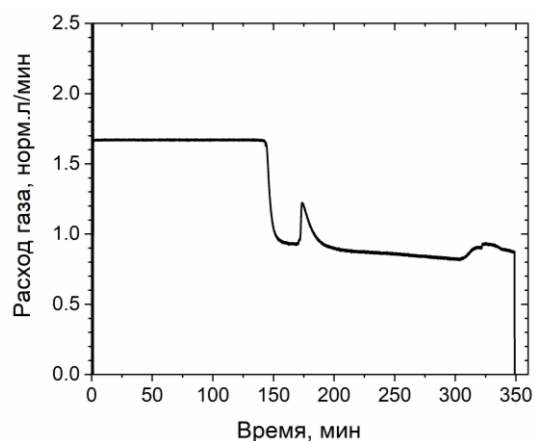


Рис. 5. Фактический расход водорода в ходе сорбции. Второй этап.

Характерное падение расхода газа на 175 и 140 минутах (Рис.4 и Рис.5 соответственно) при зарядке вызвано кризисными процессами тепломассопереноса [15]. В результате эксперимента за 2 этапа зарядки вызвано кризисными процессами тепломассопереноса [15]. В результате эксперимента за 2 этапа зарядки вызвано кризисными процессами тепломассопереноса [15]. В результате эксперимента за 2 этапа зарядки вызвано кризисными процессами тепломассопереноса [15]. В результате эксперимента за 2 этапа зарядки вызвано кризисными процессами тепломассопереноса [15].

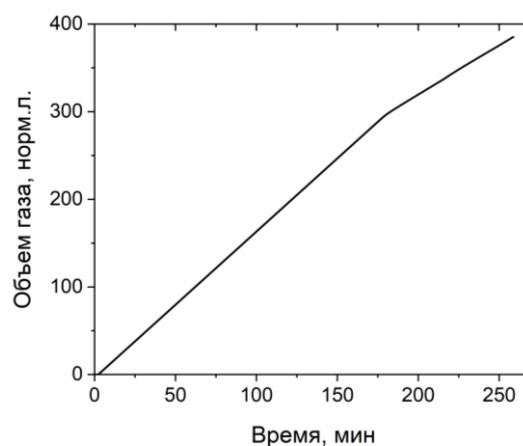


Рис. 6. Интегральный объем водорода. Первый этап.

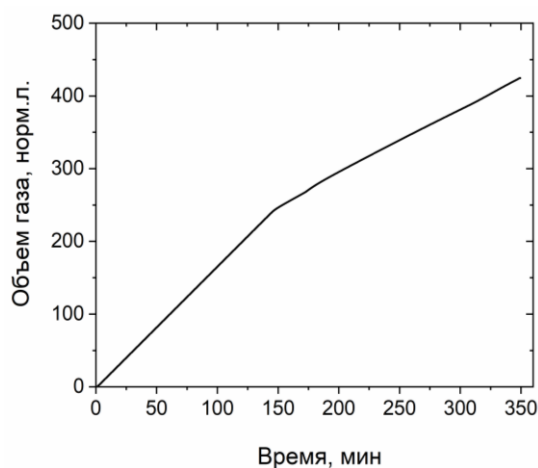


Рис. 7. Интегральный объем водорода. Второй этап.

Методика экспериментов по десорбции водорода из объема реактора заключалась в следующем: предварительно заряженный реактор «РХА-1» помещен на открытый воздух при температуре окружающей среды в 20°C, после чего открывался шаровой кран (B_1 и $B_{\text{вых}}$ на рис.3) и устанавливалось ограничение расхода 2 норм.л./мин на регуляторе расхода компании Bronkhorst серии EL-Flow ($PP_{\text{вых}}$ на рис.3).

Нагрев металлгидридной системы также осуществлялся путем естественной конвекции воздуха в помещении, без какой-либо принудительной подачи теплоносителя. Результаты экспериментов по десорбции водорода представлены на Рис. 8 – 11.

Эксперимент по разрядке реактора проводился также в два этапа.

На первом этапе разрядки (Рис.8) выпускной коллектор был открыт в течение 323 минут. В результате десорбировано интегрально 516 норм.л. водорода (Рис.9).

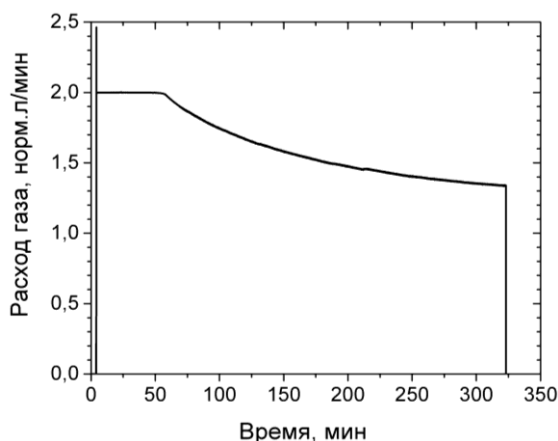


Рис. 8. Фактический расход водорода в ходе десорбции. Первый этап.

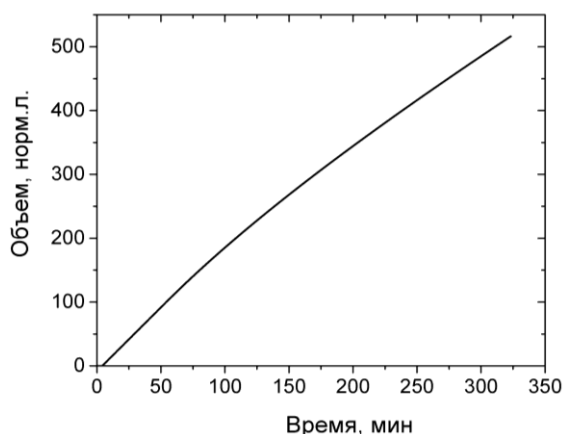


Рис. 9. Интегральный объем водорода. Первый этап.

В ходе второго этапа выпускной коллектор был открыт в течение 184 минут (Рис.10). Десорбировано интегрально 282 норм.л. водорода (Рис.11).

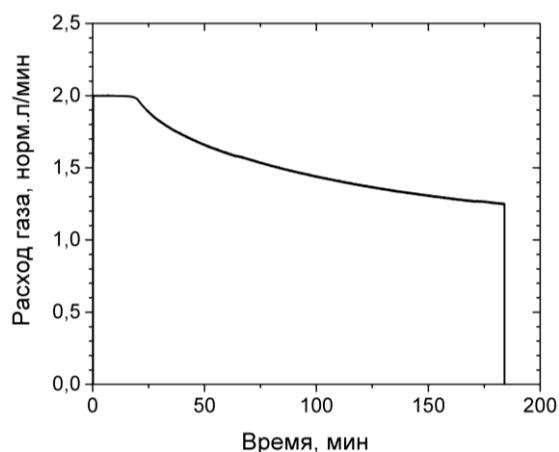


Рис. 10. Фактический расход водорода в ходе десорбции. Второй этап.

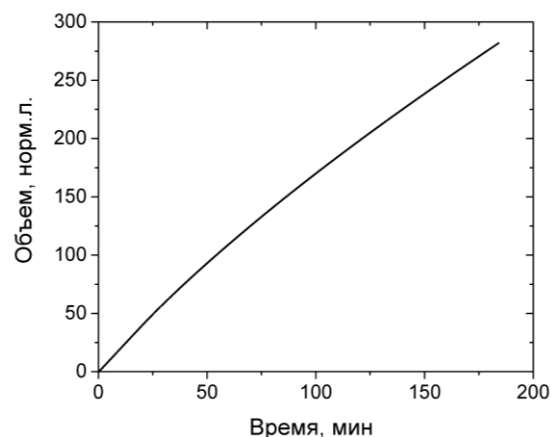


Рис. 11. Интегральный объем водорода. Второй этап.

Наличие кризиса тепло-и массообмена является важной особенностью металлгидридных устройств. В условиях свободной конвекции воздуха при малом коэффициенте теплоотдачи (до 25 Вт/м²К) эффективность терморегулирования металлгидридного реактора достаточно низка, что вызывает падение расхода водорода из-за кризиса массообмена. Сбалансированные режимы заряда/разряда реактора позволяют избежать кризисных явлений и дает возможность вести процесс при постоянном расходе водорода. Как видно из представленных данных (Рис.4, Рис.5, Рис.8 и Рис.10), процесс сорбции/десорбции водорода возможно «термостабилизировать» для условий небольших расходов водорода путем увеличения массы засыпки металлгидридного реактора. В данном случае падение скорости зарядки/разрядки ректора будет сильно растянуто по времени, что дает возможность обеспечить необходимый диапазон малых расходов газа (до 0.1 норм.м³/ч) на всем протяжении работы источника генерации водорода и ТЭ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был разработан и создан металлгидридный реактор хранения водорода РХА-1, работающий за счет естественной конвекции воздуха. Результаты испытаний реактора демонстрируют применимость конвективного теплообмена для десорбции водорода без

разработки сложных теплообменных устройств для условий низких расходов газа. Решающим фактором в разработке такого металлгидридного устройства является выбор сплава. Исходя из термодинамических и водородсорбционных свойств определяющим будет температурный диапазон, который, скорее всего будет очень узким. Экспериментально подтверждена работоспособность реактора в пределах заданных параметров расхода водорода до 0.1 м³/ч при температуре окружающей среды 20⁰С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасов Б. П., Лотоцкий М. В., Яргысь В. А.** Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода // Российский Химический Журнал. -- 2006. -- Т. 1, № 6. -- С. 34.
2. **Dagdougui H., Sacile R., Bersani C., Ouammi A.** Chapter 4 - Hydrogen Storage and Distribution: Implementation Scenarios // Hydrogen Infrastructure for Energy Applications / Dagdougui H. и др. Academic Press, 2018. -- С. 37-52.
3. **Lototsky M. V., Yartys V. A., Pollet B. G., Bowman Jr R. C.** Metal hydride hydrogen compressors: A review // International Journal of Hydrogen Energy. -- 2014. -- 4/4. -- Т. 39, № 11. -- С. 5818-5851.
4. **Tarasov B. P.** Metal-hydride accumulators and generators of hydrogen for feeding fuel cells // International Journal of Hydrogen Energy. -- 2011. -- 1//. -- Т. 36, № 1. -- С. 1196-1199.
5. **Lototsky M. V., Williams M., Yartys V. A., Klochko Y. V., Linkov V. M.** Surface-modified advanced hydrogen storage alloys for hydrogen separation and purification // Journal of Alloys and Compounds. -- 2011. -- 2011/09/01/. -- Т. 509. -- С. S555-S561.
6. **Тарасов Б. П., Бурнашева В. В., Лотоцкий М. В., Яргысь В. А.** Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // Альтернативная энергетика и экология. -- 2005. -- Т. 12. -- С. 14-37.
7. **D. Dunikov, V. Borzenko, D. Blinov, A. Kazakov, C.-Y. Lin, S.-Y. Wu, Chu C.-Y.** Biohydrogen purification using metal hydride technologies // International Journal of Hydrogen Energy. -- 2016. -- Т. 41, № 46. -- С. 21787-21794.
8. **Hahne E., Kallweit J.** Thermal conductivity of metal hydride materials for storage of hydrogen: Experimental investigation // International Journal of Hydrogen Energy. -- 1998. -- Т. 23, № 2. -- С. 107-114.
9. **Mordkovich V. Z., Baichtock Y. K., Dudakova N. V., Korostyshevsky N. N., Sosna M. H.** Comparative efficiency of using hydrides in industrial processes of hydrogen recovery and compression // International Journal of Hydrogen Energy. -- 1993. -- Т. 18, № 10. -- С. 839-842.
10. **Sun D.-W., Deng S.-J.** A theoretical model predicting the effective thermal conductivity in powdered metal hydride beds // International Journal of Hydrogen Energy. -- 1990. -- Т. 15, № 5. -- С. 331-336.
11. **Gopal M. R., Murthy S. S.** Studies on heat and mass transfer in metal hydride beds // International Journal of Hydrogen Energy. -- 1995. -- 11//. -- Т. 20, № 11. -- С. 911-917.
12. **Bhogilla S. S.** Design of an AB₂-metal hydride cylindrical tank for renewable energy storage // Journal of Energy Storage. -- 2017. -- 2017/12/01/. -- Т. 14. -- С. 203-210.
13. **Blinov D. V., Borzenko V. I., Dunikov D. O., Romanov I. A.** Experimental investigations and a simple balance model of a metal hydride reactor // International Journal of Hydrogen Energy. -- 2014. -- 11/11/. -- Т. 39, № 33. -- С. 19361-19368.
14. **Afzal M., Mane R., Sharma P.** Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: A review // International Journal of Hydrogen Energy. -- 2017. -- 2017/12/28/. -- Т. 42, № 52. -- С. 30661-30682.
15. **Borzenko V., Dunikov D., Malysenko S.** Crisis phenomena in metal hydride hydrogen storage facilities // High Temperature. -- 2011. -- Т. 49, № 2. -- С. 249-256.
16. **Mitrokhin S., Zotov T., Movlaev E., Verbetsky V.** Hydrogen interaction with intermetallic compounds and alloys at high pressure // Journal of Alloys and Compounds. -- 2013. -- 12/01. -- Т. 580. -- С. S90-S93.

Д.О. Дуников^{1,2}, В.И. Борзенко¹

¹Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

КРИЗИС ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАРЯДКЕ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ВОДОРОДОМ

АННОТАЦИЯ

Металлогидриды применяются для аккумуляции, очистки и компримирования водорода. Эффективность и производительность металлогидридных устройств определяются процессами тепломассопереноса в засыпках водородопоглощающих материалов. Кризис тепломассопереноса связан с резким ростом равновесного давления водорода над металлом при повышении температуры. Когда равновесное давление приближается по величине к давлению газа на входе в реактор, реакция гидрирования практически останавливается. Нами экспериментально продемонстрирован кризис тепломассопереноса при зарядке металлогидридного реактора, содержащего 4.69 кг сплава $Mm_{0.8}La_{0.2}Ni_{4.1}Fe_{0.8}Al_{0.1}$, а также получено аналитическое решение для эволюции температуры внутри реактора в докритическом режиме, которое позволяет предсказывать наступление кризиса тепломассопереноса без необходимости сложного численного моделирования.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водород взаимодействует со многими веществами, с элементами, такими как переходные металлы, лантаноиды и актиноиды, электроотрицательность которых сопоставима с водородом, и их интерметаллическими соединениями, он образует металлические гидриды, характеризующиеся наличием металлического типа связи. Особенностью металлогидридов (МГ) является возможность существования большого количества нестехиометрических композиций, что позволяет широко варьировать свойства за счет изменения элементного состава. На практике для системы металл-водород обычно используют термин «сплавы», объединяющий и «твердые растворы», и «гидриды», за исключением тех случаев, когда такое разграничение необходимо [1].

Для многих металлов реакция с водородом является обратимой, что позволяет использовать их для аккумуляции водорода. Равновесное давление водорода над сплавом определяется уравнением Вант-Гоффа:

$$\frac{p_s(T)}{p_{ref}} = \exp\left(\frac{\Delta S_{MH}}{R} - \frac{\Delta H_{MH}}{RT}\right), \quad (1)$$

где ΔS_{MH} и ΔH_{MH} - изменение энтропии и энтальпии в реакции водорода и металла, давление p_{ref} обычно устанавливается равным давлению в стандартных условиях.

Большинство металлогидридов характеризуется высоким содержанием водорода, например, в интерметаллидах соотношение количества атомов водорода к металлу составляет $H/M = 0.7-1.1$ [2]. Практическое применение металлогидридов также включает системы очистки водорода, использующие избирательность поглощения водорода металлами, термосорбционные компрессоры водорода, использующие зависимость равновесного давления от температуры, электрохимические устройства, такие как никель-металлогидридные аккумуляторы, системы аккумуляции тепла и т.д.

Твердофазное хранение водорода в обратимых гидридах металлов имеет преимущество перед сжатием и ожижением водорода в энергетической эффективности. Энергозатраты на ожижение водорода с использованием современных промышленных установок составляют в среднем 13.8 кВтч/кг [3] с перспективным энергопотреблением в районе 10-13 кВтч/кг [3; 4]. Сжатие водорода до 350-750 бар требует до 6.4 кВтч/кг, минимальные затраты в 2.7 кВтч/кг достигнуты с помощью поршневого компрессора на ионной жидкости, не содержащего движущихся частей [5].

Затраты на реакцию гидрирования интерметаллических соединений лежат в диапазоне 4-5 кВтч/кг H_2 [6], причем эта энергия может быть подведена к системе в виде низкопотенциального тепла, поскольку для многих интерметаллических соединений гидрирование происходит при температурах и давлениях, близких к нормальным условиям и [2; 7]. Это снижает затраты полезной энергии на работу системы хранения и повышает безопасность и простоту эксплуатации.

Не смотря на то, что металлогидридные системы разрабатываются с 1970-х гг., значимые результаты получены только для систем лабораторного уровня, и чтобы вывести металлогидридные технологии на коммерческий уровень, необходимы исследования,

направленные на масштабирование технологии и решение вопросов их экономической жизнеспособности [8].

Консенсус достигнут в том, что теплоперенос в металлгидридных устройствах является основным лимитирующим фактором. Водородопоглощающий материал обычно используется в виде засыпки мелкодисперсного порошка с размером частиц порядка 1 - 10 мкм, с низкой эффективной теплопроводностью (порядка 0.1 - 1 В/м К), зависящей от давления заполняющего газа и концентрации поглощенного водорода в частицах сплава [9].

Отмечается, что именно эффективная теплопроводность металлгидридных засыпок является узким местом в проектировании металлгидридных систем, при этом улучшение только теплопроводности или коэффициента теплопередачи, или площади теплообменника не всегда приводит к решению проблемы и преодолению «бутылочного горлышка» [10].

Слабая теплоотдача от металлгидридных засыпок к стенкам реактора во время абсорбции водорода приводит к образованию горячих зон внутри засыпки [11], а экспоненциальная зависимость равновесного давления от температуры (1) способствует запираанию потока водорода через засыпку в результате чего реакция существенно затормаживается.

В наших исследованиях мы дали этому явлению название кризиса тепломассопереноса [12], поскольку его возникновение приводит к резкому изменению поведения системы. Условием наступления кризиса является равенство равновесного давления внутри металлгидридной засыпки и давления газа во входной линии реактора [13].

Расчет тепломассопереноса в металлгидридных устройствах является сложной задачей, обычно требующей численного решения уравнений Навье-Стокса с учетом движения газовой фазы в пористой среде и протекания химической реакции [14]. Однако для некоторых предельных случаев, например, для постоянной скорости реакции, можно получить простые аналитические решения [15], и анализировать поведение металлгидридных устройств на основе простых балансовых соотношений [13; 16].

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследования выполнены с использованием металлгидридного реактора РХО-1, представленного на рис. 1, экспериментальная процедура подробно описана в работе [12]. Реактор состоит из четырех МГ модулей с проницаемыми стенками, помещенных в прочный герметичный корпус, на внешней стенке которого обустроен жидкостный теплообменник.

Металлогидридные модули заполнены 4.69 кг сплава $Mm_{0.8}La_{0.2}Ni_{4.1}Fe_{0.8}Al_{0.1}$. Максимальная емкость

$C_{max} = 1.35\%$ масс., $\Delta S_{MH} = 116$ Дж/моль К и $\Delta H_{MH} = 35.5$ кДж/моль, гистерезис между давлением абсорбции и десорбции $\ln(p_{abc}/p_{dec}) = 0.2$.

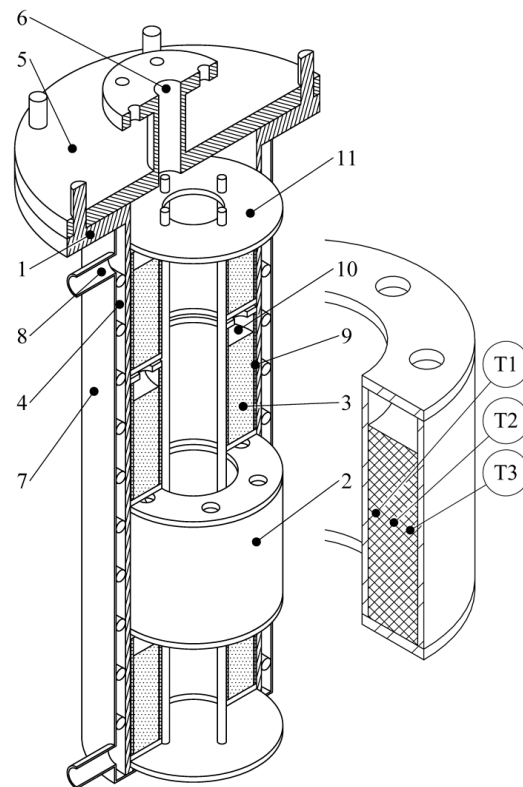


Рис. 1. Металлогидридный реактор хранения и очистки водорода РХО-1: 1 – Корпус; 2 – МГ модуль; 3 – Засыпка; 4 – Жидкостный теплообменник; 5 – Крышка; 6 – Подвод газа; 7 – Кожух теплообменника; 8 – Каналы для прокачки теплоносителя; 9 – Стенки МГ модуля; 10 – Внутренняя полость МГ модуля; 11 – Картридж из МГ модулей; T1...T3 – термодатчики.

Изотерма десорбции представлена на рис. 2, экспериментальные данные хорошо аппроксимируются формулой:

$$\frac{C}{C_{max}} = 0.482 \frac{0.656(p/p_s(T))^{1/1.23}}{1 + 0.656(p/p_s(T))^{1/1.23}} + 0.525 \frac{1.74(p/p_s(T))^{1/0.481}}{1 + 1.74(p/p_s(T))^{1/0.481}}, \quad (2)$$

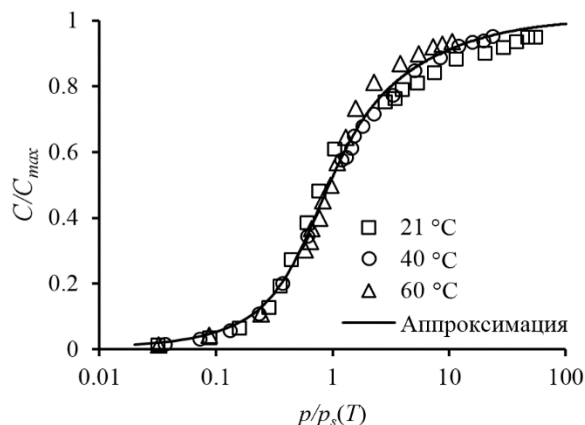


Рис. 2. Изотерма десорбции, точки – экспериментальные данные, линия – аппроксимация по (2)

Максимальная емкость реактора по водороду на основе свойств сплава составляет 700 л_н, но из-за резкого роста равновесного давления при высоких концентрациях водорода осуществить максимальную зарядку невозможно. Номинальная емкость реактора РХО-1 определена в размере 575 л_н (1.1%масс.), при этой концентрации равновесное давление примерно в 3.5 раза выше, чем в середине изотермы абсорбции. Таким образом, номинальная скорость зарядки 1С (номинальный объем за 1 час) составляет 9.6 л_н/мин.

При зарядке на вход предварительно откачанного реактора, охлаждаемого холодной водой, подавался чистый водород с давлением $p_0 = 8$ бар, зарядка осуществлялась до полной остановки реакции. Для разрядки реактор нагревался горячей водой и выделяющийся водород выводился в атмосферу $p_0 = 0.1$ МПа. Расход водорода регулировался и измерялся с помощью расходомера F-202AC-RAA-55-V фирмы Bronkhorst, тонкопленочными платиновыми датчиками температуры Heraeus M422 номинальным сопротивлением 1 кОм измерялась температура воды на входе и выходе и тремя датчиками в засыпке сплава (см. рис. 1), давление в реакторе измерялось с помощью преобразователя давления Aplisens PC28.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Была выполнена серия экспериментов по зарядке реактора постоянным установленным расходом водорода с шагом 2.5С (24 л_н/мин). Эволюции расхода и давления внутри реактора для режимов 2.5С и 5С представлены на рис. 3. Можно выделить две основных стадии процесса: докритическую, характеризующуюся постоянным расходом и резким ростом давления и закритическую, характеризующуюся резким снижением расхода водорода и плавным ростом давления. Моменту кризиса соответствует перегиб кривой давления. Для прочих режимов кривые расхода и давления имеют ту же форму, и чем выше установленный расход водорода, тем быстрее наступает кризис. Это хорошо видно на зависимости степени заряда реактора SoC от давления для разных режимов заряда (рис. 5).

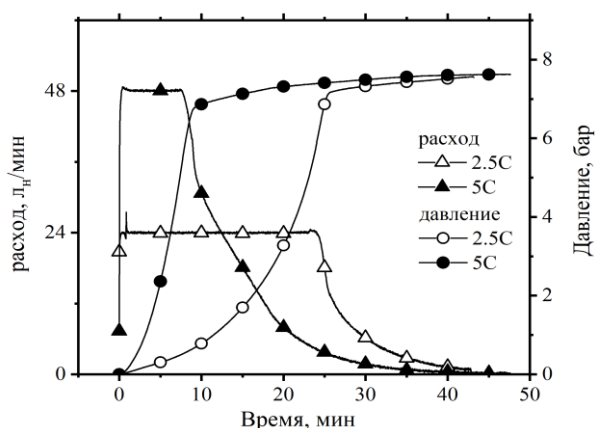


Рис. 3. Расход и давление внутри реактора РХО-1 при зарядке в режимах 2.5С и 5С

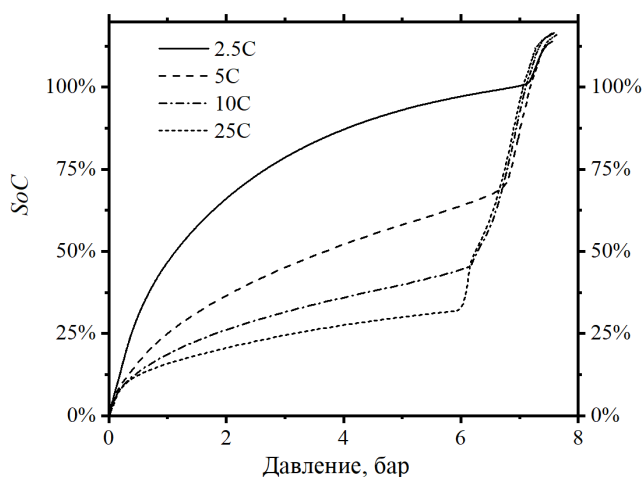


Рис. 4. Зависимость степени заряда реактора (SoC) от давления внутри реактора

Как видно, только в режиме 2.5С удалось зарядить реактор полностью при постоянном расходе, во всех прочих случаях кризис наступает раньше.

Это легко объяснить, изучив эволюцию температуры внутри засыпки, представленную на рис.5. Только в режиме 2.5С теплообменник справляется с отводом выделяющегося при гидрировании тепла, при больших расходах водорода температура реактора возрастает до максимума, который соответствует равновесной температуре при давлении близком к входному p_0 , после чего наступает кризис в результате чего расход водорода, и, соответственно, тепловыделение в засыпке резко снижаются и засыпка начинает охлаждаться.

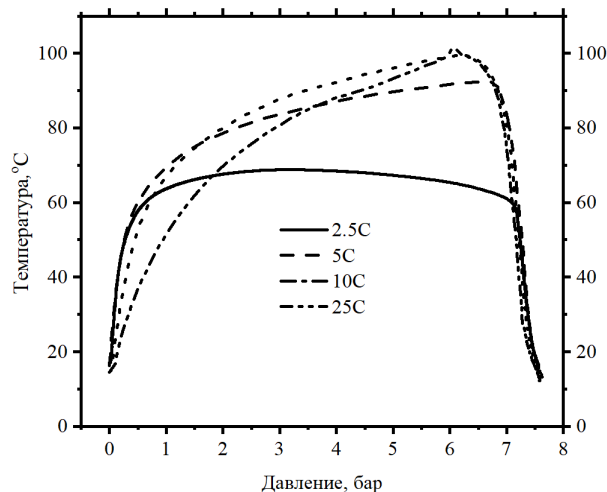


Рис. 5. Температура внутри засыпки реактора РХО-1

4. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Аналитические решения проблемы тепломассопереноса в металлгидридном реакторе можно получить только для нескольких предельных случаев, одним из которых является постоянная скорость реакции гидрирования [15]. Если считать, что температура и давление внутри реактора однородны, можно перейти от рассмотрения непрерывной среды к сосредоточенным параметрам и получить уравнение энергии в виде простого дифференциального уравнения. Рассмотрим металлгидридный реактор, представленный на рис. 6. Баланс тепла определяется как:

$$C_p^{MH} m_{MH} (1+B) \frac{dT}{dt} = Q_{MH} - Q_{HEX} \quad (3)$$

где B – коэффициент, описывающий влияние присоединенной к засыпке термальной массы реактора. Это уравнение можно представить в виде:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha A}{C_p^{MH} m_{MH} (1+B)} (T - T_0) + \frac{\Delta H_{MH} q}{C_p^{MH} m_{MH} (1+B)} \quad (4)$$

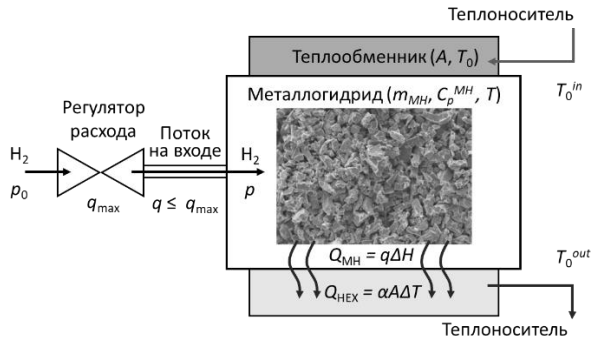


Рис. 6. Модель металлгидридного реактора

Его решение записывается в виде:

$$T - T_0 = \frac{\Delta H_{MH} q}{\alpha A} \left(1 - \exp \left[-\frac{\alpha A}{C_p^{MH} m_{MH} (1+B)} t \right] \right) \quad (5)$$

Выполним расчет температуры и давления в металлгидридном реакторе РХО-1 и сравним с результатами эксперимента. Данные для расчета:

- Теплоемкость сплава $C_p^{MH} = 420$ Дж/кг К;
- Масса металлгидрида $m_{MH} = 4.69$ кг;
- Коэффициент B (дополнительная термальная масса реактора) = 1;
- Площадь теплообменника $A = 0.126$ м².
- $\alpha = 120$ Вт/м² К [17];
- Свойства сплава рассчитываются по (1) и (2).

Результаты расчета температуры для режима 2.5C в сравнении с экспериментом приводятся на рис. 7.

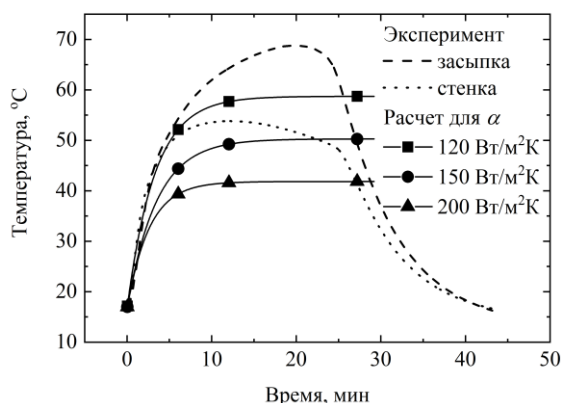


Рис. 7. Сравнение температуры в реакторе при режиме зарядки 2.5C с расчетом по (5)

Как видно, в эксперименте засыпка не является изотермической, существует существенная разница температур между показаниями датчика внутри засыпки (Т2 на рис. 1) и у стенки МГ модуля (Т3 на рис. 1). В то же время расчет по нашей простейшей модели позволяет неплохо предсказывать среднюю температуру в металлгидриде. На основании данных по температуре, полученных по уравнению (5), можно вычислить рав-

новесное давление в реакторе с использованием уравнения Вант-Гоффа (1) и аппроксимации изотермы десорбции (2), для получения давления абсорбции значения давлений умножаются на величину гистерезиса. Сравнение с экспериментом приведено на рис. 8 для режима 2.5C.

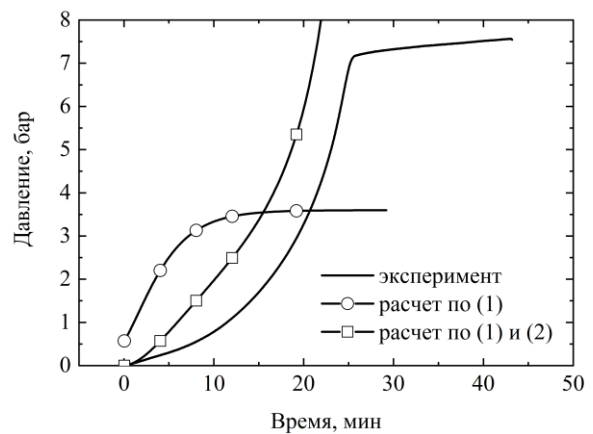


Рис. 8. Сравнение давления в реакторе при режиме зарядки 2.5C с расчетом

Традиционно давление в металлгидридных реакторах оценивают с помощью уравнения Вант-Гоффа, однако, как видно из рис. 8, такой подход не может обеспечить даже качественного совпадения с экспериментальными данными. В то же время, если учесть реальную форму изотермы, которая характеризуется резким снижением равновесного давления при малых концентрациях водорода в металле и резким ростом равновесного давления при насыщении металла водородом, можно добиться качественного совпадения расчета с экспериментом.

Условием наступления кризиса тепломассопереноса в металлгидридном реакторе является равенство равновесного давления и давления подачи водорода $p = p_0$. Воспользовавшись этим условием, можно определить момент наступления кризиса, по нашей аналитической модели для зарядки реактора в режиме 2.5C кризис наступает через 22 мин после старта (рис. 8), в то время как в эксперименте кризис наступил через 24 минуты после старта. Схожие результаты получены и для остальных режимов зарядки. Таким образом, можно заключить, что не смотря на простоту предложенной модели и достаточно сильные допущения нам удалось достаточно точно предсказать момент наступления кризиса. Основным недостатком предложенной сосредоточенной модели является предположение об однородности температуры и давления в реакторе, что может быть справедливо для достаточно тонких (с толщиной слоя менее 10 мм) и интенсивно охлаждаемых засыпок. Для них можно ожидать более точного совпадения расчета с экспериментом.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами экспериментально продемонстрирован кризис тепломассопереноса при зарядке металлгидридного реактора, содержащего 4.69 кг сплава $Mm_{0.8}La_{0.2}Ni_{4.1}Fe_{0.8}Al_{0.1}$. Показано, что кризис тепломассопереноса связан с резким ростом равновесного давления водорода над металлом при повышении тем-

пературы. Когда равновесное давление приближается по величине к давлению газа на входе в реактор, реакция гидрирования практически останавливается. Получено аналитическое решение для эволюции температуры внутри реактора в докритическом режиме, которое позволяет предсказывать наступление кризиса тепло-массопереноса без необходимости сложного численного моделирования.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

q — расход водорода, лн/мин;
 A — площадь теплообменника реактора, м²;
 B — отношение термальных масс реактора и засыпки;
 C — концентрация поглощенного водорода в металле;
 SoC — степень зарядки реактора (отношение заряженного объема водорода к номинальной емкости)
 Индексы:
 МН — металлгидрид;
 0 — внешние параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гельд П.В., Рябов Р.А., Мохрачева Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. Гидриды переходных металлов. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.
2. Тарасов Б.П., Лотоцкий М.В., Яргысь В.А. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода // Российский Химический Журнал. 2006. Т. L. № 6. — С. 34.
3. Aasadnia M., Mehroooya M. Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: A review // Applied Energy. 2018. V. 212. — P. 57-83.
4. Krasae-in S., Stang J.H., Neksa P. Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009 // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. V. 35. — P. 4524-4533.
5. Sdanghi G., Maranzana G., Celzard A., Fierro V. Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 102. — P. 150-170.
6. Sandrock G. A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view // Journal of Alloys and Compounds. 1999. V. 293-295. — P. 877-888.
7. Lototsky M.V., Tolj I., Pickering L., Sita C., Barbir F., Yartys V. The use of metal hydrides in fuel cell applications // Progress in Natural Science: Materials International. 2017. V. 27 — P. 3-20.
8. Muthukumar P., Kumar A., Raju N.N., Malleswararao K., Rahman M.M. A critical review on design aspects and developmental status of metal hydride based thermal machines // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. V. 43. — P. 17753-17779.
9. Hahne E., Kallweit J. Thermal conductivity of metal hydride materials for storage of hydrogen: Experimental investigation // International Journal of Hydrogen Energy. 1998. V. 23. — P. 107-114.
10. Afzal M., Mane R., Sharma P. Heat transfer techniques in metal hydride hydrogen storage: A review // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. V. 42. — P. 30661-30682.
11. Borzenko V.I., Blinov D.V., Dunikov D.O., Leontiev A.I. Characteristic features of heat and mass transfer in hydrogen energy storage systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1128. — P. 012126.
12. Борзенко В.И., Дуников Д.О., Малышенко С.П. Кризисные явления в металлгидридных устройствах хранения водорода // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 2. — С. 256-264.
13. Blinov D.V., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Romanov I.A. Experimental investigations and a simple balance model of a metal hydride reactor // International Journal of Hydrogen Energy. 2014. V. 39. № 33. — P. 19361-19368.
14. Minko K.B., Artemov V.I., Yan'kov G.G. Numerical simulation of sorption/desorption processes in metal-hydride systems for hydrogen storage and purification. Part I: Development of a mathematical model // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. V. 68. — P. 683-692.
15. Talagañis B.A., Meyer G.O., Aguirre P.A. Modeling and simulation of absorption-desorption cyclic processes for hydrogen storage-compression using metal hydrides // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. V. 36. — P. 13621-13631.
16. Xiao J., Tong L., Bénard P., Chahine R. Thermodynamic analysis for hydriding-dehydriding cycle of metal hydride system // Energy. 2020. V. 191. — С. 116535.
17. Borzenko V., Dunikov D., Malysenko S. Experimental investigations of heat and mass transfer in metal hydride hydrogen storage devices // Proc. of 17th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2008), 15-19 June 2008, Brisbane, Queensland, Australia. 2008.

А.Н. Казаков¹, В.Ю. Бодиков^{1,2}, Д.В. Блинов^{1,2}

¹Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

ВЛИЯНИЕ МАССОВОГО СООТНОШЕНИЯ ПОРОШКОВ КАРБОНИЛЬНОГО НИКЕЛЯ И СПЛАВА $La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni_4Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}$ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО ЭЛЕКТРОДА

АННОТАЦИЯ

Металлогидридные материалы активно используются в качестве анодных материалов для Ni-MH аккумуляторов. Для повышения электропроводности, механической стабильности электродов используются различные добавки к активному водородопоглощающему материалу, такие как графит, никель, медь и др. В данной работе приготовлены и исследованы металлогидридные электроды на основе сплава AB_5 типа, смешанные с карбонильным никелем в различных массовых соотношениях. Изучены электрохимические свойства приготовленных электродов, такие как активация, максимальная электрохимическая емкость, производительность при высоких плотностях тока.

1. ВВЕДЕНИЕ

Хранение энергии является одним из ключевых факторов для устойчивого развития нового энергетического уклада, основанной на ресурсосберегающих возобновляемых энергетических технологиях. Недорогие, надежные и эффективные методы хранения энергии будут важной частью новых энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии. Электрохимическое хранение энергии является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений для хранения энергии ВИЭ [1]. 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 на основе ВИЭ [2].

Ni-MH аккумуляторы обладают рядом преимуществ для практического применения, такими как высокая удельная плотность хранимой энергии, устойчивость к перезаряду/переразряду, 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 способны обратимо поглощать и выделять водород при нормальных условиях [3]. Интерметаллические соединения для анодных материалов можно представить об-

щей 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: AB_5 , AB_2 , $AB_{3-3.5}$, АВ, A_2B , 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 [4]. 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 [5].

Наряду с водородопоглощающими свойствами интерметаллических соединений большое значение для улучшения электрохимических свойств электродов имеют параметры приготовления металлогидридных электродов: размер частиц МГ порошка [6-8], электропроводящие материалы и их массовое соотношение с активным материалом [9, 10], использование связующих компонентов [11], параметры прессования рабочих электродов [12, 13].

Основной электропроводящей добавкой является никель, благодаря своей высокой электрокаталитической активности. Различное содержание никеля в металлогидридном электроде влияют его на электрохимические свойства [9]. Однако, исследования эффекта массового соотношения активного металлогидридного материала с электропроводящей добавкой проводились редко.

Целью настоящей работы является исследование электрохимических свойств металлогидридного электрода, приготовленных в различных массовых соотношениях с электропроводящей добавкой карбонильным никелем.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Интерметаллическое соединение AB_5 типа $La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni_4Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}$ приготовлено в электродуговой печи в аргоновой атмосфере. Чистота исходных металлов составляет не менее 99.5%. Стехиометрическая навеска металлов проплавлена не менее трех раз для достижения высокой гомогенности состава. После выплавки поверхность королька ИМС (около 50 г) очищена от оксидной пленки, корольек раздроблен на небольшие куски (5-8 мм). Навеска массой 20 г обернута в молибденовую фольгу запаена в ампулу с порошком титана в аргоновой атмосфере и подвержена термическому отжигу при 1223 К в течение 20 часов с последующей закалкой в ледяной воде. Кристаллическая структура и фазовый состав отожженного образца были определены методом рентгеновской дифракции на диффрактометре Bruker's D8 ADVANCE с медным излучением. Порошок для рентгеновского анализа получен механическим растиранием в агатовой ступке. Измерения 2θ углов проводилось в диапазоне 15 – 80°, шаг измерения составлял 0.02°, время экспозиции в точке – 1 с. Обработка дифракционных данных проведен с помощью программного обеспечения Jana2006 и Crystal Impact Match с использованием рентгенографических баз данных JCPDS PDF-2.

Для исследования электрохимических свойств металлгидридных электроды приготовлены из порошковой фракции с размерами частиц 40 – 60 мкм и средний размер частиц предполагается равным 50 мкм. Электроды в виде таблетки диаметром 10 мм и толщиной 1 мм общей массой 0.5 г приготовлены методом холодного прессования при давлении 25 МПа в течение 3 минут. Было изготовлено три электрода с массовым соотношением металлгидридного материала и карбонильного никеля 1:4, 1:3, 1:2. Изготовленные таблетки запрессованы 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 противоэлектрода использован коммерчески доступный $Ni(OH)_2$ с заведомо большей емкостью. Эксперименты проводились на многоканальном потенциостате P-20X8. 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 0.65 В. Время релаксации между зарядом и разрядом электрода составляло 0.5 часа. После активации последовательно проведены измерения производительности электрода при высоких плотностях тока и диффузии водорода методом потенциостатического прерывистого титрования в диапазоне -0.86 - -0.96 В. 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 единственный цикл заряд-разряд при плотности тока 100 мА/г для контроля состояния электрода.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Рентгенофазовый анализ

Анализ диффрактограммы сплава $La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni_4Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}$ показывает высокую гомогенность полученного образца после отжига (Рис. 1.). Узкие дифракционные пики указывают на высокую степень кристалличности образца. Кристаллическая структура соответствует гексагональному $CaCu_5$ типу с параметрами элементарной ячейки: $a = 0.5013$ нм, $c = 0.4038$ нм.

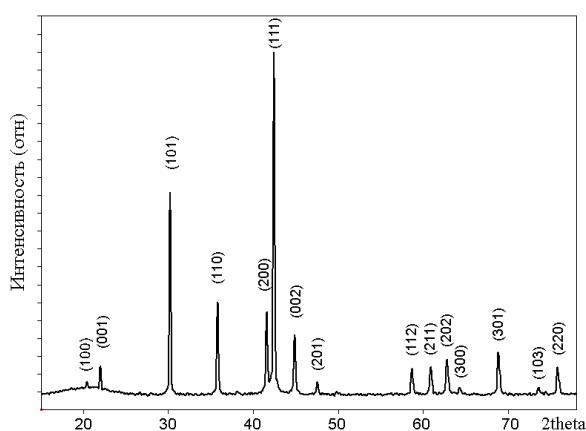


Рис. 1. Диффрактограмма сплава $La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni_4Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}$.

3.2. Активация металлгидридных электродов

Процесс активации металлгидридных электродов на примере образца 1:4 представлена на Рис 2. Кривую заряда условно можно разделить на три области. В начальной стадии заряда потенциал резко растет при незначительном увеличении емкости электрода. Данная область соответствует образованию α -твердого раствора внедрения водорода в металлгидрид. 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, металлгидрид выделяет водород и переходит из β -гидридной фазы в α -фазу.

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 [14, 15].

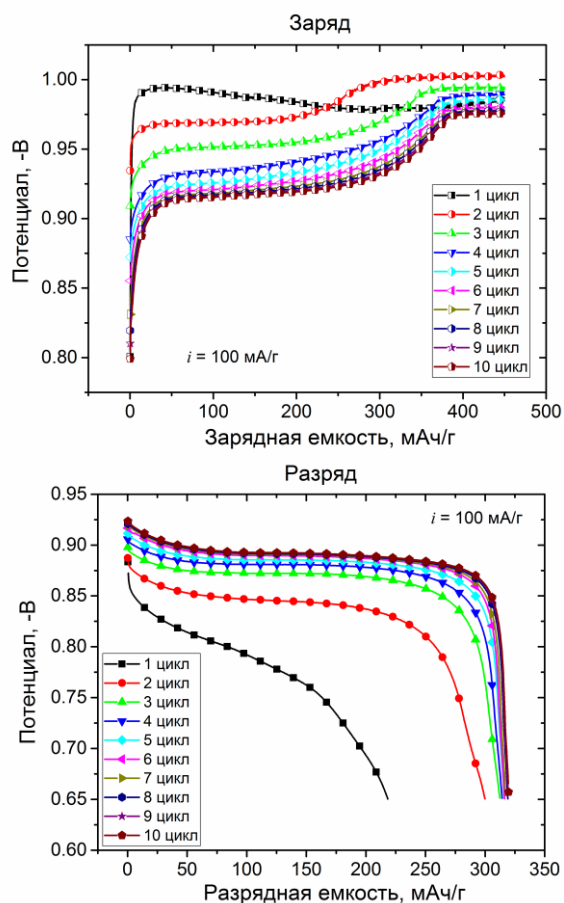


Рис. 2. Зарядные и разрядные кривые металлгидридного образца 1:4.

Как видно из Рис.3, максимальной разрядной емкости образцы достигают на втором-третьем цикле. Для образца 1:2 характерно некоторое снижение разрядной емкости при циклической активации с 308 мАч/г (2-й цикл) до 291 мАч/г (10-й цикл), что вероятно связано с осаждением частиц металлгидридного материала. Хорошо известно, что для сплавов АВ₅ типа характерно значительное изменение (до 20-25%) объема элементарной ячейки при сорбции – десорбции водорода [16, 17]. При повышении содержания частиц активного материала увеличивается площадь контакта частиц, что ведет к улучшению кинетики протекающих процессов. В то же время внутренние напряжения, возникающие при расширении частиц, приводят к постепенному разрушению электрода и осаждению металлгидридных частиц. Карбонильный никель в этом случае служит не только электропроводящей добавкой и катализатором, но и средой для частичной компенсации внутренних напряжений металлгидридного материала. Максимальная разрядная емкость для 10-го цикла $C_{max} = 320$ мАч/г для образца 1:4. Равновесная разрядная емкость электродов незначительно снижается по мере увеличения массового содержания металлгидридного порошка в электроде (Рис. 4).

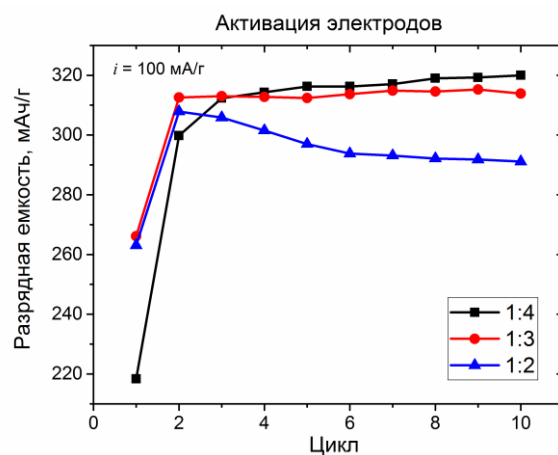


Рис. 3. Активация металлгидридных образцов.

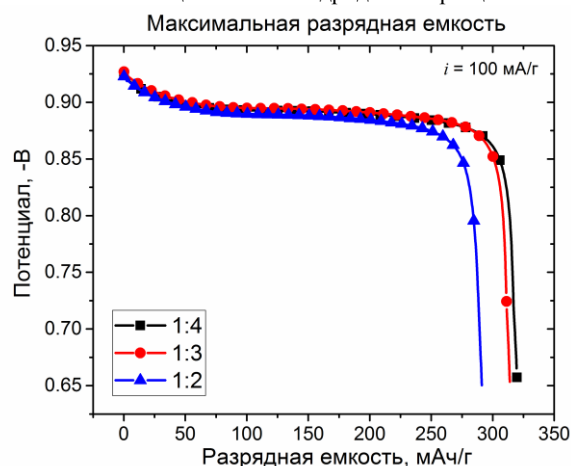


Рис. 4. Максимальная разрядная емкость металлгидридных образцов на 10-м цикле активации.

Увеличение массового соотношения активного материала к карбонильному никелю не влияет на равновесный разрядный потенциал, как это показано в работе [9]. Данное расхождение возможно связано с представлением на одном графике кривых разрядных емкостей при разном цикле активации. На Рис.2 и 3 видно, что максимальная разрядная емкость достигается на начальных циклах активации, в то время как равновесные разрядные потенциалы увеличиваются и становятся постоянными только к концу активации на 7-8 цикле. Таким образом, при сравнении разрядных кривых в одинаковых условиях влияния массового соотношения компонентов металлгидридного электрода не обнаружено.

3.3. Производительность электрода при высоких плотностях тока

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 Рис. 5. представлены разрядные кривые для плотностей тока от 100 до 1200 мА/г. 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 [4, 18].

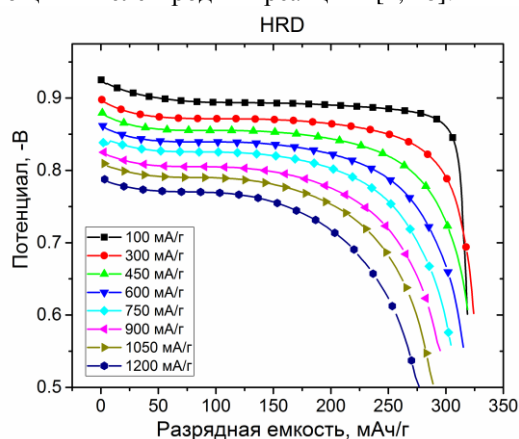


Рис. 5. Разрядные кривые металлгидридного образца 1:4 при разных плотностях тока.

При низких плотностях тока влияние переноса заряда превалирует над диффузией водорода, что определяет ширину плато равновесного потенциала. При высоких плотностях тока определяющим фактором становится скорость диффузии водорода из объема на поверхность электрода.

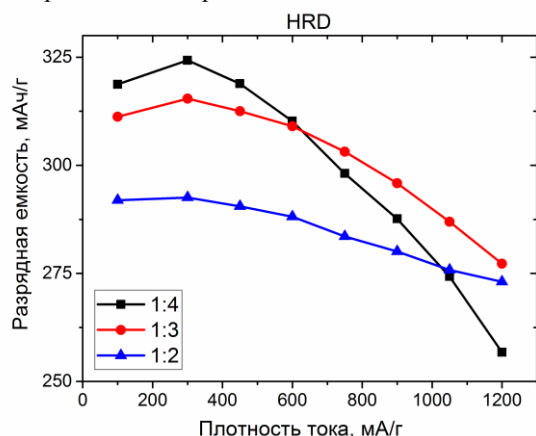


Рис. 6. Производительность металлгидридных электродов при различных плотностях тока

Максимальную разрядную емкость при 1200 мА/г показывает металлгидридный образец 1:3. Разрядная емкость достигает 277.2 мАч/г и соответствует 87.9% исходной емкости. Металлогидридный образец 1:4 демонстрирует значительное падение разрядной емкости с 324.3 мАч/г при 300 мА/г до 256.8 мАч/г при 1200 мА/г. Для холоднопрессованных электродов оптимальным соотношением металлгидридного материала и карбонильного никеля является 1:3 в силу высокой разрядной емкости и приемлемой производительности при высоких плотностях тока. Наиболее распространенными электродами при изучении электрохимических свойств металлгидридных электродов являются 1:3 [19-21] и 1:4 [22-24]. Однако, следует отметить высокую стабильность электрода 1:2, который сохраняет 93.3% разрядной емкости при 1200 мА/г. Такое соотношение активного материала и электропроводящей добавки выглядит перспективным при применении связующих веществ, таких как ПТФЭ [25, 26], поливиниловый спирт [10], которые

позволят повысить механическую стабильность металлгидридных электродов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрохимические свойства металлгидридных материалов на основе $\text{La}_{0.6}\text{Ce}_{0.2}\text{Nd}_{0.2}\text{Ni}_4\text{Co}_{0.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Al}_{0.3}$ были исследованы для электродов, сформированных при различных массовых соотношениях с электропроводящей добавкой карбонильным никелем. Оптимальным соотношением для холоднопрессованных электродов является 1:3. Образец 1:3 показал высокую разрядную емкость 315 мАч/г и производительность при 1200 мА/г не менее 87,9% исходной разрядной емкости. Использование электродов с соотношением 1:2 является перспективным при улучшении механической стабильности электродов.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ — возобновляемые источники энергии;
ИМС — интерметаллическое соединение;
 i — плотность тока, мА/г;
 C_{max} — максимальная разрядная емкость, мАч/г;
HRD — производительность при высоких плотностях тока;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Dunn, B., H. Kamath, and J.-M. Tarascon**, Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 2011. 334(6058): p. 928 DOI: 10.1126/science.1212741.
3. **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.
4. **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>.
5. **Тарасов, Б.П., М.В. Логоцкий, and В.А. Яртысь**, Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода. *Российский Химический Журнал*, 2006. 6(6): p. 34.
6. **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>.
7. **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 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.093>.
8. **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>.
9. **Tian, X., et al.**, Effects of the mass ratio of carbonyl nickel powders to $\text{Mm}_{0.3}\text{Mn}_{0.7}\text{Ni}_{3.55}\text{Co}_{0.75}\text{Mn}_{0.4}\text{Al}_{0.3}$ 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>.
10. **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>.
 11. **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>.
 12. **Tian, X., et al.**, Effects of compaction pressure on the electrochemical properties of Mm0.3Ml0.7Ni3.55Co0.75Mn0.4Al0.3 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>.
 13. **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>.
 14. **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>.
 15. **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).
 16. **Hirscher, M., et al.**, Materials for hydrogen-based energy storage – past, recent progress and future outlook. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. 827: p. 153548 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153548>.
 17. **Borzenko, V.I., et al.**, Hydrogen sorption properties of metal hydride beds: Effect of internal stresses caused by reactor geometry. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. 44(12): p. 6086-6092 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.052>.
 18. **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](https://doi.org/10.1007/s10008-013-2300-3).
 19. **Zhang, B., et al.**, Investigations on kinetics properties of hydrogen adsorbing/desorbing reactions for metal hydride electrodes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. 43(49): p. 22427-22437 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.037>.
 20. **Zhu, D., et al.**, SOC-dependent high-rate dischargeability of AB5-type metal hydride anode: Mechanism linking phase transition to electrochemical H-desorption kinetics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. 44(29): p. 15278-15286 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.078>.
 21. **Yiwen, C., et al.**, Electrochemical Performance Improvement of AB5-type Metal Hydride Electrode by Adding KF in KOH Electrolyte. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013. 42(5): p. 905-908 DOI: [https://doi.org/10.1016/S1875-5372\(13\)60065-X](https://doi.org/10.1016/S1875-5372(13)60065-X).
 22. **Wijayanti, I.D., et al.**, Hydrides of Laves type Ti–Zr alloys with enhanced H storage capacity as advanced metal hydride battery anodes. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020. 828: p. 154354 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154354>.
 23. **Shi, Y., et al.**, The microstructure and electrochemical properties of Mn-doped La-Y-Ni-based metal-hydride electrode materials. *Electrochimica Acta*, 2019. 296: p. 18-26 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.015>.
 24. **Volodin, A.A., et al.**, Phase-structural transformations in a metal hydride battery anode La1.5Nd0.5MgNi9 alloy and its electrochemical performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. 41(23): p. 9954-9967 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.089>.
 25. **Tliha, M., et al.**, Kinetic behaviour of low-Co AB5-type metal hydride electrodes. *Materials Science and Engineering: B*, 2010. 175(1): p. 60-64 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2010.07.003>.
 26. **Kaabi, A., C. Khaldi, and J. Lamloumi,** Thermodynamic and kinetic parameters and high rate dischargeability of the AB5-type metal hydride anode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. 41(23): p. 9914-9923 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.128>.

В.Н. Кулешов, С.В. Курочкин, Н.В. Кулешов, Д.В. Блинов, О.Ю. Григорьева

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ЭЛЕКТРОДНО – ДИАФРАГМЕННЫЕ БЛОКИ ЭЛЕКТРОЛИЗЁРОВ С ЩЕЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

АННОТАЦИЯ

В связи с развитием водородной энергетики в настоящее время особое внимание уделяется созданию высокоэффективных электролизеров воды, в том числе электролизеров со щелочным электролитом. Основным недостатком производства водорода методом электролиза воды является его высокое энергопотребление. В работе показано, что энергопотребление щелочного электролиза может быть снижено, в том числе, за счет изменения способа компоновки электродов и диафрагменного материала. Метод фазовой инверсии, используемый для изготовления пористых диафрагм на полимерной основе для щелочных электролизеров воды, позволил создать электродно-диафрагменный блок, в котором электроды с каталитическими слоями и диафрагменный материал представляют единый элемент. Проведено исследование электролизных ячеек с электродно-диафрагменными блоками разного состава и ячеек традиционной компоновки «с нулевым зазором».

1. ВВЕДЕНИЕ

Щелочной электролиз является одним из основных методов генерации водорода для энергетики, металлургии, стекольной и пищевой промышленности. В последние годы появились новые области применения щелочных электролизеров: малая энергетика удаленных объектов на основе возобновляемых источников энергии; транспорт; космонавтика [1, 2].

Энергопотребление щелочных электролизеров может быть снижено за счет создания новых электрокатализаторов, диафрагменных материалов и изменения способа сборки диафрагма-электрод [3]. Традиционно в щелочном электролизе используют ячейки с зазором между электродами и диафрагмой и с «нулевым зазором», при котором электроды плотно прижаты к диафрагменному материалу. Появление новых диафрагменных материалов на полимерной основе позволило создать электродно-диафрагменный блок, в котором электроды с каталитическими слоями и диафрагменный материал представляют единый элемент. Технология мембранно-электродных блоков (МЭБ) хорошо известна в электролизерах и топливных элементах с твердополимерным электролитом (ТПЭ). Разработка электродно-диафрагменных блоков позволяет снизить контактное сопротивление на границе диафрагма-электрод и снизить энергопотребление электролизного модуля.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Электроды электродно – диафрагменного блока

В настоящей работе использованы электроды с пористым покрытием [4, 5], модифицированным катализаторами катодных и анодных процессов. В качестве основы электродов использована никелевая просечно-вытяжная сетка. На поверхность сетки наносили пористое покрытие двух типов. Затем в электролит вводили никелевый или никель-кобальтовый порошок в количестве 10 г/л, и проводили электролитическое нанесение покрытия, плотность тока 5 А/дм², температура 60 °С, аноды никелевые, расположены с обеих сторон сетки. При электролизе происходит осаждение совместное осаждение на подложке металлического порошка и его закрепление гальванически осаждаемым никелем или никель-кобальтом.

Первый тип пористого покрытия - коммерчески доступный никелевый порошок с размером частиц 2-4 мкм наносили из суспензии в стандартной ванне для никелирования состава: сульфат никеля (NiSO₄·6H₂O) – 350 г/л; хлорид никеля (NiCl₂·6H₂O) – 60 г/л; борная кислота (H₃BO₃) 20 – 30 г/л; модифицирующие добавки, рисунок 1.

Второй тип пористого покрытия – порошок никель-кобальт наносили из суспензии в гальванической ванне состава: сульфат никеля (NiSO₄·6H₂O) – 175 г/л; сульфат кобальта (CoSO₄·6H₂O); хлорид никеля (NiCl₂·6H₂O) – 30 г/л; хлорид кобальта (CoCl₂·6H₂O) – 30 г/л; борная кислота (H₃BO₃) 20 – 30 г/л; модифицирующие добавки. Порошок никеля-кобальта готовили термическим разложением смешанного (в молярном отношении 1:1) формиата никеля и кобальта в инертной атмосфере аргона. Синтезируемый порошок пирофорен, что косвенно свидетельствует о наличии наноразмерных частиц и высокоразвитой поверхности, рисунок 2. Оба типа пористых покрытий модифицировали катализаторами катодных и анодных процессов.

Формирование одного из самых стабильных катализаторов реакции выделения водорода NiP_x проводили восстановлением из раствора соли никеля гипофосфитом натрия [6]. Готовили водный раствор хлорида никеля с ацетатным буфером, состава сульфат никеля NiSO₄·7H₂O – 30 г/дм³; ацетат натрия CH₃COONa – 10 г/дм³; уксусная кислота CH₃COOH – 10 г/дм³. В раствор помещали электрод с пористым никелевым покрытием и медленно нагревали. При 30-

40 °С на частицах пористого покрытия происходит медленное формирование мелкодисперсной каталитически активной структуры рисунок 3 и 4.

Модифицирование пористого никелевого покрытия катализатором реакции выделения кислорода никель-кобальтовой шпинелью проводили прямым термическим разложением. Для этого готовили раствор нитрата никеля $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ – 2 г/дм³; нитрата кобальта $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ – 4 г/дм³; хлорида аммония NH_4Cl – 0,3 г/дм³ в смеси бутанола – 24 г/дм³ и изопропанола – 24 г/дм³. В полученный раствор погружали электрод с пористым никелевым покрытием на 20 минут. Никель-кобальтовую шпинель синтезировали разложением в вакууме, повышая температуру от комнатной до 250 °С со скоростью 4 °С/20 минут и последующей обработкой при 400 °С на воздухе. Изображение полученных электродов приведено на рисунки 5 и 6.

2.2. Формующий раствор диафрагм электродно-диафрагменных блоков

Диафрагма представляет собой матрицу на основе полимера полисульфонового ряда, наполненного диоксидом титана и армированную полимерной сеткой [7-9]. Для изготовления формующего раствора диафрагмы готовили суспензию просушенного в сушильном шкафу диоксида титана в диметилацетамиде с помощью ультразвукового диспергатора. Полученную суспензию профильтровывали через сито с полимерной сеткой, размером ячейки 0,5 мкм. В полученный фильтрат добавляли полисульфон ПСФ-150, и помещали в сушильный шкаф ($t = 60$ °С).

В качестве основы электродно-диафрагменного блока исследованы три типа диафрагм. Тип 1 - диафрагма содержит 33 масс. % полисульфона и 67 масс. % диоксида титана; 2 - диафрагма содержит 33 масс. % полисульфона и 67 масс. % диоксида титана, но формующий раствор содержал порообразователь поливинилпирролидон, 15 масс. % от массы полимера; 3 - диафрагма содержит 40 масс. % полисульфона и 60 масс. % диоксида титана. Дальнейшее снижение массы полимера приводит к недостаточному удерживанию гидрофильного наполнителя полимерной матрицей, и как следствие, разрушению диафрагмы на стадии коагуляции.

2.3. Формирование электродно – диафрагменного блока

Как известно из технологии мембранно-электродных блоков для топливных элементов и электролизеров с твердополимерным электролитом, каталитические слои на поверхности мембраны формируют напылением суспензии катализатора в растворителе мембраны. В работе [3] описана попытка сформировать электродно-диафрагменный блок для щелочного электролизера воды напылением суспензии никеля Ренея в диметилацетамиде, растворителе полисульфона. Результаты, приведенные авторами статьи, показали, что ячейка с таким электродно-диафрагменным блоком характеризуется напряжением на 30% выше, чем с никелевыми волокнами, испытанными в той же работе.

В настоящей работе была предпринята аналогичная попытка, но с суспензией порошка никель-

кобальт в диметилацетамиде, и проводимость каталитических слоев также оказалась недостаточной.

Формирование электродно-диафрагменного блока проводили следующим образом – наносили на армирующую сетку толщиной 500 мкм формирующий раствор диафрагмы (раздел 2.2), с двух сторон вдавливали электроды и полученный элемент погружали в коагуляционную ванну с температурой 4 °С, содержащей 50 масс. % диметилацетамида и 50 масс.% воды [10].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Электроды

На рисунках 1 и 2 приведены микрофотографии пористого покрытия, осажденного из суспензии никелевого порошка в гальванической ванне для никелирования (рис. 1) и суспензии никель-кобальтового порошка, полученного термическим разложением смешанного формиата никеля-кобальта (рис. 2). На микрофотографиях хорошо заметна разница морфологии покрытия, частицы никеля имеют кубическую гранецентрированную решетку, а частицы порошка никеля-кобальта характеризуются значительно меньшим поперечным сечением и имеют игольчатую структуру.

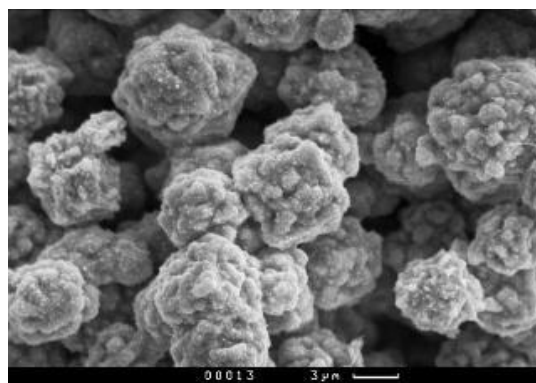


Рисунок 1. Пористый электрод, сформированный из гальванической ванны, путём осаждения коммерческого никелевого порошка.

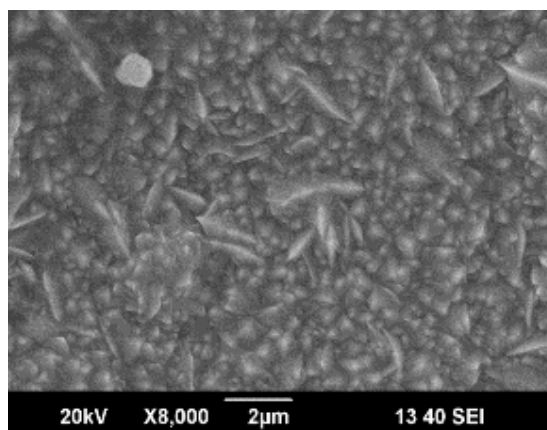


Рисунок 2. Пористый электрод, сформированный из гальванической ванны, путём осаждения порошка никеля-кобальта, полученного термическим разложением смешанного формиата никеля-кобальта.

На рисунках 3 и 4 приведены микрофотографии пористого покрытия, модифицированного химическим осаждением катализатора катодных процессов

NiP_x . Характерно, что осаждаемый сплав NiP_x повторяет изначальную структуру частиц покрытия, кубическую гранецентрированную (рис. 3) и игольчатую (рис. 4).

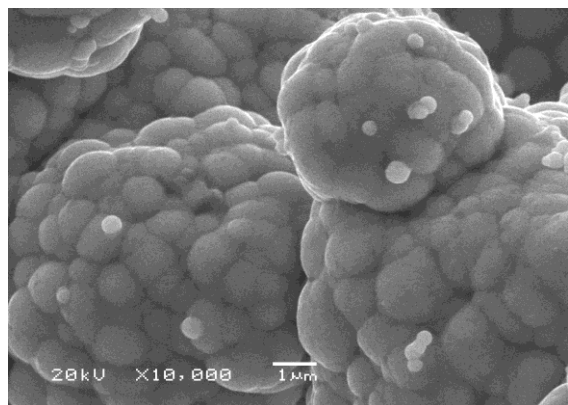


Рис. 3. Пористое покрытие, модифицированное катализатором катодных процессов NiP_x – поверхность никелевого порошка.

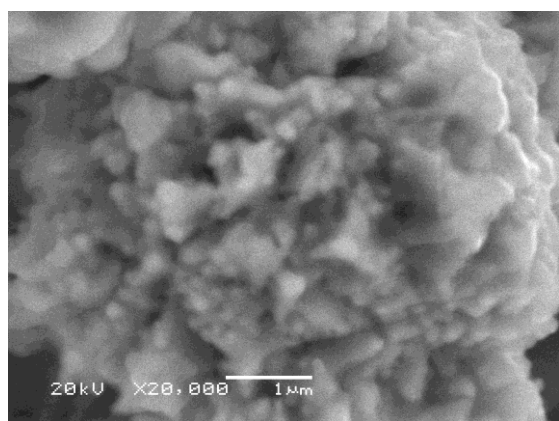


Рис. 4. Пористое покрытие, модифицированное катализатором катодных процессов NiP_x – поверхность частицы никель-кобальтового покрытия.

На рисунках 5 и 6 приведены микрофотографии пористого покрытия, модифицированного химическим осаждением катализатора анодных процессов $NiCo_2O_4$.

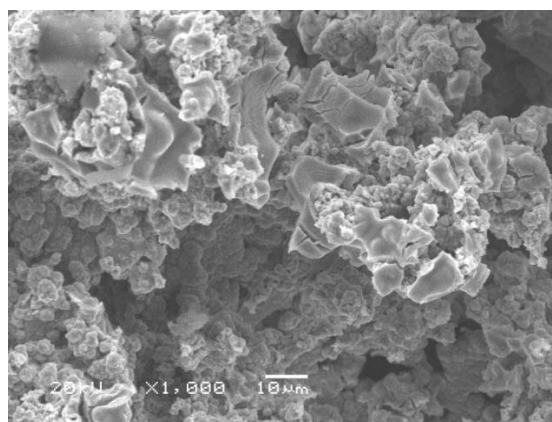


Рис. 5. Пористое покрытие, модифицированное катализатором анодных процессов, $NiCo_2O_4$ – поверхность никелевого порошка.

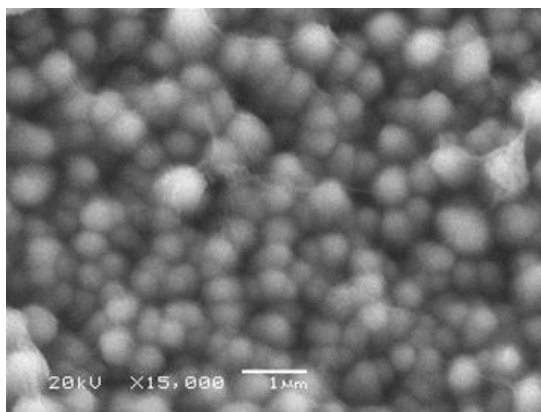


Рис. 6. Пористое покрытие, модифицированное катализатором анодных процессов, $NiCo_2O_4$ – поверхность частицы никель-кобальтового покрытия.

Данные микроскопических исследований хорошо коррелируют с результатами исследований распределения пор по радиусам, проведенных методом контактно-эталонной порометрии.

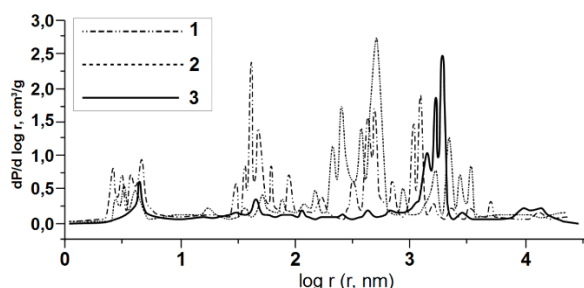


Рис. 7. Дифференциальное распределение пор по радиусам, полученное методом контактно-эталонной порометрии: 1 – пористое покрытие, полученное осаждением никель-кобальтового порошка, модифицированное осаждением NiP_x ; 2 – пористое покрытие, полученное осаждением никелевого порошка, модифицированное осаждением NiP_x ; 3 – пористое покрытие, полученное осаждением никель-кобальтового порошка, модифицированное осаждением $NiCo_2O_4$.

На рисунке 7 приведено дифференциальное распределение пор полученных электродов. пористое покрытие, полученное осаждением никель-кобальтового порошка и модифицированное осаждением катализатором катодных процессов NiP_x (1) характеризуется наиболее развитой удельной поверхностью, причем для реакции доступны как макро- так и наноразмерные поры. Широкий диапазон распределения пор по радиусам положительно сказывается на транспорте газовых пузырьков. При этом снижаются омические потери, за счет уменьшения экранирования поверхности электродов генерируемыми газами. Пористое покрытие, полученное осаждением никелевого порошка (2) характеризуется меньшей удельной поверхностью и основные радиусы пор находятся диапазоне 150-500 нм. Наибольшие радиусы пор и наименьшая удельная поверхность характерна для пористого покрытия, модифицированного катализатором анодных процессов – никель-кобальтовой

шпинелью (3), что может быть объяснено принципиально иным способом модифицирования поверхности пористого покрытия. Стоит отметить, что изучение кинетики электродных процессов показывает, что удельная площадь поверхности играет меньшую роль в реакциях анодного выделения кислорода, по сравнению с реакциями выделения водорода.

Далее приведены поляризационные кривые электродов с катализаторами катодных (рис. 8) и анодных (рис. 9) процессов.

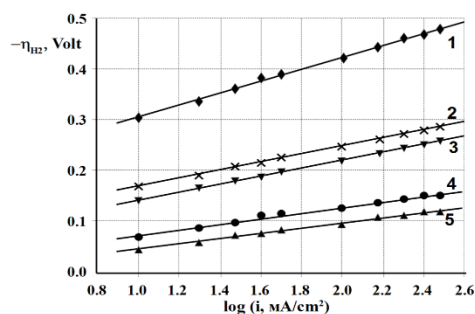


Рис. 8. Поляризационные кривые электродов с катализаторами катодных процессов: 1 – никелевая сетка; 2 – никелевая сетка с осажденным никелевым порошком; 3 – никелевая сетка с никель-кобальтовым порошком; 4 – никелевая сетка с осажденным никелевым порошком, модифицированным NiP_x ; 5 – никелевая сетка с никель-кобальтовым порошком, модифицированным NiP_x .

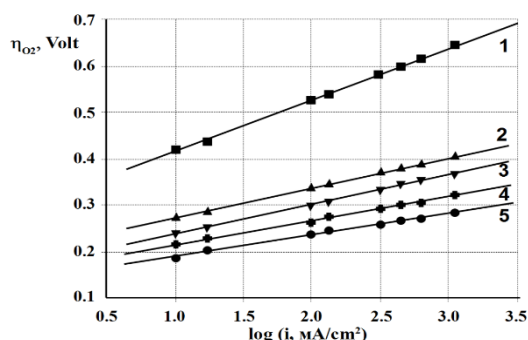


Рис. 9. Поляризационные кривые электродов с катализаторами анодных процессов: 1 – никелевая сетка; 2 – никелевая сетка с осажденным никелевым порошком; 3 – никелевая сетка с никель-кобальтовым порошком; 4 – никелевая сетка с осажденным никелевым порошком, модифицированным $NiCo_2O_4$; 5 – никелевая сетка с никель-кобальтовым порошком, модифицированным $NiCo_2O_4$.

Пористое никелевое покрытие, сформированное с помощью никелевого и никель-кобальтового порошка, позволяет снизить перенапряжение выделения водорода на 190-210 мВ и перенапряжение выделения кислорода на 260-300 мВ при плотности тока 300 mA/cm^2 по сравнению с гладкой никелевой сеткой.

Модифицирование пористого покрытия катализатором (NiP_x) позволяет дополнительно снизить перенапряжение выделения водорода на 100-130 мВ, а катализатором анодных процессов ($NiCo_2O_4$) – на 120-170 мВ.

Характерно, что при нанесении пористого покрытия и его модифицировании меняется угол наклона поляризационных кривых, что может свидетельствовать об изменении механизма реакции. При этом углы наклона поляризационных кривых пористых электродов, сформированных на основе никелевого и никель-кобальтового порошка, практически не отличаются.

3.2. Диафрагма

На рисунках 10 и 11 приведены микрофотографии диафрагмы Тип 2.

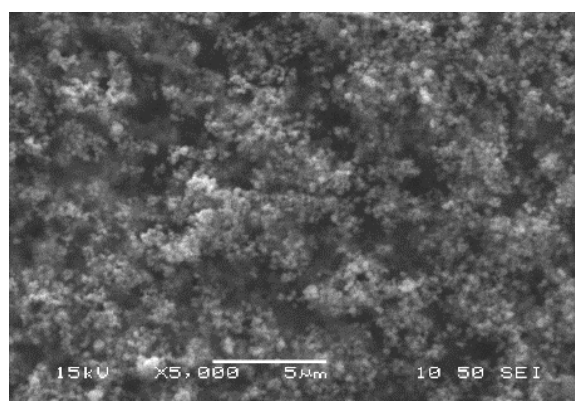


Рис. 10. Микрофотография диафрагмы состава: полисульфон - 33 масс. %, диоксид титана - 67 масс. %, порообразователь поливинилпирролидон, 15 масс.% от массы полимера.

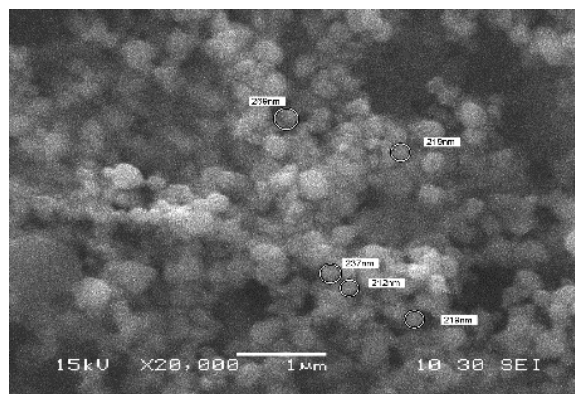


Рис. 11. Микрофотография диафрагмы.

Таблица 1. Удельная электропроводность и суммарная пористость диафрагм электродно-диафрагменного блока

№	Диафрагма	Удельная электропроводность σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Сумм. Пористость см ³ /см ³
1	Полисульфон - 33%; TiO ₂ - 67% Порообразователь (15 масс. %);	2,78	0.450
2	Полисульфон - 33%; TiO ₂ - 67% Без порообразователя	2,57	0.380
3	Полисульфон - 40 %; TiO ₂ - 60% Без порообразователя.	2,49	0.370

Таблица 2. Состав и способ компоновки ячеек щелочного электролизера

Номер кривой на рисунке 13	Способ компоновки	Состав диафрагмы	Электроды
1	Электродно-диафрагменный блок.	Полисульфон - 33 масс. % и диоксида титана - 67 масс. %, порообразователь 15 масс.% от массы полимера.	Пористое покрытие, сформированное из суспензии никель-кобальтового порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).
2	Электродно-диафрагменный блок.	полисульфон - 33 масс. % и диоксида титана - 67 масс. %, без порообразователя	Пористое покрытие, сформированное из суспензии никель-кобальтового порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).
3	Ячейка «с нулевым зазором»	Полисульфон - 33 масс. % и диоксида титана - 67 масс. %, без порообразователя.	Пористое покрытие, сформированное из суспензии никель-кобальтового порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).
4	Электродно-диафрагменный блок	Полисульфон - 40 масс. % и диоксида титана - 60 масс. %, без порообразователя.	Пористое покрытие, сформированное из суспензии никель-кобальтового порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).
5	Ячейка «с нулевым зазором»	Полисульфон - 40 масс. % и диоксида титана - 60 масс. %, без порообразователя.	Пористое покрытие, сформированное из суспензии никель-кобальтового порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).
6	Электродно-диафрагменный блок	Полисульфон - 40 масс. % и диоксида титана - 60 масс. %, без порообразователя.	Пористое покрытие, сформированное из суспензии коммерческого никелевого порошка, модифицированное катализаторами катодных (NiP _x) и анодных (NiCo ₂ O ₄).

В табл. 1 приведена пористость и удельная электропроводность диафрагм, использованных для формирования электродно-диафрагменных блоков. Как видно из таблицы, наибольшей пористостью и удельной электропроводностью обладает диафрагма, синтезированная с добавлением порообразователя к формирующему раствору. Снижение содержания порообразователя снижает суммарную пористость, средних радиус пор и, соответственно удельную электропроводность.

На рисунке 12 приведена интегральная кривая распределения пор радиусам диафрагм, использованных в качестве основы электродно-диафрагменного блока.

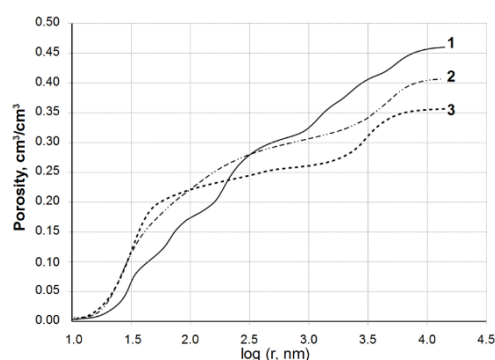


Рис. 12. Интегральная кривая распределения пор диафрагменного материала по радиусам: 1 – полисульфон - 33 масс. % и диоксида титана - 67 масс. %, порообразователь поливинилпирролидон, 15 масс.% от массы полимера; 2 - 33 масс. %, диоксид титана - 67 масс. %, без порообразователя; 3 - полисульфон - 40 масс. % и диоксида титана - 60 масс. %, без порообразователя.

3.3. Электродно – диафрагменный блок

На рисунке 13 приведены вольтамперные характеристики ячейки щелочного электролизера с электрод-

но-диафрагменным блоком и «с нулевым зазором» при 90 °С и атмосферном давлении. Состав и способ компоновки указаны в табл. 2.

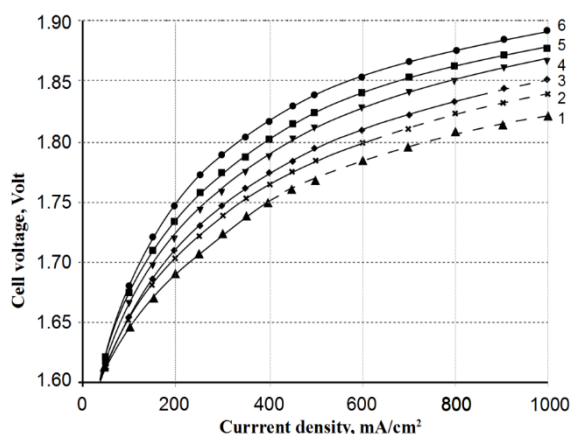


Рис 13. Вольтамперные характеристики ячейки щелочного электролизера, компоненты ячеек указаны в таблице 2.

Как видно из рисунка 13, наименьшим напряжением характеризуется ячейка с электродно-диафрагменным блоком (1). Однако, как показали исследования, чистота генерируемых газов резко снижается от 99,86 % до 97-98 % H_2 при плотностях тока выше 400 mA/cm^2 . Также снижение чистоты генерируемых газов отмечено для электродно-диафрагменного блока (2), при плотностях тока выше 600 mA/cm^2 . При этом, ячейка с такой же диафрагмой (3) показывает снижение чистоты газов при плотностях тока выше 900 mA/cm^2 . Снижение чистоты генерируемых газов в электродно-диафрагменном блоке может быть объяснено тем, что полимерная матрица блокирует отвод генерируемых газов с поверхности электрода, находящейся с ней в контакте.

Дальнейшие исследования проводили с диафрагмой с минимальным количеством гидрофильного наполнителя и без порообразователя. Электролизная ячейка с электродно-диафрагменным блоком (4) показывает более низкое напряжение по сравнению с ячейкой того же состава, но с «нулевым зазором» (5). Самое высокое напряжение показывает электродно-диафрагменный блок (6), в состав которого входили электроды с пористым покрытием, сформированным из суспензии никелевого порошка.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования создан электродно-диафрагменный блок для электролизеров воды с щелочным электролитом. При использовании одних и тех же диафрагменных материалов и электродов, компоновка электролизной ячейки электродно-

диафрагменным блоком позволяет снизить энергозатраты на производство водорода, по сравнению с традиционным «нулевым зазором». Это может быть объяснено снижением контактного сопротивления на границе электрод-диафрагма. С другой стороны, блокирование части поверхности электрода диафрагменным материалом приводит к необходимости снижать газопроницаемости диафрагменного материала, в первую очередь за счет снижения пор больших радиусов и суммарной пористости. В результате работы также создан новый тип пористого покрытия для катодов и анодов щелочных электролизеров, что позволило увеличить удельную поверхность и снизить перенапряжение выделения водорода и кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Grigoriev S. A., Kurochkin S. V., Millet P. Development and performances of a 0.5 kW high-pressure alkaline water electrolyser // *Int. J. Hydrogen Energy* 2019., V. 44 (56), P. 29441.
2. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Kurochkin S. V., Slavnov Yu. A. High-pressure alkaline water electrolyzer for renewable energy storage systems // (Conference Paper). Proc. of 3rd Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE) Conf., 23-24 April 2018, IEEE, Casablanca, Morocco.
3. Ph Vermeiren, Moreels J. P., Claes A., Beckers H. Electrode diaphragm electrode assembly for alkaline water electrolyzers // *Int. J. Hydrogen Energy* 2009., V. 34., P. 9305.
4. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Grigoriev S. A., Udris E. Ya., Millet P., Grigoriev A. S. Development and characterization of new nickel coatings for application in alkaline water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy* 2016., V. 41 (1), P. 36.
5. Patent RU 2534014. Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Udris E.Ya. A method of manufacturing electrodes with a porous nickel coating for water alkaline electrolyzers.
6. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Udris E. Ya. High-performance composite cathodes for alkaline electrolysis of water // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017., V. 90 (3), P. 389.
7. Patent RU 2322460. Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Terentiev A. A. A method of manufacturing a membrane for electrolytic decomposition of water.
8. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Udris E. Ya. Polymeric composite diaphragms for water electrolysis with alkaline electrolyte // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016., V. 89 (4), P. 600.
9. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Kurochkin S. V., Udris E. Ya., Slavnov Yu. A. Polysulfone-based polymeric diaphragms for electrochemical devices with alkaline electrolyte // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018., V. 91 (6), P. 928.
10. Patent RU 2562457. Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Dovbysh S.A. A method of manufacturing an electrode-diaphragm assemblies for alkaline water electrolyzers.

В.Н. Кулешов, С.В. Курочкин, Н.В. Кулешов, Е.Я. Удрис

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

КОАКСИАЛЬНАЯ ЩЕЛОЧНАЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНАЯ БАТАРЕЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В настоящее время водород всё более активно находит применения в различных сферах промышленности. При этом среди всех технологий получения водорода постоянно увеличивается доля электролитического водорода. Наибольшее распространение получили промышленные щелочные электролизёры воды различной производительности. Параллельно начинает развиваться направление, связанное с разработкой щелочных электролизёров воды высокого давления. В данной работе рассматривается вопрос создания и испытаний щелочного электролизёра воды высокого давления. Затрагиваются возможные проблемы при работе его составных частей в условиях высоких давлений, и пути решения этих проблем. Предложенный тип коаксиальной конфигурации и внесённые изменения в состав диафрагменного материала позволили достигнуть давления в 100 Атм.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время водород рассматривается как перспективный вторичный энергоноситель. Он находит применение в современной энергетике, что в свою очередь обусловлено быстрыми темпами развития возобновляемых источников энергии [1, 2]. Неоспоримым преимуществом электролитического метода производства водорода является его высокая чистота без дорогостоящих и технически сложных систем очистки, возможность быстрого старта и быстрой остановки, плавное регулирование производительности без значительных потерь КПД прямого преобразования электрической энергии в химическую. Однако использование водорода не ограничивается исключительно нуждами энергетике, где требуются электролизёры воды с достаточно высокой производительностью по водороду. Существует отдельная большая группа потребителей, например, исследовательские лаборатории, оборонная промышленность, космос, которым постоянно требуются небольшие объёмы водорода под большим давлением. Чаще всего водород к ним доставляют уже в компримированном виде. Поэтому альтернативой централизованному производству водорода может служить использование малогабаритных электролизёров для производства водорода под давлением уже на месте, исключая стадию его транспортировки и хранения.

В настоящее время известны два типа низкотемпературных электролизеров воды: с твердополимерным и щелочным электролитом. К преимуществам электролизеров с твердополимерным электролитом можно отнести высокую чистоту генерируемых газов и возможность генерации водорода под высокими давле-

ниями, но главный их недостаток – высокая стоимость анодного и катодного катализаторов, единственный производитель твердополимерного электролита, высокое требование к техническому обслуживанию и эксплуатации самих электролизёров. Преимущество щелочного электролиза – отсутствие дорогостоящих катализаторов, различные варианты диафрагменных материалов, более простая конструкция, возможность работы при отрицательных температурах (вплоть до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) [3]. При этом, щелочные электролизеры, работающие при высоких давлениях (до 100–300 Атм) известны только в космической отрасли. В настоящей работе описана электролизная батарея с щелочным электролитом новой конструкции, предназначенная для производства водорода под давлением до 100 Атм.

2. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНОЙ БАТАРЕИ

Традиционно используется планарная конструкция твердополимерных и щелочных электролизных модулей, т.е. плоские электроды каждой ячейки расположены параллельно друг другу, а между ними с зазором или без зазора расположена мембрана или диафрагма. Из подобных ячеек монтируют сборку, электролизную батарею. Для создания давления на выходе электролизной батареи до 30 Атм необходимо использовать массивные толстостенные диафрагменные и электродные рамы, и концевые пластины, удерживающие сборку. Увеличение давления до 100 Атм требует использования массивного стального разгрузочного корпуса.

Для решения проблемы повышения давления непосредственно на выходе электролизного модуля без значительного увеличения массогабаритных характеристик может быть предложен альтернативный вариант компоновки – коаксиальная конструкция. При коаксиальной конструкции катод и анод представляют собой цилиндр в цилиндре, а между ними расположена цилиндрическая диафрагма. ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» совместно с РКК «Энергия» создали и испытали щелочной электролизёр воды с фитильной подачей воды в условиях невесомости на основе современной элементной базы [4]. Результаты проведения всесторонних комплексных испытаний экспериментального образца подтвердили высокую эффективность и надёжность электрохимической группы, созданной на кафедре ХиЭЭ НИУ МЭИ. На основе данной установки были выполнены опытные конструкторские работы с активным использованием

цифрового проектирования по созданию энергоэффективного малогабаритного коаксиального щелочного электролизёра воды высокого давления с малой производительностью по водороду.

Для создания автономного водородного заправочного комплекса на основе возобновляемых источников энергии в США также были использованы коаксиальные щелочные электролизные установки, способные обеспечить производство водорода под высоким давлением для системы хранения в сжатом виде, без использования водородного компрессора [5–7]. Для разделения катодного и анодного пространства был использован диафрагменный материал фирмы Zirfon фирмы Agfa Pearl. Анод был выполнен представляет собой стержень из нержавеющей стали, а роль катода выполняла цилиндрическая обечайка, одновременно служащая корпусом батареи. Электролизная ячейка выполнена с межэлектродным зазором, одновременно играющего роль катодной и анодной камеры.

Представленная в данной работе электролизная ячейка коаксиальной конструкции имеет ключевую особенность – она представляет собой коаксиальную конструкцию с нулевым зазором. Ячейка состоит из двух цилиндрических труб, из нержавеющей стали. Диаметры подобраны таким образом, чтобы внутренний объем катодной (внешней) камеры был в два раза больше объема анодной (внутренней).

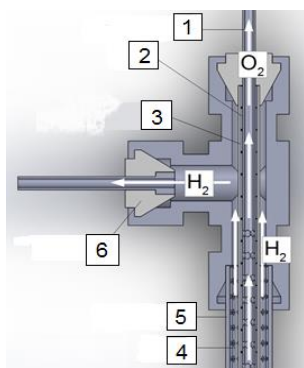


Рис. 1. Внутренняя компоновка коаксиальной электролизной ячейки.

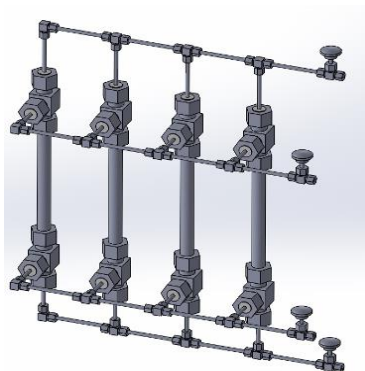


Рис. 2. Компоновка электролизной батареи из коаксиальных электролитических ячеек.



Рис. 3. Опытный образец коаксиальной электролизной ячейки

На рисунке 1 представлена внутренняя компоновка разработанной электролизной ячейки. Внутренний электрод (1), представляет собой трубку из нержавеющей стали с перфорацией в зоне реакции. К внешней поверхности анода приварена никелевая сетка (2) с пористым никелевым покрытием, модифицированным катализатором анодных процессов. На анод нанесена полимерная диафрагма (3). Далее вокруг диафрагмы расположен катод (4). Катод приварен к внешней трубке (5), корпусу электролизной ячейки. Токосвод обеспечивают, подключая положительную полярность к внутреннему электроду на выходе из электролизной ячейки, и отрицательную – непосредственно к внешнему корпусу. Генерируемый кислород отводится с внутренней стороны анода (2) через перфорацию внутреннего электрода (1) и поступает в линию. Водород отводится с внешней стороны катода (4) в пространство между катодом и корпусом (5). В настоящей работе использованы коммерчески доступные фитинги и трубы, сертифицированные производителем для работы с химически агрессивными средами при давлениях до 300 Атм. В стандартную комплектацию фитингов внесено единственное изменение – стальные конические уплотнения заменены полимерными для исключения прямого электрического контакта катода и анода.

Предложенные коаксиальные электролизные ячейки могут быть объединены в электролизную батарею, рисунок 2. Подобная компоновка позволяет изменять производительность электролизера в широких пределах не только за счет изменения плотности тока, но и отключая единичные ячейки.

В электролизной батарее использована диафрагма, полученная методом фазовой инверсии [8–10], представляющая собой пористую матрицу полисульфона с гидрофильным наполнителем. В отличие от предыдущих работ, в раствор полимера не добавляли порообразователь – поливинилпирролидон. Вследствие этого суммарная пористость диафрагмы заметно снизилась, и увеличилось напряжение на ячейке. Однако снижение пористости позволило уменьшить газоприницаемость диафрагменного материала (увеличить чистоту генерируемых газов), что особенно важно при работе в условиях высоких давлений.

Для уменьшения энергопотребления использовали электроды, позволяющие значительно снизить перенапряжение выделения кислорода и водорода [11, 12]. Электроды, применяемые в данной работе, были получены методом электроосаждения. В стандартной ванне Уоттса на просечно–вытяжную никелевую сетку электроосаждали частицы никелевого порошка микронного размера. В дальнейшем для снижения перенапряжения выделения водорода электрод модифицировали фосфором. Для этого на поверхности никелевого порошка химически восстанавливали ни-

кель из раствора гипофосфита натрия, получая NiP_x [13]. Перенапряжение выделения кислорода снижали, модифицируя пористый электрод никель-кобальтовой шпинелью NiCo_2O_4 .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Собранную коаксиальную электролизную ячейку (рисунок 3) подключали к сепараторам, системе подачи дистиллированной воды и циркуляции электролита. Для контроля температуры электролита внутри установки установили термометры сопротивления, а датчики давления разместили на сепараторах. Перед снятием вольт-амперных характеристик электролизёр плавно выходил на заданный температурный режим в 80°C , а повышения давления достигали путём закрытия обратных клапанов на водородном и кислородном контурах.

Щелочную электролизную батарею воды тестировали при давлениях 1, 15, 30, 50, 80 и 100 Атм. Полученные зависимости вольтамперных характеристик от давления приведены на рисунке 4.

Как видно из приведённых данных при повышении давления от 1 до 30 Атм напряжение на батарее снижается, что противоречит термодинамике. Это можно объяснить деполаризацией электродов и снижением газонаполнения. Другим возможным объяснением может служить быстрое замещение генерируемых газов в пористой структуре электрода электролитом, что значительно улучшает доступ электролита ко всей внутренней электродной поверхности. При дальнейшем росте давления от 30 до 100 Атм напряжение повышается. Таким образом, максимальное энергопотребление щелочной электролизёр показывает при давлении в 100 Атм.

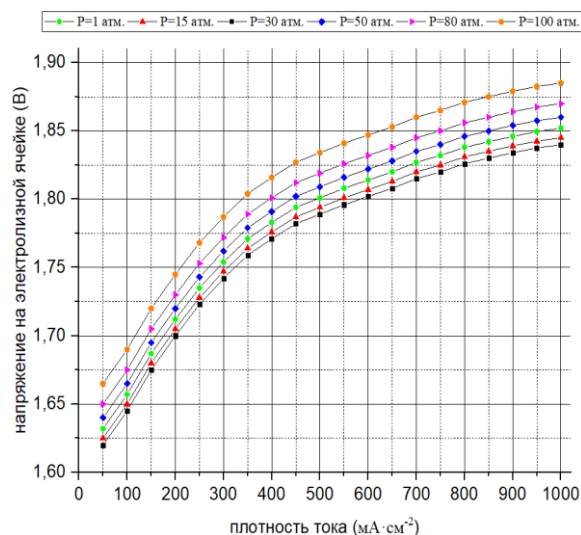


Рис. 4. Зависимость вольт-амперных характеристик коаксиальной щелочной электролизной ячейки при различных давлениях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе продемонстрирована возможность создания коаксиальной щелочной электролизной батареи. Данный тип конструкции полностью отличается от традиционно используемых батарей планарной конструкции. Была разработана и ис-

пытана коаксиальная батарея, изначально спроектированная для генерации чистого кислорода и водорода под высоким давлением. Под неё была адаптирована и испытана уже существующая электрохимическая элементная база и использованы коммерчески доступные конструктивные элементы, сертифицированные для работы с химически агрессивными средами при давлениях до 300 Атм. Полученные результаты говорят о больших перспективах использования данного типа конструкции при создании щелочных электролизёров малой и средней производительности с высоким выходным давлением генерируемых газов без использования компрессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigoriev S. A., Grigoriev A. S., Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Fateev V. N. Power installations with co-generation of electricity and heat based on renewable power sources and electrochemical hydrogen systems // *Thermal Engineering* 2015., V. 62 (2), P. 82.
2. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Kurochkin S. V., Slavnov Yu. A. High-pressure alkaline water electrolyzer for renewable energy storage systems // (Conference Paper). Proc. of 3rd Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE) Conf., 23-24 April 2018, IEEE, Casablanca, Morocco.
3. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Grigoriev S. A., Kurochkin S. V., Millet P. Development and performances of a 0.5 kW high-pressure alkaline water electrolyser // *Int. J. Hydrogen Energy* 2019., V. 44 (56), P. 29441.
4. Korolev S. P., Kuleshov N. V., Kuleshov V. N. High Pressure Water Electrolyzer for Ungravity Space // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences* 2019. V. 2., P. 68.
5. Nelson A. Kelly, Thomas L. Gibson, David B. Ouwkerk. A solar-powered high-efficiency hydrogen fueling system using high-pressure electrolysis of water: Design and initial results // *Int. J. Hydrogen Energy* 2008., V. 33 (11), P. 2747.
6. Nelson A. Kelly, Thomas L. Gibson, David B. Ouwkerk. Generation of high-pressure hydrogen for fuel cell electric vehicles using photovoltaic-powered water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy* 2011., V. 36., P. 15803.
7. Shimko MA, Verma S, Jackson T, Kamrani JS, Moss DK. Electrolyzer apparatus and method for hydrogen and oxygen production U.S. patent 7,510,633; March 31, 2009.
8. Patent RU 2322460. Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Terentiev A. A. A method of manufacturing a membrane for electrolytic decomposition of water.
9. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Udris E. Ya. Polymeric composite diaphragms for water electrolysis with alkaline electrolyte // *Russ. J. Appl. Chem.* 2016., V. 89 (4), P. 600.
10. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Kurochkin S. V., Udris E. Ya., Slavnov Yu. A. Polysulfone-based polymeric diaphragms for electrochemical devices with alkaline electrolyte // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018., V. 91 (6), P. 928.
11. Patent RU 2534014. Kuleshov N.V., Kuleshov V.N., Udris E.Ya. A method of manufacturing electrodes with a porous nickel coating for water alkaline electrolyzers.
12. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Grigoriev S. A., Udris E. Ya., Millet P., Grigoriev A. S. Development and characterization of new nickel coatings for application in alkaline water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy* 2016., V. 41 (1), P. 36.
13. Kuleshov N. V., Kuleshov V. N., Dovbysh S. A., Udris E. Ya. High-performance composite cathodes for alkaline electrolysis of water // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017., V. 90 (3), P. 389.

С.Н.Петин, Т.А. Высочина, П.Н. Григорьев, С.К. Попов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

АННОТАЦИЯ

Использование вторичных энергетических ресурсов позволит снизить удельный расход природного газа на производство водорода. Одним из масштабных неиспользованных вторичных энергетических ресурсов в России является конвертерное производство стали, где конвертерный газ практически полезно не используется, при этом сжигается на свече, что дает дополнительные выбросы парниковых газов в атмосферу. Рассмотренная схема использования конвертерных газов для производства водорода на основании термохимической рекуперации может обеспечить снижение удельного расхода природного газа с высокой экономической эффективностью.

1. ВВЕДЕНИЕ

Производство водорода из природного газа является наиболее масштабным и составляет около 85% от общего производства [1]. Использование водорода из природного газа распространено в химической и нефтеперерабатывающей промышленности для получения технологической продукции. В [1] указывается, что использование водорода, полученного из органического топлива, с точки зрения экологии практически не отличается от непосредственного использования топлива, так как вредные выбросы в том и другом случае одинаковы. В одном случае парниковые выбросы в атмосферу появляются на стадии использования топлива, а в другом те же выбросы получают на стадии производства водорода. В [1] указывается, что производство водорода из органического топлива может быть перспективно при улавливании сопутствующих выбросов в атмосферу, включая CO₂. В [2] показаны перспективы использования CO₂ при его захоронении в старых месторождениях нефти для повышения нефтеотдачи или в слоях железомagneйных минералов для образования карбонатов.

Удельный расход природного газа на производство водорода конверсионными способами составляет 0.43 – 0.66 (м³прир. газа)/(м³ H₂) [3, 4], при этом его стоимость находится на уровне 1.1 – 1.6 долл./кг [5] или 0.10 – 0.15 долл./(м³ H₂).

В данной работе для повышения эффективности производства водорода из органического топлива ставится задача по снижению удельного расхода природного газа за счет использования газовых отходов, что позволит снизить выход парниковых газов, а также повысить экономическую эффективность.

2. ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ РЕКУПЕРАЦИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ

Высокотемпературные газовые отходы промышленных установок являются вторичным энергоресурсом, который возможно комплексно утилизировать с получением нового источника энергии – синтез-газа – посредством конверсии природного газа или иного углеводородсодержащего вещества [6]. Синтез-газ может быть использован как вторичное топливо для энергоустановок либо как сырье для технологических процессов, в т.ч. для получения водорода. Комплексность утилизации состоит в том, что в процессе конверсии используется как теплота газовых отходов, так и (частично либо полностью) материальный поток газовых отходов.

В случае термохимической рекуперации (ТХР) утилизируется значительная доля теплового потока и до 30% материального потока высокотемпературных газовых отходов [6–9]. Окислителями в процессе конверсии природного газа или иного углеводородсодержащего вещества служат водяной пар, отходящие газы (продукты горения), а также смесь водяного пара и продуктов горения. Выявлено и исследовано положительное влияние ТХР на характеристики парогазовых установок и газотурбинных установок [11–14].

Производство конвертерной стали в России характеризуется ежегодным объемом производства около 60 млн. т, при этом потенциал использования энергии конвертерных газов составляет 1250 тыс. т у.т., а потенциал сокращения выбросов диоксида углерода – 2140 тыс. т [15]. В [16] представлены способы утилизации конвертерных газов методами ТХР для производства электроэнергии [17], а также методом энергетической аккумуляции (ЭХА) для производства водорода [4, 18].

На российских металлургических предприятиях полного цикла перспективным направлением считается установка газгольдеров для утилизации конвертерных газов [19, 20]. Ведутся разработки систем совместного функционирования газгольдерных схем с элементами ТХР на заводах Японии, Германии, Китая [22–24].

Наиболее ранними из известных работ по утилизации конвертерных газов на основе ЭХА являются исследования, выполнявшиеся с 1985 года на кафедре

Энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ» под руководством профессора А.Д. Ключникова и изложенные в [25]. Дальнейшее развитие данное научное направление получило в работах [26, 27].

Технические решения по утилизации конвертерных газов для получения синтез-газа широкого назначения представлены в работах [28–35]. Исследованию вопросов утилизации конвертерных газов с целью производства водорода посвящены работы [4, 7, 16, 18, 27]. В данной работе представлены результаты исследования схемы термохимической рекуперации энергии конвертерных газов для производства водо-

рода на основе конверсии природного газа.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМЫ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА

Конвертерные газы можно использовать как источник энергии для паровой конверсии природного газа с целью производства водорода. Тепловая схема данного варианта представлена на рис. 1.

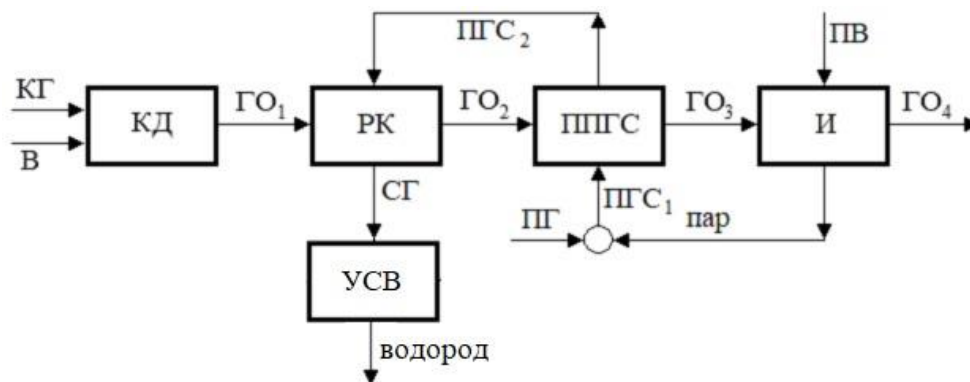


Рис. 1. Тепловая схема использования конвертерного газа для паровой конверсии природного газа с последующим получением водорода: КД – камера дожигания конвертерного газа; РК – реактор конверсии; ППГС – подогреватель парогазовой смеси; И – испаритель; УСВ – установка сепарации водорода; КГ – конвертерный газ; ГО₁, ГО₂, ГО₃, ГО₄ – газовые отходы на выходе КД, РК, ППГС и И соответственно; В – воздух, подаваемый в камеру дожигания конвертерного газа; ПГС₁, ПГС₂ – парогазовая смесь (смесь водяного пара и природного газа) на входе и выходе ППГС; ПВ – питательная вода; ПГ – природный газ; СГ – синтез-газ.

Расчетное исследование представленной тепловой схемы выполнено при следующих исходных данных:

- процентный состав конвертерного газа [7]: N₂=14.62; CO₂=23.52; O₂=4.22; CO=57.35; H₂=0.29;
- процентный состав природного газа: CH₄^T=89.7; C₂H₆^T=5.2; C₃H₈^T=1.7; C₄H₁₀^T=0.4; C₅H₁₂^T=0.1; CO₂^T=0.1; N₂^T=2.7;
- температура синтез-газа 800 °С;
- температура подогретой парогазовой смеси (поток ПГС₂) 400 °С.

Принято, что синтез-газ на выходе из реактора конверсии находится в состоянии термодинамического равновесия; все входящие в систему материальные потоки имеют температуру окружающей среды.

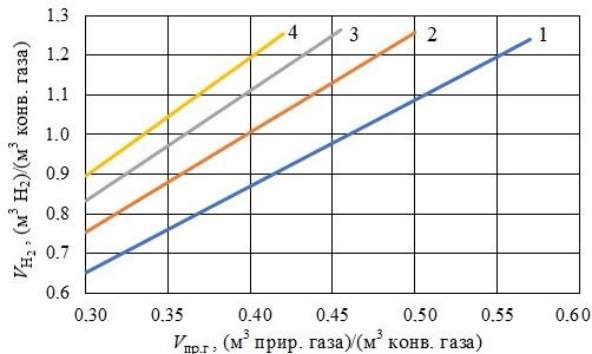


Рис. 2. Зависимость удельного выхода водорода от удельного расхода природного газа при различных удельных расходах пара на конверсию (давление синтез-газа 10 атм): 1 – V_{пар}= 1.5(м³ пара)/(м³ прир. газа); 2 – V_{пар} = 2.0; 3 – V_{пар} = 2.5; 4 – V_{пар} = 3.0.

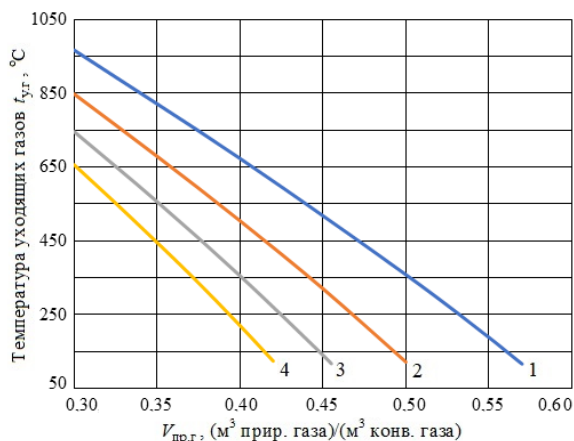


Рис. 3. Зависимость температуры уходящих газов от удельного расхода природного газа при различных удельных расходах пара на конверсию (давление синтез-газа 10 атм): 1 – V_{пар}= 1.5(м³ пара)/(м³ прир. газа); 2 – V_{пар}=2.0; 3 – V_{пар}=2.5; 4 – V_{пар}=3.0.

Результаты исследования представлены на рис. 2, 3 в виде зависимостей удельного выхода водорода V_{H₂}, (м³ водорода)/(м³ конвертерного газа), и температуры уходящих газов (поток ГО₄ на рис. 1) t_{у.г.}, °С, от удельного расхода природного газа, V_{пр.г.}, (м³ прир. газа)/(м³ конвертерного газа), при различных удельных расходах водяного пара на процесс конверсии

$V_{\text{пар}}$, (м^3 пара)/(м^3 прир. газа). Данные результаты получены при давлении синтез-газа 10 атм (0.98 МПа).

С увеличением $V_{\text{пр.г}}$ всё большая доля теплоты продуктов сгорания конвертерного газа расходуется на паровую конверсию, вследствие чего температура уходящих газов уменьшается (см. рис. 3). При снижении $t_{\text{у.г}}$ до уровня 115 – 120 °С дальнейшее увеличение $V_{\text{пр.г}}$ нецелесообразно. Этим объясняется представленный на рис. 2, 3 диапазон варьирования величины $V_{\text{пр.г}}$.

Результаты аналогичного исследования при давлении синтез-газа $p_{\text{сг}}=1$ атм (0.098 МПа) проиллюстрированы на рис. 4, 5.

Сопоставление с данными на рис. 2, 3 приводит к выводу, что изменение $p_{\text{сг}}$ заметно влияет на режимные параметры рассматриваемой установки.

Представляет интерес оценка уровня b – удельного расхода природного газа на производство водорода, (м^3 прир. газа)/(м^3 H_2). Очевидно, что $b=V_{\text{пр.г}}/V_{\text{H}_2}$. Результаты оценки показаны на рис. 6.

Из графиков, представленных на рис. 6, видно, что удельный расход природного газа на производство водорода может составить 0.285 (м^3 прир. газа)/(м^3 H_2) при давлении синтез-газа 1 атм и 0.335 (м^3 прир. газа)/(м^3 H_2) при давлении синтез-газа 10 атм, что ниже характеристик используемых технологий производства водорода на 22–56%.

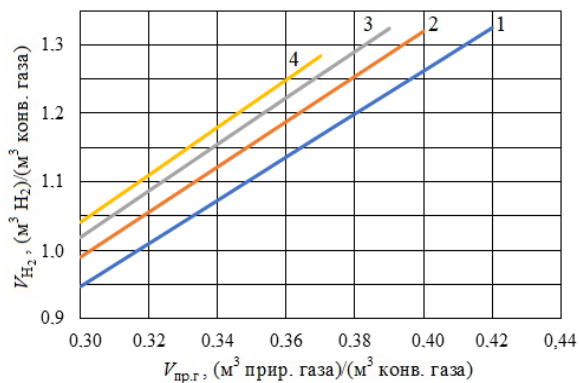


Рис. 4. Зависимость удельного выхода водорода от удельного расхода природного газа при различных удельных расходах пара на конверсию (давление синтез-газа 1 атм): 1 – $V_{\text{пар}}=1.5(\text{м}^3 \text{ пара})/(\text{м}^3 \text{ прир. газа})$; 2 – $V_{\text{пар}}=2.0$; 3 – $V_{\text{пар}}=2.5$; 4 – $V_{\text{пар}}=3.0$.

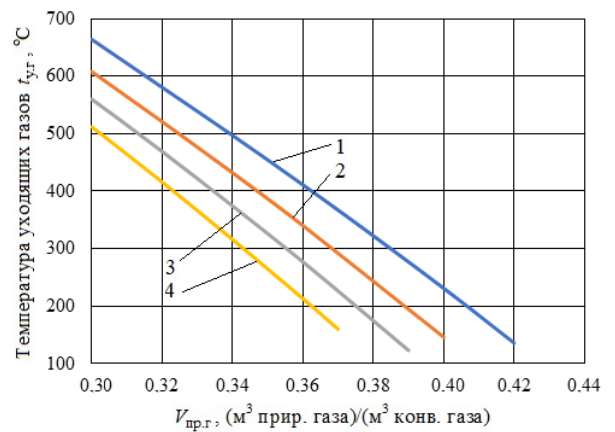


Рис. 5. Зависимость температуры уходящих газов от удельного расхода природного газа при различных удельных расходах пара на конверсию (давление синтез-газа 1 атм): 1 – $V_{\text{пар}}=1.5(\text{м}^3 \text{ пара})/(\text{м}^3 \text{ прир. газа})$; 2 – $V_{\text{пар}}=2.0$; 3 – $V_{\text{пар}}=2.5$; 4 – $V_{\text{пар}}=3.0$.

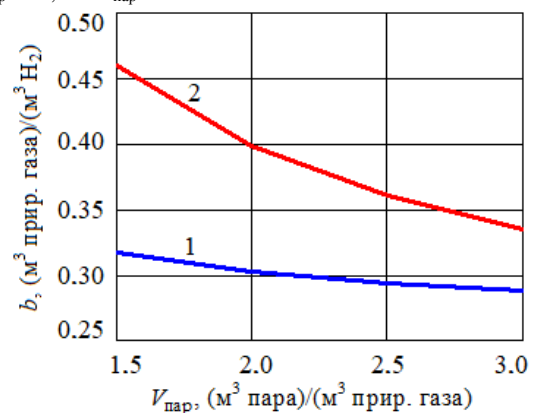


Рис. 6. Зависимость удельного расхода природного газа на производство водорода от удельного расхода пара: 1 – $p_{\text{сг}}=1$ атм; 2 – $p_{\text{сг}}=10$ атм.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕКУПЕРАЦИИ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ

Анализ экономических характеристик процесса производства водорода по схеме, представленной на рис. 1, выполнен согласно методикам [36–38] со следующими исходными данными.

1. Годовое производство стали – 11 млн. т при работе трех конвертеров емкостью 400 т в режиме «два конвертера в работе, один – в резерве». Удельный выход газовых отходов – конвертерных газов – на единицу произведенной стали составляет $V_{\text{к.г}} = 87.5$ (м^3 конв. газа)/(т стали).

2. Удельные характеристики производства водорода имеют следующие значения:

- давление синтез-газа $p_{\text{сг}} = 10$ атм;
- удельный выход водорода на единицу конвертерного газа $V_{\text{H}_2} = 0.896$ ($\text{м}^3 \text{ H}_2$)/(м^3 конв. газа);
- удельный расход природного газа на производство водорода $b=0.335$ (м^3 прир. газа)/($\text{м}^3 \text{ H}_2$);
- удельный расход пара на конверсию

$V_{\text{пар}}=3(\text{м}^3 \text{ пара})/(\text{м}^3 \text{ прир. газа});$

- удельный расход электроэнергии на производство водорода $e_{\text{э}}^{\text{H}_2} = 0.038 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^3 \text{ H}_2)$ [3].

На основании принятых энергетических характеристик количество произведенного водорода составит $G^{\text{H}_2} = 862.4 \text{ млн. м}^3/\text{год}$ или $g^{\text{H}_2} = 99.8 \text{ тыс. м}^3 \text{ H}_2/\text{ч}$, при работе 360 суток в год.

Годовые расходы энергоресурсов на производство водорода составят: природного газа $B_{\text{пр.г}}^{\text{H}_2} = 288.75 \text{ млн. м}^3/\text{год}$; воды $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2} = 0,696 \text{ млн. т}/\text{год}$; электроэнергии $\text{Э}_{\text{э}}^{\text{H}_2} = 32.771 \text{ млн. кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$.

Для расчетов затрат на энергоносители и ресурсы принимаются следующие стоимости природного газа, воды и электроэнергии: $p_{\text{пр.г}} = 5 \text{ руб.}/\text{м}^3$; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 40 \text{ руб.}/\text{т}$; $p_{\text{э}} = 5 \text{ руб.}/\text{кВт}\cdot\text{ч}$ соответственно.

Для оценки капитальных затрат в проект принимаются следующие данные: удельные затраты на производство водорода – 0,9 млн. долл./ (тыс. м³/ч) [2]; стоимость газгольдера – 80 млн. руб. [15]; курс рубля по отношению к доллару – 73 руб./долл.

На этой основе суммарные капитальные затраты $K = 6637.5 \text{ млн. руб.}$

Срок реализации проекта принимается 2 года, при этом инвестиции в 1-й год составляют 37%, а во 2-й год – 63%. Структура капитальных затрат в течение двух лет представлена в табл. 1.

Для оценки ежегодных затрат на производство водорода определяются следующие затраты: на энергетические и сырьевые ресурсы (природный газ, вода, электроэнергия); на ремонт и обслуживание оборудования; на фонд оплаты труда (ФОТ); на амортизацию; на налог на имущество.

Таблица 1. Структура капитальных затрат, млн. руб.

Наименование этапа	1-й год	2-й год	ИТОГО: по годам
Проектные работы	265,6	66,3	331,9
Подготовка территории	0,0	663,8	663,8
Закупка оборудования	1991,2	1991,3	3982,5
Строительно-монтажные работы	199,1	796,4	995,5
Пуско-наладочные работы	0,0	663,8	663,8
ИТОГО по этапам:	2455,9	4181,6	6637,5

Затраты TC_1 на энергетические и сырьевые ресурсы

$$TC_1 = B_{\text{пр.г}}^{\text{H}_2} \cdot p_{\text{пр.г}} + G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Э}_{\text{э}}^{\text{H}_2} \cdot p_{\text{э}} = 288.75 \cdot 5 + 0.696 \cdot 40 + 32.711 \cdot 5 = 1635 \text{ млн. руб.} / \text{год.}$$

Затраты TC_2 на ремонт и обслуживание оборудования

$$TC_2 = P_{\text{об}} \cdot d_{\text{рем}} = 3982.5 \cdot 0.1 = 398 \text{ млн. руб.} / \text{год},$$

где $P_{\text{об}}$ – стоимость оборудования (см. табл. 1, этап «Закупка оборудования»); $d_{\text{рем}} = 0.1$ – доля отчислений на ремонт от начальной стоимости оборудования.

В расчете затрат TC_3 на ФОТ принято: дополнительное число работников для участков производства водорода – 16 чел.; среднемесячная зарплата – 80 тыс. руб.; отчисления в социальные фонды – 30.2%. В итоге $TC_3 = 20 \text{ млн. руб.} / \text{год}$

Затраты TC_4 на амортизацию оборудования

$$TC_4 = P_{\text{з.о.}} / n_3 = 6637.5 / 20 = 331.87 \text{ млн. руб.} / \text{год},$$

где $P_{\text{з.о.}}$ – стоимость капитальных затрат (см. табл. 1 в строке «Итого»); $n_3 = 20$ лет – срок эксплуатации оборудования.

Затраты TC_5 на налог на имущество для первого года

$$TC_5 = H_{\text{база}} \cdot H_{\text{ставка}} / 100 = 6637.5 \cdot 2.2 / 100 = 146 \text{ млн. руб.} / \text{год},$$

где $H_{\text{база}} = 6637,5 \text{ млн. руб.}$ – налоговая база для начисления налога на имущество для первого года эксплуатации; $H_{\text{ставка}} = 2.2\%$ – налоговая ставка.

Общие затраты по первому году эксплуатации

$$TC = TC_1 + TC_2 + TC_3 + TC_4 + TC_5 = 1635 + 398 + 20 + 332 + 146 = 2531 \text{ млн. руб.} / \text{год.}$$

Себестоимость 1 м³ H₂ по первому году эксплуатации

$$C_{\text{H}_2} = TC / G^{\text{H}_2} = 2531 / 862.4 = 2.93 \text{ руб.} / (\text{м}^3 \cdot \text{H}_2)$$

Себестоимость составляет около 0.04 долл./ (м³ H₂) или 0.41 долл./кг, что в среднем в 3.3 раза ниже, чем в [5].

Оценка стоимости реализации водорода на данный момент является достаточно дискуссионным моментом, так как рынок водорода в мире не развит. Для расчета выручки от реализации водорода принимается его стоимость $p_{\text{H}_2} = 20 \text{ руб.}/\text{м}^3$, данное значение близко к стоимости энергетически эквивалентного количества бензина на российском рынке.

Годовая выручка от реализации водорода составит

$$TR = G^{\text{H}_2} \cdot p_{\text{H}_2} = 862.4 \cdot 20 = 17248 \text{ млн. руб.} / \text{год.}$$

Прибыль от реализации водорода определяется как разность выручки (совокупного дохода) от реализации водорода и общих ежегодных затрат, связанных непосредственно с его производством, по формуле

$$PR = TR - TC = 17248 - 2531 = 14717 \text{ млн. руб.} / \text{год.}$$

Для оценки экономической эффективности производства водорода при ТХР конвертерных газов предлагается определить ряд критериев.

Чистый дисконтированный доход – ЧДД (net present value – NPV) рассчитывается по формуле

$$NPV = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+d)^t} - \sum_{i=1}^t Inv_i (1+i/100)^t,$$

где CF_i – чистый денежный поток (cash flow), руб.; i – прогнозируемый среднегодовой темп инфляции, %; Inv_i – начальные инвестиции в проект, руб.; t – количество лет реализации проекта; d – ставка дисконтирования.

Индекс рентабельности (доходности) – ИД (benefit-cost ratio, profitability index – PI)

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+d)^t}}{\sum_{i=1}^t Inv_i (1+\frac{i}{100})^t}.$$

Внутренняя норма доходности – ВНД, (internal rate of return – IRR) определяется из уравнения

$$0 = \sum_{i=1}^t \frac{CF_i}{(1+IRR)^t} - \sum_{i=1}^t Inv_i (1+\frac{i}{100})^t.$$

Коэффициент дисконтирования с учетом рисков

Таблица 2. Расчет экономических критериев для проекта при реализации водорода по стоимости 20 руб./м³

Период, год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Чистый денежный поток, млн. руб./год	0	0	16317	33213	50709	68826	87587	107015	127132	147963
Коэффициент дисконтирования			0,1566	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566	0,0566
Дисконтный денежный поток, млн. руб./год	0	0	10547	26651	38512	49473	59587	68906	77476	85343
Инвестиции с учетом инфляции, млн. руб./год	2542	7110	7883	9046	10744	13207	16803	22127	30157	42539
Чистый дисконтированный доход NPV , млн. руб./год	-2542	-7110	2663	17605	27768	36265	42784	46779	47320	42805
Индекс доходности PI	0,0	0,0	1,3	2,9	3,6	3,7	3,5	3,1	2,6	2,0
Внутренняя норма доходности IRR	108%									

Из представленных на рис. 7 данных следует, что дисконтированный срок окупаемости составляет 2.73 года, а проект окупится в течение 1 года эксплуатации. На этой основе можно сделать вывод, что проект характеризуется достаточно высокой экономической эффективностью.

Результаты анализа показывают, что предложенное техническое решение отличается высокими экономическими показателями и рисками, связанными с продвижением на рынок нового продукта – водорода (на это указывает высокий коэффициент дисконтирования, что приводит к снижению роста чистого дисконтированного дохода с учетом времени, но уже в период после срока окупаемости данного проекта).

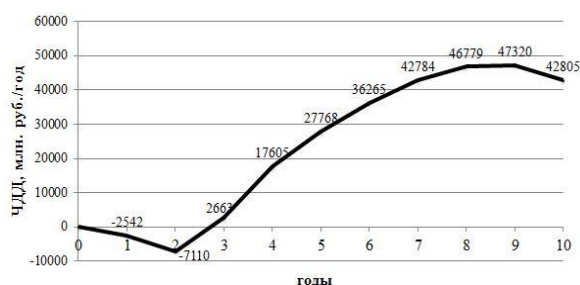


Рис. 7. Чистый денежный поток проекта при реализации водорода по стоимости 20 руб./м³.

$$d = d_i + P/100.$$

Здесь P – поправка на риск, принимается 13% для производства и продвижения нового продукта либо 5% для развития производства на базе освоенной технологии; d_i – ставка дисконтирования:

$$d_i = \frac{r - i}{100 + i} = \frac{6.25 - 3.5}{100 + 3.5} = 0.02657,$$

где $r = 6.25\%$ – ставка рефинансирования; $i = 3.5\%$ – темп инфляции. Коэффициент дисконтирования с учетом рисков составляет 0,1566 до возврата инвестиций и 0,0566 после возврата инвестиций.

Результаты расчета экономических критериев представлены в табл. 2.

Для определения периода окупаемости целесообразно использовать графический способ. На рис. 7 представлено изменение ЧДД в течение 10 лет реализации проекта.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и исследована схема производства водорода на основе термохимической рекуперации газовых отходов сталеплавильного производства.

Исследование теплотехнических параметров схемы приводит к выводу, что ее реализация позволит организовать производство водорода с удельным расходом природного газа на 22–56% ниже, чем в ныне используемых технологиях.

Анализом экономических показателей рассмотренной схемы установлено, что при конвертерном производстве стали производительностью 11 млн. т в год можно получать ежегодно 862.4 млн. м³ водорода с себестоимостью 0.41 долл./кг, при этом дисконтированный срок окупаемости составит 2.73 года с начала реализации проекта.

Результаты исследования позволяют сделать вывод о высокой энергоэкономической эффективности рассмотренного технического решения по генерации водорода с использованием газовых отходов сталеплавильного производства.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТХР – термохимическая рекуперация;
ЭХА — энергохимическая аккумуляция;
КД – камера дожигания;
РК – реактор конверсии;
ППГС – подогреватель парогазовой смеси;
И – испаритель;
УСВ – установка сепарации водорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко, А.С. Водород в энергетике / А.С. Радченко, Р.В. Мокрушин, В.В. Тюльпа. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. 229 с.
2. Козлов, С.И. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / С.И. Козлов, В.Н. Фатеев. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 520 с.
3. Петин, С.Н. Энергетическая эффективность производства и потребления водорода / С.Н. Петин // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С.29–36.
4. Петин, С.Н. Утилизация конвертерных газов с целью получения водорода / С.Н. Петин // Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 29–33.
5. Сняк, Ю.В. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства / Ю.В. Сняк, В.Ю. Петров // Проблемы прогнозирования. 2008. №3. С. 35–46.
6. 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.
7. Попов, С.К. Повышение эффективности теплотехнологий при использовании природного газа и кислорода / С.К. Попов, С.Н. Петин, И.Н. Свистунов, В.А. Ипполитов – М.: Издательство МЭИ, 2018. 192 с.
8. Popov S.K., Svistunov I.N., Garyaev A.B., Serikov E.A., Temyrkanova E.K. The use of thermochemical recuperation in an industrial plant // Energy. 2017. Vol. 127. P. 44–51.
9. Попов, С.К. Термохимическая рекуперация в высокотемпературной теплотехнологии / С.К. Попов. – М.: Издательство МЭИ, 2018. 104 с.
10. Nosach V.G., Shraiber A.A. Improvement of the economic and ecological characteristics of steam-and-gas plants by means of conversion of natural gas in combustion products // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2008. Vol. 9. Issue 1–3. P. 39–46.
11. Verkhivker G., Kravchenko V. The use of chemical recuperation of heat in a power plant // Energy. 2004. Vol. 29. P. 379–388.
12. Носач В. Г., Шрайбер А.А. Повышение эффективности газотурбинных установок за счет совместного использования термохимической и паровой регенерации // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33. № 2. С. 46–49.
13. Пашенко, Д.И. Термохимическая регенерация тепла дымовых газов путем конверсии биоэтанола / Д.И. Пашенко // Теплоэнергетика. 2013. № 6. С. 59–64.
14. Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit // Energy Conversion and Management. 2018. Vol. 171. P. 917–924.
15. Курзанов, С.Ю. Повышение энергетической эффективности сталеплавильного производства на основе использования конвертерных газов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.Ю. Курзанов. М., 2011.
16. Попов, С.К. Решение проблемы утилизации конвертерных газов способами термохимической рекуперации / С.К. Попов, А.Б. Гаряев, С.Н. Петин, А.М. Беленький // Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» (Москва, 12-14 декабря 2018 г.). – М.: НИТУ МИСиС – 2018. С. 258–264.
17. Пат. 2495135 РФ МПК C21C5/38. Устройство для утилизации теплоты отходящих конвертерных газов / А.М. Беленький, Н.М. Савченкова, В.С. Глазов, С.К. Попов, А.Б. Гаряев, Н.О. Байдакова, И.В. Яковлев. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». № 2012119746/05. Заявл. 15.05.2012 // Изобретения. Полезные модели. 2013. № 28.
18. Пат. 2637439 (РФ), МПК C21C5/38. Способ утилизации конвертерных газов для производства водорода / С.Н. Петин, А.В. Бурмакина, В.А. Ипполитов. Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». №2016129998. заявл. 21.06.2016 // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 34.
19. Зайцев, А.А. О перспективах утилизации конвертерного газа на ЧерМК ПАО «Северсталь» / А.А. Зайцев, А.Е. Талантов // Черная металлургия. – 2016. – №8. – С. 82–85.
20. Пат. 2640514 (РФ), МПК C21C 5/38. Способ выработки электроэнергии с использованием тепла отходящих конвертерных газов / А.Е. Талантов, А.А. Зайцев, В.Н. Тихонов. Заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество "Северсталь" (ПАО "Северсталь") (RU), заявл. 2018.01.09 // Изобретения. Полезные модели. 2018. № 1.
21. Пат. 2466192 (РФ), МПК C21C5/38. Способ преобразования отходящего газа, образовавшегося в металлургической печи, способ получения преобразованного газа, устройство риформинга отходящего газа, устройство для преобразования отходящего газа, способ охлаждения отходящего газа и устройство для охлаждения отходящего газа / К. Такаги, Х. Саима, М. Ясухиро, М. Ясуо; Заявитель и патентообладатель ДжФЕ СТИЛ КОРПОРЕЙШН. №2010146491/02, заявл. 12.02.2009 // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 31.
22. Пат. 2536123 (РФ), МПК C21C5/38. Способ и устройство для охлаждения отходящего газа / К. Такаги, Х. Саима, М. Ясухиро, М. Ясуо; Заявитель и патентообладатель ДжФЕ СТИЛ КОРПОРЕЙШН. №2012130458/02, заявл. 12.05.2009 // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 35.
23. Пат. 2569105, МПК F27D17/00, C21C5/38, F23J15/00. Способ обработки отходящего газа, содержащего диоксид углерода / М. Бальдауф, Т. Мачулла; Заявитель и патентообладатель СИМЕНС АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ. № 2016129998, заявл. 02.01.2012 // Изобретения. Полезные модели. 2015. № 32.
24. Lingen C., Xun S., Shaojun X., Fengrui S. Thermodynamic analyses for recovering residual heat of high temperature basic oxygen gas (BOG) by the methane reforming with carbon dioxide reaction // Energy. 2017. Vol. 118. P. 906–913.
25. Картавцев, С.В. Природный газ в восстановительной плавке. СВС и ЭХА / С.В. Картавцев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. 188 с.
26. Пат. 2002812, МПК C10G9/34. Способ утилизации конвертерных газов / С.В. Картавцев, И.В. Портнова. Заявитель и патентообладатель Магнитогорский горно-металлургический институт им. Г.И. Носова. № 4939471. заявл. 15.02.1991 // Открытия. Изобретения. 1992. № 37.
27. Петин, С.Н. Разработка перспективной модели энерго- и экологически эффективного производства водорода на базе природного газа и комбинирования процессов в черной металлургии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Н. Петин. – М., 2009.
28. Пат. 2525012 РФ, МПК C21C 5/38 C 10B/57/00. Способ использования конвертерного газа для производства топлива / С.П. Мочалов, М.Б. Школлер, Е.В. Протопопов. Патентообладатель: Сибирский государственный индустри-

- альный университет. № 2012130546/02, заявл, 2012.07.17 // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 3.
29. Пат. на п.м. **144630 РФ МПК С10К1/02**. Устройство для регенерации конвертерного газа/ Ю. Чжай (АТ), А. Фляйшандерль (АТ). Заявитель и патентообладатель СИМЕНС ФАИ МЕТАЛЗ ТЕКНОЛОДЖИЗ ГМБХ (АТ) № 2013151909, заявл, 2012.04.20 // Изобретения. Полезные модели. 2014. № 24.
30. Пат. **2661688 РФ МПК С21В 5/06**. Способ производства синтез-газа в цикле работы металлургического завода/ Р. Ахац, (DE), Й. Вагнер, (DE), М. Олес (DE). Заявитель и патентообладатель ТИССЕНКРУПП АГ (DE) № 2016127975, заявл, 2018.07.19 // Изобретения. Полезные модели. 2018. № 20.
31. Пат. **2652720 РФ МПК С10В 55/10**. Способ утилизации горючих отходящих газов / К. Шнайдер, (DE), А. Боде (DE), Д. Клинглер (DE). Заявитель и патентообладатель БАСФ СЕ (DE) ЛИНДЭ АГ (DE) ТЮССЕНКРУПП ИНДАСТРИАЛ СОЛЮШНС АГ (DE) № 2015129289, заявл, 2018.04.28 // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 3.
32. Пат. **2618971 РФ МПК С21В 13/00**. Способ обработки отходящих газов из установок для производства чугуна и/или синтез-газа / Р. Милльнер (АТ), Г. Розенфельднер (АТ). Заявитель и патентообладатель ПРАЙММЕТАЛЗ ТЕКНОЛОДЖИЗ АУСТРИА ГМБХ (АТ) №2014112201, заявл, 2012.08.22 // Изобретения. Полезные модели. 2017. № 28.
33. **Максимов, А.А.** Совершенствование энергоэффективной схемы утилизации конвертерного газа / А.А. Максимов, Е.Б. Агапитов // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (ТИМ'2015)* – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 101–105.
34. **Калашников А.С., Агапитов Е.Б.** Исследование варианта утилизации конвертерного газа в схеме с паровым котлом // *Материалы 19-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов «Энергетики и металлурги – настоящему и будущему России»*. – Магнитогорск, 2018. – С. 60–62.
35. **Васильева А.Ю., Буткевич М.В., Хейло Д.В.** Использование компримированных конвертерных газов в технологии восстановления окатышей // *Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве»*. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 346–348.
36. **Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов** (вторая редакция), утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике (№ ВК 477 от 21 июня 1999 г.). – М.: Экономика, 2000. Издание официальное.
37. **Экономика энергетики: учебник для вузов** / Н.Д. Рогалев, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова и др.; под ред. Н.Д. Рогалева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 320 с.
38. **Клименко, А.В.** Основы мультигенерации: учеб. пособие / А.В. Клименко, В.С. Агабабов, А.В. Корягин, С.Н. Петин, А.А. Коршикова, П.Н. Борисова. – М.: Издательство МЭИ, 2019. 92 с.

А.С. Пушкарев¹, И.В. Пушкарева¹, С.В. Акелькина¹, М.В. Козлова^{1,2}, С.А. Григорьев^{1,2}, Н.В. Кулешов², Д.Г. Бессарабов³

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

³HySA Infrastructure Center of Competence, North-West University, Private Bag X6001, Potchefstroom, 2531, South Africa

ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ВОДЫ С ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ

АННОТАЦИЯ

В представленной работе проведено исследование активности и стабильности катализатора $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$, полученного полиольным методом, в реакции выделения кислорода в сравнении с коммерческим аналогом IrO_x . Проведены электрохимические исследования, включающие ускоренное стресс-тестирование. Показано, что синтезированный катализатор $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ превосходит коммерческий IrO_x по своей активности и стабильности, а полученные результаты позволили рассмотреть возможные механизмы деградации указанных катализаторов. Результаты тестирования мембранно-электродных блоков электролизера воды с ТПЭ позволили установить, что применение катализатора $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ позволяет существенно сократить содержание благородного металла на аноде электролизера.

1. ВВЕДЕНИЕ

Водородная энергетика является одним из основных направлений развития устойчивых экологически чистых энергетических систем в мире, а производство водорода - одним из ключевых элементов водородной энергетики (экономики). В настоящее время большая часть водорода получается в результате паровой конверсии природного газа, углеводородов и спиртов [1] и, в меньшей степени, как побочный продукт от процесса хлорно-щелочного электролиза. В последние годы большое внимание уделяется электролизу воды, поскольку он позволяет относительно быстро, удобно и без существенного урона для окружающей среды производить чистый водород, потребляя лишь воду и электричество.

Электролиз воды с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) предлагает устойчивое и эффективное решение для производства водорода, которое может сочетаться с возобновляемыми источниками энергии (например, ветровой и солнечной), имеющими периодический характер действия [2,3]. Его ключевыми преимуществами по сравнению с другими видами электролизеров является широкий диапазон рабочих плотностей тока (1–2 А см⁻² при термодинамическом КПД 60-80%), а также быстрое время отклика при смене нагрузки. Кроме того, нет необходимости в

использовании концентрированных электролитов, а рабочие температуры не превышают 90°C [2].

Высокая скорость протекания электрохимических реакции выделения водорода и кислорода в кислой среде может быть обеспечена только при использовании катализаторов на основе металлов платиновой группы: Pt, Ru или Ir. В силу высокого анодного потенциала и особенностей механизма реакции выделения кислорода на Ir (IrO_x) [4] стабильность анодных катализаторов не достаточно высока, поэтому для обеспечения достаточного ресурса электролизера с ТПЭ возникает необходимость в нанесении анодного катализатора на поверхность электрода с многократным запасом, что существенно увеличивает удельный расход благородных металлов. Кроме того, напряжение процесса электролиза в значительной степени зависит от перенапряжения анодной реакции выделения кислорода, поэтому актуальной задачей является разработка электрокатализаторов, обладающих высокой активностью и стабильностью, содержащих в своем составе существенно сниженное количество благородных металлов.

Одним из перспективных путей снижения содержания и, одновременно, повышения степени использования благородного металла является использование носителей, например оксидов или карбидов различных металлов [5,6]. Субоксиды титана $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ являются многообещающими материалами на роль носителя электрокатализатора реакции выделения кислорода, которые обладают высокой электронной проводимостью [7] и высокой коррозионной стойкостью в кислых средах [8]. Указанные проводящие оксиды уже зарекомендовали себя в качестве перспективных носителей наночастиц Pt [9], Pt-Ir [10] и Ir [11] для водород-воздушных и обратимых топливных элементов, а также анода электролизера воды с ТПЭ, соответственно. Однако, стабильность катализаторов выделения кислорода на их основе все еще требует прояснения, поскольку нестехиометрические оксиды титана могут окисляться до непроводящего TiO_2 .

В представленной работе проведено исследование активности и стабильности катализатора $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$,

полученного полиольным методом, в реакции выделения кислорода в сравнении с коммерческим аналогом IrO_x . Для исследования стабильности катализаторов была использована методика ускоренного стресс-тестирования в жидком электролите, которая также позволила проанализировать возможные механизмы деградации IrO_x и $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$, а также оценить роль носителя. Кроме того, синтезированный катализатор $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ был исследован в качестве анодного катализатора в составе мембранно-электродного блока электролизера воды с ТПЭ.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Электрокатализатор IrO_x был получен от поставщика (ТКК, Япония) и использовался без дополнительной обработки. Синтез электрокатализатора $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ осуществлялся полиольным методом в среде этиленгликоля (ЭГ). $\text{H}_2\text{IrCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ использовалась в качестве прекурсора Ir, а этиленгликоль – в качестве восстановителя. Синтез катализатора протекал в две стадии: сначала прекурсор адсорбировался на поверхности носителя (при 75°C), а затем происходило восстановление наночастиц Ir (при 100°C).

Для приготовления каталитического слоя на поверхности рабочего электрода, вначале, готовились каталитические «чернила», 5 мкл которых наносились на предварительно подготовленную поверхность рабочего золотого дискового электрода (Pine instruments, США) с плотностью нанесения 51 мкг cm^{-2} . Затем каталитический слой фиксировался на поверхности рабочего электрода с помощью 5 мкл 0.05% раствора Nafion® (Ion Power, США).

Электрохимические измерения проводились в деаэрированном 0.1M растворе HClO_4 при 30°C в стеклянной трехэлектродной ячейке, снабженной противозаворотом из Pt проволоки, и хлоросеребряным электродом сравнения $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}$ (насыщ.) (ХСЭ), который присоединяется к электрохимической ячейке с помощью капилляра Луггина (ниже все потенциалы приводятся отн. стандартного водородного электрода (СВЭ)). Для вращения рабочего электрода использовали ротатор MSR (Pine Instruments), а поляризацию электрода осуществляли с помощью потенциостата SP-150 (BioLogic, США). Все значения потенциала ниже даны отн. СВЭ. Омическое сопротивление раствора между рабочим электродом и электродом сравнения перед измерениями определялось с помощью встроенной процедуры ПО (EC-lab, Biologic, США) при потенциале 1.35 В.

Приработка рабочего электрода осуществлялась путем циклирования потенциала в диапазоне 1.2 – 1.6 В при скорости развертки 100 мВ с^{-1} в течение 8–10 циклов. Поляризационные кривые записывались в диапазоне потенциалов 1.2 – 1.6 В при скорости развертки 5 мВ с^{-1} и скорости вращения 2500 об мин^{-1} . Активность катализаторов определялась как значение плотности тока при потенциале 1.48 В, взятое из по-

ляризационных кривых, скорректированных на величину омических потерь [12]. Площадь электрохимически активной поверхности (ЭАП) катализаторов определялась величиной заряда, полученного из циклической вольтамперной характеристики, измеренной при 100 мВ с^{-1} в диапазоне потенциалов 0.4–1.3 В. Ускоренное стресс-тестирование (УСТ) [13] катализаторов проводилось путем циклирования потенциала при скорости вращения рабочего электрода 2500 об мин^{-1} в деаэрированном 0.1M растворе HClO_4 в диапазоне потенциалов 1.4–1.6 В со скоростью развертки потенциала 500 мВ с^{-1} .

Для исследования поляризационных характеристик электролизера с ТПЭ формировались мембранно-электродные блоки (МЭБ) имеющие круглую форму с рабочей поверхностью 7 см^2 , в которых в качестве ТПЭ использовалась мембрана Nafion® 117 (Chemours Company, США). В качестве анодного и катодного газодиффузионных электродов (ГДЭ) использовали диски из пористого титана (BT-1-0 [14]) с анодными и катодными электрокаталитическими слоями, нанесенными методом распыления водно-спиртовой суспензии катализатора в потоке воздуха [15]. В качестве анодного катализатора использовался IrO_x (с плотностью нанесения 1 и 2 мг см^{-2}) либо $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ (3 мг см^{-2}), а в качестве катодного – Pt/Vulcan XC-72 (с плотностью нанесения $0.8 \text{ мгPt} \cdot \text{см}^{-2}$). Анод, катод и мембрана, разделяющая их, зажимались в титановой лабораторной ячейке, состоящей из двух термостатируемых полужеек [16].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–2 приведены ЦВА электрокатализаторов IrO_x и $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$, измеренные в деаэрированном 0.1M растворе HClO_4 .

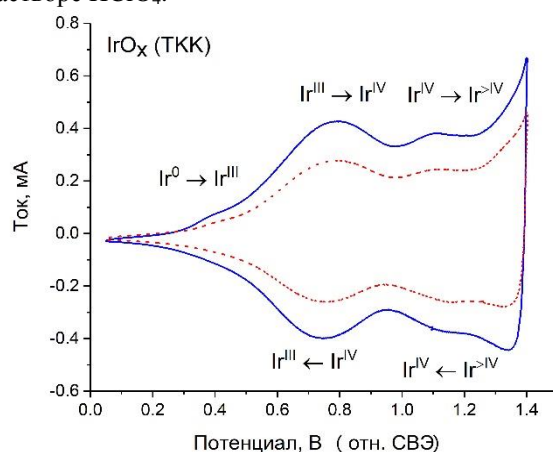


Рис. 1. ЦВА катализатора IrO_x (ТКК), полученные в деаэрированном 0.1M растворе HClO_4 при 30°C до (сплошная линия) и после (штриховая линия) проведения УСТ.

Форма ЦВА всех электрокатализаторов характеризуется несколькими пологими пиками преимущественно при потенциалах $>0.4 \text{ В}$, которые соответствуют окислительно-восстановительным переходам, связанным с адсорбцией и окислением кислородосо-

держающих частиц из раствора [17,18] в соответствии с уравнением:



где Me – Ir или Ru.

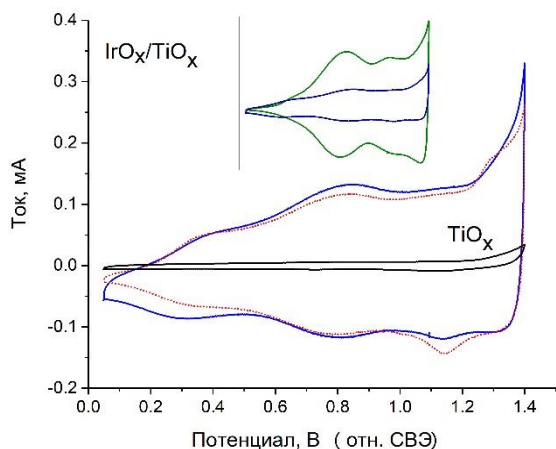


Рис. 2. ЦВА катализатора IrO_x/TiO_x, полученные в деаэрированном 0.1M растворе HClO₄ при 30 °C до (сплошная линия) и после (штриховая линия) проведения УСТ. На врезке – сравнительные ЦВА катализаторов и IrO_x (ТКК) и IrO_x/TiO_x.

ЦВА рассмотренных электрокатализаторов на основе Ir характеризуется двумя основными волнами (рис. 1–2), приблизительно, при 0.8–0.95 В и 1.0–1.2 В, относящиеся к переходам Ir^(III)/Ir^(IV) и Ir^(IV)/Ir^(>IV) соответственно [19–22]. Согласно результатам работы [23] поверхность катализатора IrO_x (ТКК) соответствует квазиаморфным гидратированным оксидам Ir^(III)/Ir^(IV), что подтверждается также исследованиями методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. При этом, небольшая волна, наблюдаемая у ЦВА IrO_x и IrO_x/TiO_x при ~0.4 В (рис. 1–2) может свидетельствовать об окислении некоторого количества металлического Ir⁽⁰⁾ до Ir^(III) [20]. Согласно литературным данным [24,25], окислительно-восстановительный процесс, наблюдаемый как у IrO_x, так и у IrO_x/TiO_x, при 0.6–0.9 В соответствует превращению Ir(OH)₃ в IrO(OH)₂ и говорит об аналогичной аморфной природе частиц IrO_x на поверхности субоксидов титана в случае электрокатализатора IrO_x/TiO_x. Окислительно-восстановительный переход с образованием Ir в высших степенях окисления выражен сравнительно слабо. Можно предположить, что указанный процесс сдвинут в сторону более высоких потенциалов, где перекрывается с реакцией выделения кислорода, начинающейся при значении потенциала ок. 1.4 В (рис. 2) [20]. На рис. 1 токи в области адсорбции/десорбции водорода (<0.4 В) чрезвычайно малы, что можно объяснить молекулами воды, интеркалированными внутрь оксида и препятствующими переносу электронов в структуре оксида [26]. Указанный эффект существенно менее выражен в случае катализатора на электропроводном носителе, что также наблюдалось в работе [27].

Также на рис. 2 приведена ЦВА носителя TiO_x, которая свидетельствует о том, что весь перенос заряда, наблюдаемый на ЦВА катализатора IrO_x/TiO_x относится к частицам IrO_x на поверхности носителя. Ис-

ходные величины удельной активной поверхности и активности катализаторов IrO_x и IrO_x/TiO_x приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры катализаторов

Образец	Удельная активность при 1.48 В отн. СВЭ		Удельная активная пов-ть, Кл г ⁻¹ Ir	Тафельский наклон, мВ дек. ⁻¹
	А г ⁻¹ Ir	А Кл ⁻¹		
IrO _x	357±60	1.34±0.16	268±45	42.4–44.7
IrO _x /TiO _x	809±101	1.94±0.30	419±21	39.2–40.9

Массовая активность IrO_x хорошо согласуется с литературными данными [28], хотя сравнение массовой активности катализаторов сильно затруднено ввиду отсутствия стандартных методик, используемых всеми исследователями, и различий в условиях проведения экспериментов. Существенно более высокая активность IrO_x/TiO_x, предположительно, обеспечивается за счет морфологических факторов (равномерное распределение частиц на поверхности носителя, малый размер частиц, высокая удельная поверхность), структурных факторов (влияние носителя на электронную структуру IrO_x) и высокой электропроводности носителя. Полученные значения массовой активности для катализатора IrO_x/TiO_x хорошо согласуются с ранее проведенными предварительными исследованиями [12].

Тафельские наклоны, характеризующие IrO_x и IrO_x/TiO_x, близки между собой и к значениям, характерным для квазиаморфных гидратированных оксидов Ir, полученных различными методами [22,23,29,30], выделение кислорода на которых происходит согласно механизму, связанному с участием активированных атомов кислорода кристаллической решетки IrO_x [31].

На рис. 1–2 приведены также ЦВА катализаторов IrO_x и IrO_x/TiO_x после проведения УСТ, которое заключалось в многократном наложении треугольных импульсов в диапазоне потенциалов выделения кислорода 1.4–1.6 В отн. СВЭ со скоростью развертки 500 мВ с⁻¹. Видно, что в случае IrO_x профиль ЦВА не претерпел существенных изменений, хотя величина активной поверхности заметно снизилась. Профиль ЦВА IrO_x/TiO_x в результате УСТ несколько изменился в области высоких значений потенциала, что может свидетельствовать об увеличении доли атомов Ir в высших степенях окисления (IrO₂(OH), IrO₃), которые характеризуются низкой стабильностью [32]. Необходимо отметить, что для катализаторов на основе смешанных оксидов Ir и Ti [18] при содержании Ir до 20 мас. % может наблюдаться сдвиг максимума Ir^(III)/Ir^(IV) в область более высоких значений потенциала, что связано со снижением электропроводности активного слоя. Отсутствие заметного сдвига максимума Ir^(III)/Ir^(IV) на ЦВА IrO_x/TiO_x по сравнению с IrO_x в данной работе даже после проведения УСТ говорит о достаточно высокой электропроводности активного слоя катализатора IrO_x/TiO_x, которая сохраняется в течение УСТ. С другой стороны, снижение токов в области адсорбции/десорбции водорода после УСТ может говорить о некотором замедлении переноса заряда в приповерхностном слое IrO_x/TiO_x.

Результаты изменения удельной активной поверхности и активности электрокатализаторов в результате УСТ приведены на рис. 3-5.

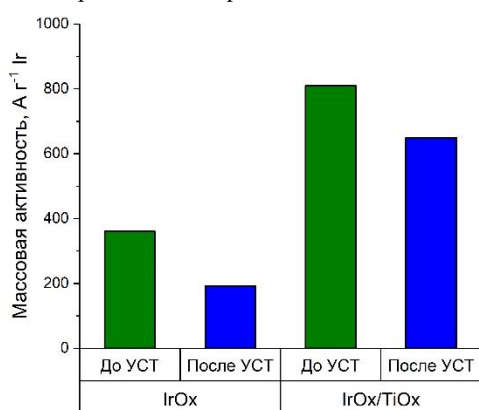


Рис. 3. Массовая активность катализаторов IrO_x и IrO_x/TiO_x, до и после проведения УСТ.

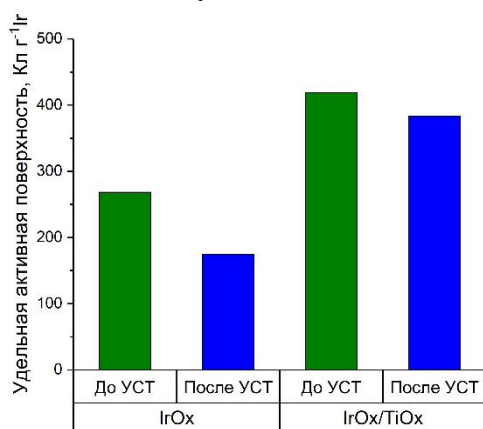


Рис. 4. Удельная активная поверхность катализаторов IrO_x и IrO_x/TiO_x до и после проведения.

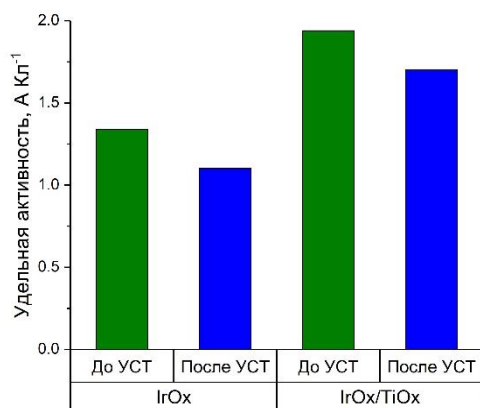


Рис. 5. Удельная активность катализаторов IrO_x и IrO_x/TiO_x, до и после проведения УСТ.

Анализ результатов, представленных на рис. 3–5, показывает, что по результатам УСТ оба катализатора продемонстрировали снижение активной поверхности, а также удельной активности, нормированной как на величину активной поверхности, так и на исходную массу Ir. Массовая активность IrO_x и IrO_x/TiO_x снизилась на 47 и 20 % до 191.4 и 649 A g⁻¹ Ir, соответственно, что хорошо соотносится с литературными данными [30–34], согласно которым квазиморфные оксиды Ir с сильно гидратированной поверхностью и металлический Ir характеризуются низкой стабильно-

стью в условиях протекания реакции выделения кислорода в кислой среде. Это главным образом обусловлено механизмом протекания реакции выделения кислорода [4], при котором «решеточные атомы» кислорода, обеспечивающие стабильность структуры IrO₂, вовлекаются в реакцию и провоцируют растворение соответствующих атомов Ir. В пользу того, что именно растворение Ir, протекающее в рамках вышеописанного механизма либо в силу образования нестабильных высших оксидов Ir, вносит основной вклад в деградацию IrO_x указывает и существенное снижение его активной поверхности – до 65% от исходной. С другой стороны, согласно результатам работ [13,35], при проведении УСТ путем циклирования потенциала в диапазоне 1.4–1.6 В отн. СВЭ существенного растворения Ir не происходит, а снижение активности катализаторов на основе Ir происходит в силу изменения морфологии и структуры активных частиц (рост оксидной пленки, агрегация металлических наночастиц). Принимая во внимание умеренное снижение удельной активности IrO_x/TiO_x (как на единицу массы, так и на единицу активной поверхности), а также незначительное снижение активной поверхности можно предположить, что, сильное электронное взаимодействие между частицами IrO_x и поверхностью носителя обеспечивает более высокую стабильность электрокатализатора на носителе [6].

На рис. 6 представлены поляризационные кривые МЭБ, содержащих аноды с различными катализаторами и разным содержанием Ir, измеренные в электролизной ячейке с ТПЭ.

Анализ приведенных результатов показывает, что напряжение ячейки при плотности тока 1 A см⁻² составило 1.75 и 1.91 В для МЭБ с IrO_x в качестве анодного электрокатализатора (при загрузке 2 и 1 мг Ir см⁻², соответственно), в то время как для МЭБ с IrO_x/TiO_x (при загрузке 0.9 мг Ir см⁻²) напряжение составило 1.81 В. Из рис. 6 видно, что использование катализатора на носителе позволило снизить напряжение электролизера воды с ТПЭ на ~100 мВ при загрузке благородного металла на аноде 0.9-1 мг см⁻². Однако, напряжение МЭБ с IrO_x/TiO_x несколько выше напряжения МЭБ с оптимальным с точки зрения производительности содержанием Ir [36]. Т.о. с учетом конструкции МЭБ применение IrO_x/TiO_x позволяет до 1.5 – 2.0 раз снизить загрузку благородного металла на аноде электролизера с ТПЭ.

Необходимо отметить, что загрузка электрокатализатора IrO_x/TiO_x в силу весьма низкого удельного содержания Ir оказалась достаточно велика – 3 мг см⁻², что привело, по-видимому, к дополнительным потерям, связанным с неоптимальными условиями противоположно направленными переноса воды и кислорода в каталитическом слое. Ограничение доступа воды и экранирование активных центров электрокатализатора образующимися пузырями газа также может приводить к изменению влагосодержания твердого полимерного электролита и дополнительным поляризационным потерям в каталитическом слое [37]. Поэтому необходимы дальнейшие исследования с целью оптимизации структуры и морфологии анодного каталитического слоя на основе IrO_x/TiO_x, включая оптимизацию толщины слоя, содержания благородного металла

(с его увеличением снижается толщина слоя), содержания иономера, пористости и др.

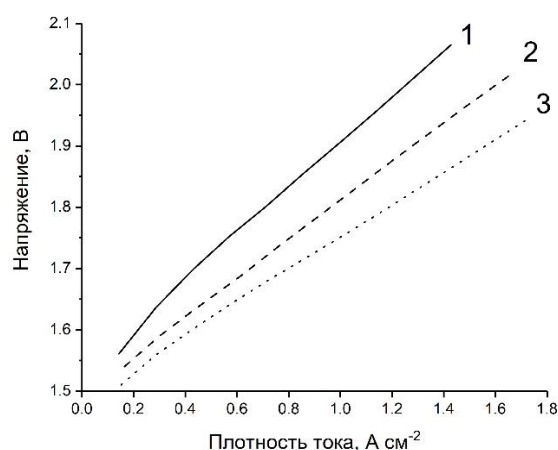


Рис. 6. Поляризационные кривые МЭБ с различными анодными катализаторами: (1) IrO_x , 1 мг Ir cm^{-2} ; (2) $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$, 0.9 мг Ir cm^{-2} ; IrO_x , 2 мг Ir cm^{-2} . Температура — 80°C.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе проведено исследование активности и стабильности катализатора на основе Ir и проводящих субоксидов титана $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$, полученного полиольным методом, в реакции выделения кислорода. С помощью электрохимических исследований и применения методики ускоренного стресс-тестирования показано, что синтезированный катализатор $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ существенно превосходит коммерческий аналог IrO_x по своей активности и стабильности. Кроме того, проанализированы механизмы деградации исследованных катализаторов и показано, что несмотря на сходство структуры IrO_x в обоих случаях, применение TiO_x обеспечивает высокую стабильность активных частиц IrO_x за счет их сильного взаимодействия с носителем. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования, направленные на прояснение роли носителя в механизме реакции выделения кислорода и деградации IrO_x . Применение $\text{IrO}_x/\text{TiO}_x$ в качестве анодного катализатора в составе МЭБ электролизера воды с ТПЭ позволило до 1.5-2 раз снизить загрузку благородного металла.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для обучения за рубежом в 2017-2018 учебном году (в Центре Водородной Инфраструктуры, Северо-Западный Университет, ЮАР) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-58-26022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdalla A.M., Hossain S., Nisfindy O.B., Azad A.T., Dawood M. and Azad A.K. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review *Energy Convers // Manag.* 2018. Vol. 165. P. 602–627.
2. Carmo M., Fritz D.L., Mergel J. and Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2013. Vol. 38. P. 4901–4934.
3. Grigoriev S.A., Fateev V.N., Bessarabov D.G. and Millet P. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2020. In press.
4. Kasian O., Geiger S., Li T., Grote J.-P., Schweinar K., Zhang S., Scheu C., Raabe D., Cherevko S., Gault B. and Mayrhofer K.J.J. Degradation of iridium oxides via oxygen evolution from the lattice: correlating atomic scale structure with reaction mechanisms // *Energy Environ. Sci.* 2019. Vol. 12. P. 3548–3555.
5. Karimi F. and Peppley B.A. Metal Carbide and Oxide Supports for Iridium-Based Oxygen Evolution Reaction Electrocatalysts for Polymer-Electrolyte-Membrane Water Electrolysis // *Electrochim. Acta.* 2017. Vol. 246. P. 654–670.
6. Oaktouk E., Lebedev D., Povia M., Abbott D.F., Fabbri E., Fedorov A., Nachttegaal M., Copéret C. and Schmidt T.J. IrO_2 - TiO_2 : A High-Surface-Area, Active, and Stable Electrocatalyst for the Oxygen Evolution Reaction // *ACS Catal.* 2017. Vol. 7. P. 2346–2352.
7. Arif A.F., Balgis R., Ogi T., Iskandar F., Kinoshita A., Nakamura K. and Okuyama K. Highly conductive nano-sized Magnéli phases titanium oxide (TiO_x) // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 3646.
8. Muntean R., Pascal D.T., Rost U., Holtkotte L., Näther J., Köster F., Underberg M., Hülser T. and Brodmann M. Investigation of Iridium Nanoparticles Supported on Substoichiometric Titanium Oxides as Anodic Electrocatalysts in PEM Electrolysis. Part I: Synthesis and Characterization // *Top. Catal.* 2019. Vol. 62. P. 429–438.
9. Yao C., Li F., Li X. and Xia D. Fiber-like nanostructured Ti_4O_7 used as durable fuel cell catalyst support in oxygen reduction catalysis // *J. Mater. Chem.* 2012. Vol. 22. P. 16560–16565.
10. Won J.-E., Kwak D.-H., Han S.-B., Park H.-S., Park J.-Y., Ma K.-B., Kim D.-H. and Park K.-W. PtIr/ Ti_4O_7 as a bifunctional electrocatalyst for improved oxygen reduction and oxygen evolution reactions // *J. Catal.* 2018. Vol. 358. P. 287–294.
11. Lagarteira T., Han F., Morawietz T., Hiesgen R., Garcia Sanchez D., Mendes A., Gago A. and Costa R. Highly active screen-printed Ir Ti_4O_7 anodes for proton exchange membrane electrolyzers // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2018. Vol. 43. P. 16824–16833.
12. Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Du Preez S.P., Ivanova N.A., Grigoriev S.A., Slavcheva E.P., Bessarabov D.G., Fateev V.N. and Aliyev A.S. Iridium catalyst supported on conductive titanium oxides for polymer electrolyte membrane electrolysis // *Chemical Problems.* 2019. No 1 (17). P. 9–15.
13. Alia S.M., Rasimick B., Ngo C., Neyerlin K.C., Kocha S.S., Pylypenko S., Xu H. and Pivovar B.S. Activity and Durability of Iridium Nanoparticles in the Oxygen Evolution Reaction // *J. Electrochem. Soc.* 2016. Vol. 163. P. F3105–F3112.
14. Kalinnikov A.A., Ostrovskii S.V., Porembskii V.I., Pushkarev A.S. and Fateev V.N. Study of the Electrochemical Oxygen Pump Based on Solid Polymer Electrolyte // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. Vol. 91. 927–929.
15. Grigoriev S., Fateev V., Pushkarev A., Pushkareva I., Ivanova N., Kalinichenko V., Presnyakov M. and Wei X. Reduced Graphene Oxide and Its Modifications as Catalyst Supports and Catalyst Layer Modifiers for PEMFC // *Materials.* 2018. Vol. 11. P. 1405.
16. Grigoriev S.A., Pushkarev A.S., Pushkareva I.V., Millet P., Belov A.S., Novikov V.V., Belaya I.G. and Voloshin Y.Z. Hydrogen production by proton exchange membrane water electrolysis using cobalt and iron hexachloroethylenes as efficient hydrogen-evolving electrocatalysts // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 42. P. 27845–27850.
17. Rozain C., Mayousse E., Guillet N. and Millet P. Influence of iridium oxide loadings on the performance of PEM water

- electrolysis cells: Part I-Pure IrO₂-based anodes // *Appl. Catal. B Environ.* 2016. Vol. 182. P. 153–160.
18. **Bernsmeier D., Bernicke M., Schmack R., Sachse R., Paul B., Bergmann A., Strasser P., Ortel E. and Kraehnert R.** Oxygen Evolution Catalysts Based on Ir-Ti Mixed Oxides with Templated Mesopore Structure: Impact of Ir on Activity and Conductivity // *ChemSusChem.* 2018. Vol. 11. P. 2367–2374.
 19. **Minguzzi A., Locatelli C., Cappelletti G., Scavini M., Vertova A., Ghigna P. and Rondinini S.** IrO₂-based disperse-phase electrocatalysts: A complementary study by means of the cavity-microelectrode and ex-situ X-ray absorption spectroscopy // *J. Phys. Chem. A.* 2012. Vol. 116. P. 6497–6504.
 20. **Oh H.S., Nong H.N., Reier T., Gliech M. and Strasser P.** Oxide-supported Ir nanodendrites with high activity and durability for the oxygen evolution reaction in acid PEM water electrolyzers // *Chem. Sci.* 2015. Vol. 6. P. 3321–3328.
 21. **Ouattara L., Fierro S., Frey O., Koudelka M. and Comminellis C.** Electrochemical comparison of IrO₂ prepared by anodic oxidation of pure iridium and IrO₂ prepared by thermal decomposition of H₂IrCl₆ precursor solution // *J. Appl. Electrochem.* 2009. Vol. 39. P. 1361–1367.
 22. **Yu H., Danilovic N., Wang Y., Willis W., Poozhikunnath A., Bonville L., Capuano C., Ayers K. and Maric R.** Nano-size IrO_x catalyst of high activity and stability in PEM water electrolyzer with ultra-low iridium loading // *Appl. Catal. B Environ.* 2018. Vol. 239. P. 133–146.
 23. **Tan X., Shen J., Semagina N. and Secanell M.** Decoupling structure-sensitive deactivation mechanisms of Ir/IrO_x electrocatalysts toward oxygen evolution reaction // *J. Catal.* 2019. Vol. 371. P. 57–70.
 24. **Ooka H., Yamaguchi A., Takashima T., Hashimoto K. and Nakamura R.** Efficiency of Oxygen Evolution on Iridium Oxide Determined from the pH Dependence of Charge Accumulation // *J. Phys. Chem. C.* 2017. Vol. 121. P. 17873–17881.
 25. **Stegstra P. and Ahlberg E.** Influence of oxidation state on the pH dependence of hydrous iridium oxide films // *Electrochim. Acta.* 2012. Vol. 76. P. 26–33.
 26. **Barbieri O., Hahn M., Foelske A. and Kötz R.** Effect of Electronic Resistance and Water Content on the Performance of RuO₂ for Supercapacitors // *J. Electrochem. Soc.* 2006. Vol. 153. P. A2049–A2054.
 27. **Wang L., Lettenmeier P., Golla-Schindler U., Gazdzicki P., Cañas N.A., Morawietz T., Hiesgen R., Hosseiny S.S., Gago A.S. and Friedrich K.A.** Nanostructured Ir-supported on Ti₄O₇ as a cost-effective anode for proton exchange membrane (PEM) electrolyzers // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. Vol. 18. P. 4487–4495.
 28. **Alia S.M., Shulda S., Ngo C., Pylypenko S. and Pivovar B.S.** Iridium-Based Nanowires as Highly Active, Oxygen Evolution Reaction // *ACS Catal.* 2018. Vol. 8. P. 2111–2120.
 29. **Smith R.D.L., Sporinova B., Fagan R.D., Trudel S. and Berlinguette C.P.** Facile Photochemical Preparation of Amorphous Iridium Oxide Films for Water Oxidation Catalysis // *Chem. Mater.* 2014. Vol. 26. P. 1654–1659.
 30. **Abbott D.F., Lebedev D., Waltar K., Povia M., Nachtegaal M., Fabbri E., Copéret C. and Schmidt T.J.** Iridium Oxide for the Oxygen Evolution Reaction: Correlation between Particle Size, Morphology, and the Surface Hydroxo Layer from Operando XAS // *Chem. Mater.* 2016. Vol. 28. P. 6591–6604.
 31. **Geiger S., Kasian O., Ledendecker M., Pizzutilo E., Mingers A.M., Fu W.T., Diaz-Morales O., Li Z., Oellers T., Fruchter L., Ludwig A., Mayrhofer K.J.J., Koper M.T.M. and Cherevko S.** The stability number as a metric for electrocatalyst stability benchmarking // *Nat. Catal.* 2018. Vol. 1. P. 508–515.
 32. **Cherevko S., Geiger S., Kasian O., Mingers A. and Mayrhofer K.J.J.** Oxygen evolution activity and stability of iridium in acidic media. Part 2. – Electrochemically grown hydrous iridium oxide // *J. Electroanal. Chem.* 2016. Vol. 774. P. 102–110.
 33. **Cherevko S., Geiger S., Kasian O., Mingers A. and Mayrhofer K.J.J.** Oxygen evolution activity and stability of iridium in acidic media. Part 1. – Metallic iridium // *J. Electroanal. Chem.* 2016. Vol. 773. P. 69–78.
 34. **Jovanović P., Hodnik N., Ruiz-Zepeda F., Arčon I., Jožinović B., Zorko M., Bele M., Šala M., Šelih V.S., Hočevar S. and Gaberšček M.** Electrochemical Dissolution of Iridium and Iridium Oxide Particles in Acidic Media: Transmission Electron Microscopy, Electrochemical Flow Cell Coupled to Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, and X-ray Absorption Spectroscopy Study // *J. Am. Chem. Soc.* 2017. Vol. 139. P. 12837–12846.
 35. **Alia S.M., Ha M.-A., Anderson G.C., Ngo C., Pylypenko S. and Larsen R.E.** The Roles of Oxide Growth and Sub-Surface Facets in Oxygen Evolution Activity of Iridium and Its Impact on Electrolysis // *J. Electrochem. Soc.* 2019. Vol. 166. P. F1243–F1252.
 36. **Grigoriev S.A. and Kalinnikov A.A.** Mathematical modeling and experimental study of the performance of PEM water electrolysis cell with different loadings of platinum metals in electrocatalytic layers // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2017. Vol. 42. P. 1590–1597.
 37. **Ito H., Maeda T., Nakano A., Kato A. and Yoshida T.** Influence of pore structural properties of current collectors on the performance of proton exchange membrane electrolyzer // *Electrochim. Acta.* 2013. Vol. 100. P. 242–248.

А.А. Федотов^{1,2}, А.Б. Тарасенко², Д.А. Каранова^{1,2}

¹Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия, 111250 Москва, Красноказарменная 14

²Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия, 111116 Москва, Ижорская 13/19

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АНОДНОГО ГАЗОДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

АННОТАЦИЯ

Газодиффузионный слой (ГДС) играет важную роль в работе топливных элементов с протонообменной мембраной (ПОМТЭ). Обычно используются ГДС на трех возможных типах подложки на основе углеродных волокон: углеродная ткань, нетканый материал, углеродная бумага. Все три типа имеют разные свойства, такие как: газопроницаемость, механическая прочность, электрическое сопротивление, гидрофильность и цена. Бумага намного дешевле, чем нетканый материал, и замена даже одного электрода могла бы сделать топливный элемент более дешевым. Но замена имеет смысл только в том случае, если сохраняется та же эффективность. В этой работе сравнивались два типа ГДС в качестве анода в ПОМТЭ. В результате сравнения были получены вольтамперные и мощностные характеристики.

1. ВВЕДЕНИЕ

Топливные элементы с протонообменной мембраной (ПОМТЭ) имеют потенциал для решения задач энергетики будущего. Ключевым элементом в этих устройствах является газодиффузионный слой (ГДС). ГДС имеет несколько характерных функций: обеспечение проницаемости реагентов к активным участкам катализатора, удаление образовавшейся воды в ходе реакции, обеспечение электронной проводимости. Основные структурные различия в разных типах ГДС описаны в литературе [1,2]. Из-за разной структуры ГДС, во время работы топливного элемента различные структуры ГДС так же ведут себя по-разному. Изучение поведения того или иного ГДС во время работы является сложной задачей, поскольку на работу влияют большое количество внешних факторов [3,4].

Обычно ГДС состоит из подложки на основе карбонизированного и тефлонированного волокна. На одну из сторон ГДС наносится микропористый слой, он улучшает отвод продуктов реакции и снижает контактные сопротивления. Наиболее распространенные структуры ГДС: тканые углеродные материалы, нетканые углеродные материалы, а так же углеродный картон. В [5,6] показано, что тканые и нетканые углеродные ГДС имеют более высокие удельные характеристики, чем другие структуры, и наиболее эффективны при высокой влажности [7]. В то же время углеродный картон намного дешевле, чем другие структуры, а так же более жесткий, что в свою очередь облегчает проектирование полей течения в биполярных пластинах.

В этой работе представлено сравнение мембранно-электродных блоков с различной структурой ГДС, а именно сравнение углеродного нетканого материала и углеродного картона в качестве анода.

2. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для испытания различных типов ГДС была сконструирована и сделана измерительная ячейка. В качестве источника водорода служил лабораторный коммерческий электролизер ГВЧ 12 фирмы «Химэлектроника». Увлажнение образцов достигалось путем пропускания катодного газа через воду.

Площадь активной зоны изготовленных МЭБов составляет 5 см². Использовались графитовые биполярные пластины с прямыми каналами полей течения по катоду и по аноду, при этом потоки газов направлены навстречу друг другу.

Параметры катода для газодиффузионного слоя были постоянны во всех измерениях. Загрузка катализатора составляла 0.2 мг/см² с катодной стороны. Каталитические чернила на основе катализатора JM NuSPEC 13100 Pt/C были нанесены вручную на ГДС методом аэрографии, на аноде загрузка катализатора составила 0.1 ± 0.05 мг/см². В качестве твердополимерного протонопроводящего электролита использовалась мембрана МФ4-СК. При сборке мембранно-электродного блока проводилось горячее прессование при температуре 140°C и усилии на прессовании 750 кг. Все катодные и анодные электроды имели микропористый слой на одной из сторон. В этой работе представлены следующие анодные материалы:

- Freudenberg H24C5 (Углеродный нетканый материал)
- Toray HCP030N (Углеродная бумага)

Параметры и характеристики исследуемых газодиффузионных электродов приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов [8]

Структура	Freudenberg H24C5	Toray HCP030N
Толщина	0.27 мм	0.3 мм
Удельное сопротивление	9 МОм*см ²	3 МОм*см ²
Стоимость	0.085 \$/см ²	0.078 \$/см ²
Наличие микропористого слоя	Да	Нет

После изготовления мембранно-электродного блока его необходимо активировать, активация проводилась в соответствии с рекомендациями международной электрохимической комиссии [10].

Испытания образцов проводились при одинаковых условиях:

- Расход водорода: 12 литров в минуту
- Расход воздуха: 30 литров в минуту
- Давление подачи реагентов: 1 бар
- Температура испытательной ячейки: 50°C
- Скорость регистрации данных: 1 секунда

После процедуры активации мембранно-электродного блока были сняты три вольтамперные характеристики для подтверждения совпадения результатов, при совпадении трех вольтамперных характеристик, четвертая шла в протокол испытаний.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты сравнения двух структур были проанализированы. Важно отметить, что результаты, обсуждаемые в этой статье, основаны на тестировании при определенных условиях эксплуатации, которые представлены выше. Поведение испытываемых образцов может резко меняться в зависимости от условий эксплуатации.

Структура материала газодиффузионного слоя во много определяет характеристики топливного элемента. Изменение эффективности работы мембранно-электродного блока с разными структурами ГДС не может быть объяснено исключительно изменением структуры, но исследования такого рода необходимы для понимания природы изменения других свойств топливного элемента.

Из таблицы 1 видно, что ГДС на основе нетканого материала немного тоньше образца на основе углеродной бумаге, хоть и имеет микропористый слой. В то же время удельное электрическое сопротивление исследуемого объекта на основе углеродной бумаги в три раза ниже, чем у другого образца. На рисунке 1 видно, что при равных активационных и диффузионных потерях, резистивные потери у образца на основе углеродной бумаги ниже. Несмотря на все это, производители топливных элементов предпочитают работать с ГДС на основе нетканых материалов, самыми известными производителями таких типов ГДС являются Freudenberg и Sigracet, нетканый материал является более дорогим из-за более сложной технологии производства. Следует отметить, что анодная реакция топливного элемента более простая, чем катодная, поэтому в этой статье рассматривается замена газодиффузионного слоя именно на аноде.

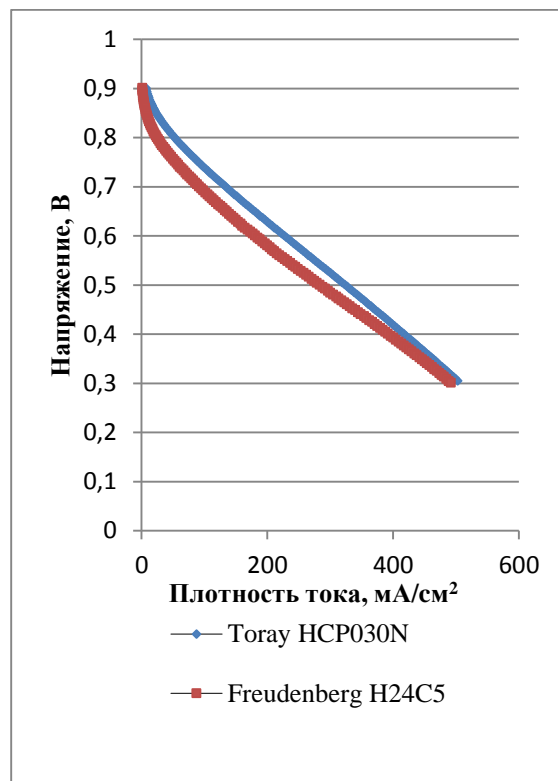


Рис.1. Вольтамперные характеристики испытываемых образцов

Образец на основе Toray HCP030N в точке максимальной мощности имел 167 мВт/см², в то же время мембранно-электродный блок с Freudenberg H24C5 – 157 мВт/см². Мощностные характеристики исследуемых образцов представлены на рисунке 2.

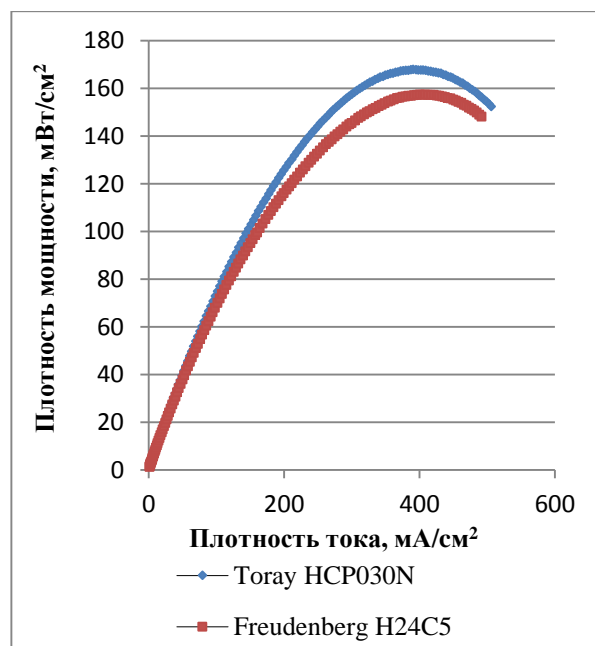


Рис.2. Мощностные характеристики испытываемых образцов

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбранные образцы коммерческих газодиффузионных слоев были испытаны в качестве анода твердполимерного топливного элемента. Главными критериями оценки работы мембранно-электродного блока, в составе которого находится газодиффузионный слой – максимальное значение плотности мощности в пике, а так же величина потерь на участках вольтамперной характеристики. Исследование показало, что образцы имеют примерно одинаковые активационные и диффузионные потери, но омические потери у образца на основе углеродной бумаги меньше. В то же время образец на основе нетканого материала является более дорогим, и использование в качестве анода топливного элемента ГДС на основе углеродной бумаги – может удешевить финальное изделие. Необходимо понимать, что испытания представленные в этой статье приводились при оптимальных условиях эксплуатации, реальные условия эксплуатации могут существенно отличаться от представленных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **El - kharouf A., Pollet B.G.** Polymer Electrolyte Fuel Cell Degradation // Academic Press, Boston, USA 2012. P. 215 - 247
2. **Escribanom J.F., Blachot J. Etheve., Morin A. and Mosdale R.** Characterization of PEMFCs gas diffusion layers properties // Journal of Power Sources, 2006, N 156. P. 8 – 13.
3. **El - kharouf A., Pollet B.G., Mason T.J. and Brett J.L.** Ex –situ characterization of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells // Journal of Power Sources, 2012, N 218. P. 393 – 404.
4. **Williams M.V., Begg E., Bonville L., Kunz H.R. and Fenton J.M.** Characterization of Gas Diffusion Layers for PEMFC // Journal of the Electrochemical Society, 2004, N 151. P. 358 – 367.
5. **Litster S., McLean G.** PEM fuel cell electrodes // Journal of Power Sources, 2004, N 130. P. 61-76.
6. **Lim C., Wang C.Y.** Electrochemical Acta, 2004, N 49. P. 4149 – 4156.
7. **Wang Y., Wang C.** Electrochemical Acta, 2007, N 452. P. 3965 – 3975.
8. **Alexandra Pinto M.F.R., Vânia Oliveira B. and Daniela Falcão S.** Development of direct alcohol fuel cells components // Fundamentals, Engineering and Advances, 2018. P. 209 – 244.
9. **ГОСТ IEC/TS 62282-7-1-2016.** Приложение D.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 5

*Диагностика, мониторинг, информа-
ционно-аналитические системы в
энергосбережении*

Ю.И. Солуянов^{1,3}, А.И. Фдотов^{1,2}, А.Р. Ахметшин^{1,2}, В.А. Халтурин^{1,3}

¹Ассоциация «Росэлектромонтаж», Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

³АО «Татэлектромонтаж», Казань, Россия

МОНИТОРИНГ И АКТУАЛИЗАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

АННОТАЦИЯ

Проектные организации для расчета мощности, потребляемой жилыми и общественными зданиями, используют нормативные удельные значения нагрузок. Практика эксплуатации систем электроснабжения показала, что в большинстве случаев реальные нагрузки меньше расчетных в 1,5 – 2,5 раза.

Построенные кабельные сети и трансформаторные подстанции 0,4/10 кВ по факту оказываются недогруженными. Ассоциация «Росэлектромонтаж» провела исследования загрузки ТП 0,4/10кВ нескольких городов Российской Федерации, по результатам которых определено, что порядка 80% ТП работают с максимальной загрузкой в течение года менее 30%.

Для решения сложившейся ситуации предлагается проводить мониторинг электрических нагрузок с последующей актуализацией нормативных документов в части расчетных удельных электрических нагрузок, что позволит приблизить расчетные значения к фактическим для повышения экономической эффективности при строительстве и эксплуатации электросетевого комплекса. Мониторинг электрических нагрузок предлагается проводить в течение 5 лет, соответственно с периодичностью в 5 лет пересматривать расчетные значения удельных электрических нагрузок.

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет электрической нагрузки – основа проектирования системы электроснабжения любого объекта капитального строительства. От величины электрической нагрузки зависит структура системы, мощность и, соответственно, стоимость закладываемого электрооборудования [11-15,19]. Стоимость технологического подключения к действующим электрическим сетям определяется, главным образом, значением мощности, которую потребитель просит в своей заявке.

В настоящее время для расчета нагрузок жилых и общественных зданий используют нормативно-технические документы СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» [4] и РД 34.20.185-94 «Инструкция по проектированию городских электрических сетей» [5]. Как показали оценочные расчеты специалистов Ассоциации «Росэлектромонтаж» (далее Ассоциация), нормативы, указанные в

нормативно-технических документах [4,5], существенно завышены по сравнению с реальными значениями.

Из отчёта о функционировании АО «СО ЕЭС» в 2019 году следует, что установленная мощность электростанций Российской Федерации составляет 245,4 ГВт, а нагрузки электростанций на годовой максимум потребления мощности – 153,5 ГВт, т.е. 91,9 ГВт не использовалось [7]. На объекты жилья и социального, культурного и бытового назначения приходится 20%, в том числе на домохозяйства 14,7% [19] от потребляемой мощности. Из этого следует, что из 91,9 ГВт неиспользуемой мощности (“запертой”) – 18,4 ГВт приходится на объекты жилья и соцкультбыта.

С 2012 г. по 2016 г. в стране ежегодный темп прироста конечного потребления электроэнергии составил 0,3% [18]. Однако, введенные в те же годы мощности сетевой инфраструктуры способны покрыть нагрузку потребителей на 86 ГВт. Фактическая неиспользуемая мощность (“запертая”) при этом составила более 85-88% [18], что составляет 73,1-75,68 ГВт.

2. МОНИТОРИНГ И АКТУАЛИЗАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Существенная разница между фактической и расчетной электрической нагрузкой подтверждается в [11,12], что в очередной раз доказывает актуальность пересмотра нормативных значений в части расчетных удельных электрических нагрузок. Такая разница связана с тем, что значения удельных электрических нагрузок в нормативных документах не пересматривались с прошлого века. Мониторинг электрической нагрузки с последующей актуализацией нормативных документов позволит приблизить расчетные значения к фактическим, а, следовательно, сократить затраты на строительство и эксплуатацию электрических сетей. Появление нормативных документов было связано с программой жилищного строительства. Начиная с 1960 года, ежегодно увеличивалось количество введенного кв.м. жилья. И уже в 1988 г. ввод жилья в СССР составил порядка 125 млн. кв.м [10]. В табл. 1 представлена история развития нормативных документов.

Таблица 1. История развития нормативных документов

СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»	Срок действия: 02.03.2017 по настоящее время
СП 31-110-2003 Проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий	Срок действия: 01.01.2004-02.03.2017
ВСН 59-88 Госкомархитектуры Электрооборудование жилых и общественных зданий. Нормы проектирования	Срок действия: 01.07.1989-01.01.2004
СН 543-82 "Инструкция по проектированию электрооборудования жилых и общественных зданий массового строительства"	Срок действия: 01.07.1982-01.07.1989
ВСН 19-74 "Инструкция по проектированию электрооборудования общественных зданий массового строительства"	Срок действия: 01.04.1975-01.07.1982
СН 544-82 "Инструкция по проектированию электрооборудования жилых зданий".	Срок действия: 01.07.1982-01.07.1989
СН 297-64 Указания по проектированию электрооборудования жилых зданий	Срок действия: 01.07.1965-01.07.1982

Из табл. 1 видно, что периодичность пересмотра нормативных документов составляла 8-10 лет. В современных условиях, когда электрические приборы с каждым годом становятся более энергоэффективными, актуализацию нормативных документов в части расчетных удельных электрических нагрузок необходимо проводить с периодичностью в 5 лет, эта необходимость вызвана снижением затрат при строительстве и эксплуатации электрических сетей. Чем меньше разница между расчетной и фактической нагрузкой, тем больший экономический эффект будет получен. Достоверность полученных значений предлагается обосновать 5 летним мониторингом электрической нагрузки с последующей статистической обработкой. Своевременная актуализация действующих нормативных документов позволит значительно снизить затраты на строительство электрических сетей, поскольку к 2024 г. планируется: увеличение объема жилищного строительства до 120 млн кв. м в год [1]; создание 8,6 тыс. групп дошкольного образования [1]; создание 230 тыс. новых мест в общеобразовательных организациях [1].

В пользу мониторинга с последующей актуализацией значений удельных электрических нагрузок потребителей с 5 летней периодичностью приводятся также следующие доводы:

- постоянно улучшается класс энергопотребления бытовой техники до А+++;
- с 2023 года показатели удельного расхода электроэнергии в многоквартирных домах должны быть улучшены на 40%, а с 2028 года на 50% [2], классы энергетической эффективности многоквартирных жилых домов [3];

- внедрение энергосервисных договоров, позволит сократить потребление электрической энергии в бюджетных учреждениях от 40 до 60%.

На рис. 2 представлено электропотребление в течение года в зависимости от года ввода объекта в эксплуатацию.

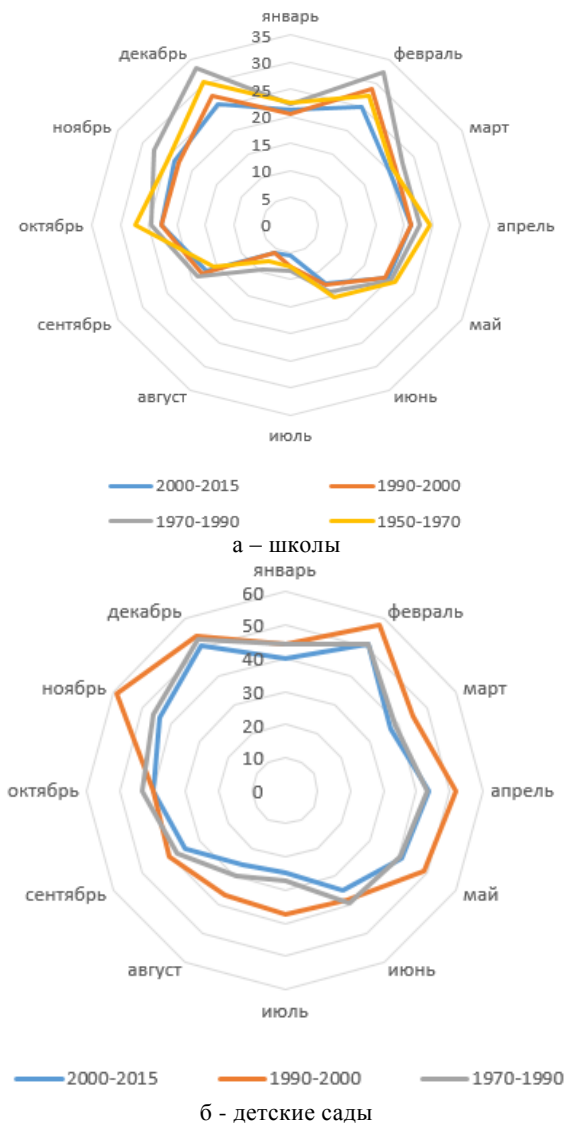


Рис. 2 Электропотребление в течение года в зависимости от года ввода объекта в эксплуатацию.

Из рис. 2 видно, что электропотребление меняется от года ввода объектов в эксплуатацию (чем старше объект исследования, тем больше электропотребление). Это объясняется изменением количественного состава электроприемников и их характеристик (энергоэффективности). Мониторинг электрической нагрузки позволит своевременно корректировать нормативные документы и будет способствовать получению максимального экономического эффекта. Поскольку часовые пояса Российской Федерации по долготе имеют протяженность 11,4 часа, и страна административно разделена на 9 часовых поясов с размахом среднегодовой температуры 36 градусов (от -23 до +13), применение единого документа для расчета электрической нагрузки для всей территории страны не представляется

возможным. Дифференциация в Федеральных округах, рис. 4 [17], показывает, что удельные расходы электроэнергии увеличиваются с юго-запада на север и восток. Дальневосточный федеральный округ (1461 кВт·ч/чел в год) почти вдвое превосходит Северо-Кавказский федеральный округ (795 кВт·ч/чел в год) и примерно в полтора раза другие федеральные округа Европейской части страны [17]. Данные по отдельным субъектам Российской Федерации в общем случае показывают, что максимальные душевые расходы электроэнергии характерны для районов с дешевой энергией ГЭС (Иркутская область, Республика Хакасия, Республика Дагестан), а также для районов без развитых газовых сетей (регионы Дальнего Востока и Северо-Запада, где население использует электроэнергию в самом энергоёмком бытовом приборе – электроплитах, а также нередко для теплоснабжения) [17,18]. Региональный признак нужно учитывать при мониторинге и актуализации удельных значений электрической нагрузки [11,12].



Рис. 3. Удельные расходы в Российской Федерации по регионам [17].

Рис. 3 демонстрируют необходимость мониторинга с последующей актуализацией удельных электрических нагрузок по каждому региону в отдельности.

В настоящее время обеспечению мониторинга способствует принятие Федерального Закона от 27 декабря 2018 г. N 522-ФЗ "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации", в котором говорится, что, начиная с 1 января 2022 года, поставщиками и сетевыми организациями должно быть обеспечено предоставление потребителям электрической энергии с минимальным набором функций интеллектуальных систем учета электрической энергии, а уже с 1 января 2023 года в случае невыполнения данного закона потребитель вправе потребовать уплаты штрафа. В постановлении правительства Российской Федерации об утверждении правил предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности) в состав информации о количестве и иных параметрах

электрической энергии входят: объем принятой и отданной электрической энергии, учтенный по точке поставки, в том числе тарифным зонам, и в случаях, предусмотренных в почасовой или получасовой разбивке.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Мониторинг электрических нагрузок многоквартирных домов с последующей статистической обработкой в Республике Татарстан частично представлен [11,12] после прохождения экспертной оценки специалистов: ГАУ «Центр энергосберегающих технологий РТ при кабинете министров РТ», ГАУ «Управление государственной экспертизы и ценообразования РТ по строительству и архитектуре», ГКУ «Главное инвестиционно-строительное управление РТ», ГУП «Татинвестгражданпроект» и нашел свое отражение в постановлении Кабинета Министров Республики Татарстан № 805 от 09.09.2019г. (снижение удельных расчетных электрических нагрузок многоквартирных домов составило от 223% до 50%) [6,11,12]. В табл. 3 представлена актуализированная удельная электрическая нагрузка для расчета заявленной мощности многоквартирных домов, утвержденная постановлением Кабинета Министров Республики Татарстан № 805 от 09.09.2019г [6].

Результаты расчетов показали, что экономический эффект от внедрения постановления Кабинета Министров Республики Татарстан № 805 от 09.09.2019г. [6] для застройщика составит порядка 30 млн. руб. при вводе 95 тыс. кв.м [11,12]. В Республике Татарстан в 2019г. ввод жилья составил 2,675 млн. кв.м. [9], из которых 1,569 млн. кв.м. приходится на МКД. Таким образом, ожидаемый экономический эффект для застройщиков составил порядка 495 млн. руб. в год. При расчёте не было учтено высвобождение территории за счет уменьшения количества ТП и их охранной зоны.

Для ОАО «Сетевая компания» [8] снижение потерь электроэнергии за счет решения вопроса с «запертой мощностью» составит порядка 273 млн. кВт·ч, что составляет 17% от общего числа потерь электроэнергии за 2018г. Ориентировочный экономический эффект составит порядка 649 млн. руб. в год, без учета капитальных затрат при строительстве и реконструкции электрических сетей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сделаны следующие выводы:

1. Экономия в 1,15 млрд. руб. в год для Республики Татарстан связана с уменьшением стоимости технологического присоединения, уменьшением мощности, количества и потерь в трансформаторных подстанциях. Экономический эффект от своевременной актуализации удельных расчетных нагрузок в целом для Российской Федерации составит не менее 100 млрд. руб. в год.

2. Актуализация расчетных электрических нагрузок даст возможность решить вопрос, связанный с повышением загрузки трансформаторных подстанций, а, следовательно, тренд на сокращение «запертой» мощности начнёт ощущаться в течение 3–5 лет.

3. Должен осуществляться мониторинг удельных электрических нагрузок по регионам (группам регионов) и по климатическим зонам.

4. Повышение энергоэффективности электроприемников, а также уменьшение электропотребления за счет высокой стоимости, говорят о необходимости мониторинга с соответствующей актуализацией в нормативных документах, которые должны пересматриваться как минимум каждые 5 лет. Этот период позволит своевременно реагировать на разницу между расчетной и фактической электрической нагрузкой потребителей.

5. Для осуществления мониторинга электрической нагрузки создаются все условия, в том числе возможность дистанционного снятия показаний с электрического счетчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Указ** Президента России от 7 мая 2018 года №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»
2. **Приказа** Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 17.11.2017 г. № 1550/пр «Об утверждении Требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений»
3. **Приказ** Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.06.2016 N 399/пр «Об утверждении правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов»
4. **СП 256.1325800.2016** «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа»
5. **РД 34.20.185-94** «Инструкция по проектированию городских электрических сетей».
6. **Постановление** Кабинета Министров Республики Татарстан № 805 от 09.09.2019г. «О внесении изменений в постановление Кабинета Министров РТ от 27.12.2013 № 1071
7. **Отчет** о функционировании ЕЭС РФ в 2019 году с. 36
8. **Годовой отчет** «ОАО Сетевая компания» за 2018 год
9. **Отчеты** ведомств «Объем ввода жилья в РТ» Электронный ресурс: <https://open.tatarstan.ru/reports/category/10172191/reports/29128> (дата обращения 15.05.20г.)
10. **Массовое** домостроение в России: история, критика, перспективы Издание осуществлено по заказу Комитета по архитектуре и градостроительству Москвы Типография «АВТ Групп» Москва, 2016 С. 248
11. **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
12. **Soluyanov Y.I., Fedotov A.I., Ahmetshin A.R.** Calculation of electrical loads of residential and public buildings based on actual data IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 vol. 643 article number 012051 DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012051
13. **Suslov K., Piskunova V., Gerasimov D., Ukolova E., Akhmetshin A., Lombardi P., Komarnicki P.** Development of the methodological basis of the simulation modeling of the multi-energy systems E3S Web of Conferences 2019 vol. 124 article number 01049 DOI 10.1051/e3sconf/201912401049
14. **Mendelev D.I., Marin G.E., Akhmetshin A.R.** The implementation and use of gas turbines with absorption refrigerating machine in the technological schemes of thermal Power Plants 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies Publisher IEEE INSPEC accession Number 19229407 DOI 10.1109/FarEastCon.2019.8934431
15. **Bakhteev K., Fedotov A., Misbakhov R.** The improving efficiency of electric receivers on the industrial enterprises in case of short-term power outages Proceedings of the 2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering Ostrava Czech Republic pp 347-352 DOI 10.1109/EPE.2019.8778181
16. **Антонов Н.В.** Производство и потребление электроэнергии в Российской Федерации в 2017 году // АО «Агентство экономической информации «ПРАЙМ» электронный ресурс: <https://1prime.ru/science/20181115/829538943.html> (дата обращения 25.04.20г.)
17. **Антонов Н. В., Евдокимов М. Ю., Чичеров Е. А.** Проблемы в оценке региональной дифференциации потребления электроэнергии в бытовом секторе России // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2019. № 4. С. 53–71. DOI: 10.18384/2310-7189-2019-4-53-71
18. **Надтока И.И., Павлов А.В.** Расчеты электрических нагрузок жилой части многоквартирных домов с электрическими плитами, основанные на средних нагрузках квартир. - Известия вузов. Электромеханика. – 2014. - №3. – С. 36-39.
19. **Gracheva E.I., Alimova A.N.** Calculating probability of faultless work of shop nets with the help of coefficients of ratio 2019 International Russian Automation Conference INSPEC Accession Number 19090885

*В.Ю. Чайкин¹, В.А. Петров¹, И.А. Султангузин¹,
А.А. Басалаев², А.Н. Нечаев³, Н.Н. Капитонов⁴*

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² НПП «Политех-Автоматика», Челябинск, Россия

³ ООО «ТНС», Москва, Россия,

⁴ Компания ГидроЛОГО», Московская область, Россия

ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА

АННОТАЦИЯ

Основной целью работы является описание методов и алгоритмов использования нескольких систем мониторинга для работы энергоэффективного дома. В ходе работы были разработаны и изучены методики различного использования систем мониторинга, благодаря которым были обнаружены уникальные зависимости процессов, возникающих в энергоэффективном строительстве и эксплуатации зданий.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире очень распространено энергоэффективное строительство. Одним из примеров этому является популярность концепции строительства Пассивных домов, основные критерии которых: удельный расход тепловой энергии на отопление ≤ 15 кВт·ч/(м²·год), общий расход первичной энергии ≤ 120 кВт·ч/(м²·год) [1,2]. В нашей стране пока нет объектов, которые по всем критериям удовлетворяли бы высокому стандарту пассивного дома [3], но в некоторых новых зданиях уже используются принципы, компоненты, расчетные методики пассивного строительства. На сегодняшний день, главной задачей является исследование уже готовых проектов. Для этого требуется создание и настройка систем мониторинга, которые будут собирать ценную информацию о таких системах.

2. СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ И СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ

Основные положения системы управления энергоснабжением здания «умный дом» представлены в работе [4], в соответствии с которыми реализовывались системы управления и мониторинга дома с около нулевым энергопотреблением.

Рассмотрим пример энергоэффективного дома, в котором для повышения эффективности функционирования его подсистем применяются различные автоматизированные системы мониторинга, осуществляющие сбор различных параметров за продолжительный срок для их последующего анализа и самостоятельной корректировки параметров системы для её эффективной работы. Дом оснащён:

- тепловым насосом BUDERUS Logatherm WPS 11;
- солнечными плоскими коллекторами JSolar, 4 коллектора по 2 м²;
- солнечными батареями Delta BST 360-24 M, 4 шт.;
- механической вентиляцией с рекуперацией тепла, ZENIT 550 HECO;
- энергоэффективными окнами со специальным покрытием и газонаполнением;
- тёплым полом на 1ом этаже;
- тёплым потолком на 2 этаже с функцией охлаждения летом и большим слоем изоляции.

Этому оборудованию для корректной работы с максимальной эффективностью требуется постоянный мониторинг и регулирование различных параметров. Достичь этого позволяют специальные системы. Основной является ТеплоМонитор от фирмы «ГидроЛОГО». Эта система является управляющей и позволяет поддерживать комфортную температуру внутри дома. Контролер SMARTWEB X, входящий в состав этой системы, позволяет удаленно производить:

- управление тепловым насосом;
- управление аккумулятором тепла;
- управление теплым полом 1 этажа;
- управление потолком 2 этажа;
- управление температурой ГВС;
- управление солнечными коллекторами;
- сбор информации о системе.

Управление этими устройствами происходит в автоматическом режиме с целью поддержания во всех комнатах дома заданной комфортной температуры воздуха и горячего водоснабжения.

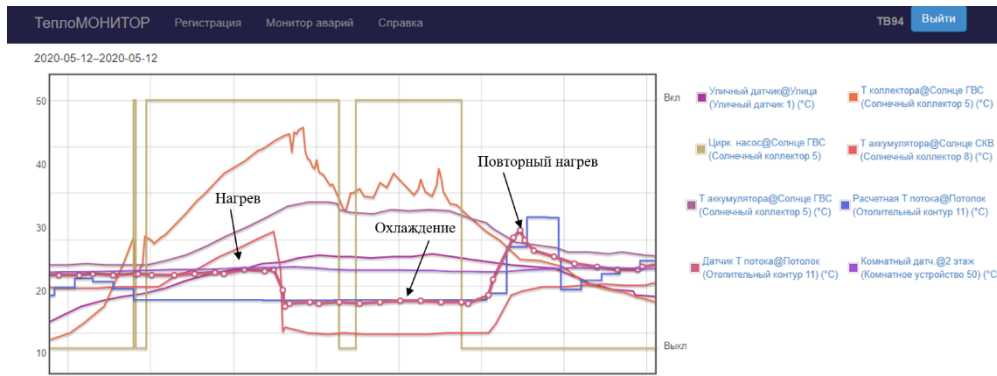


Рис. 1. Веб-интерфейс системы Тепломонитор.

Производить удаленное управление и контроль показаний можно через специальный веб-интерфейс. На представленном фрагменте интерфейса (рис. 1) можно заметить, как изменяется температура в различных контурах системы. Например, по графику видно, как с 6:00 часов начинается рост температуры в солнечном коллекторе, в связи с увеличением солнечной активности, а потом для поддержания необходимой температуры включается режим охлаждения 2-го этажа с 11:00. После 16:00 автоматически происходит возврат на режим нагрева. Недостатком системы является то, что она может работать только с непрерывно изменяющимися показаниями расхода, что в свою очередь не позволяет использовать расходомеры импульсного типа, что усложняет снятие параметров для задач мониторинга.

Для более полного мониторинга параметров энергоэффективного дома применяется ПТК «ПолитЭР» от фирмы НПП «Политех-Автоматика» [5].

Эта система позволяет регистрировать большее количество различных устройств учета:

- тепловычислители КАРАТ-307, 4 шт.;
- расходомеры воды ВСКМ-15 Декаст, 12 шт.;
- расходомеры воды ZENNER-20, 3шт.;
- термодары pt-100 КТС-Б, 24 шт.;
- беспроводные датчики температуры, 10шт.;
- 3 трехфазных и 5 однофазных электросчетчиков ЭНЕРГОМЕРА.

Данные, поступающие с этих приборов учета, позволяют создать полное представление о работе всех систем дома. Благодаря использованию и учету данных поступающих от тепловычислителей можно сделать выводы о количестве получаемой домом энергии от солнца, грунтового теплового насоса и других контуров отопления. Так, например с помощью мнемосхемы (рис. 2) мы можем в реальном времени следить за показаниями приборов.

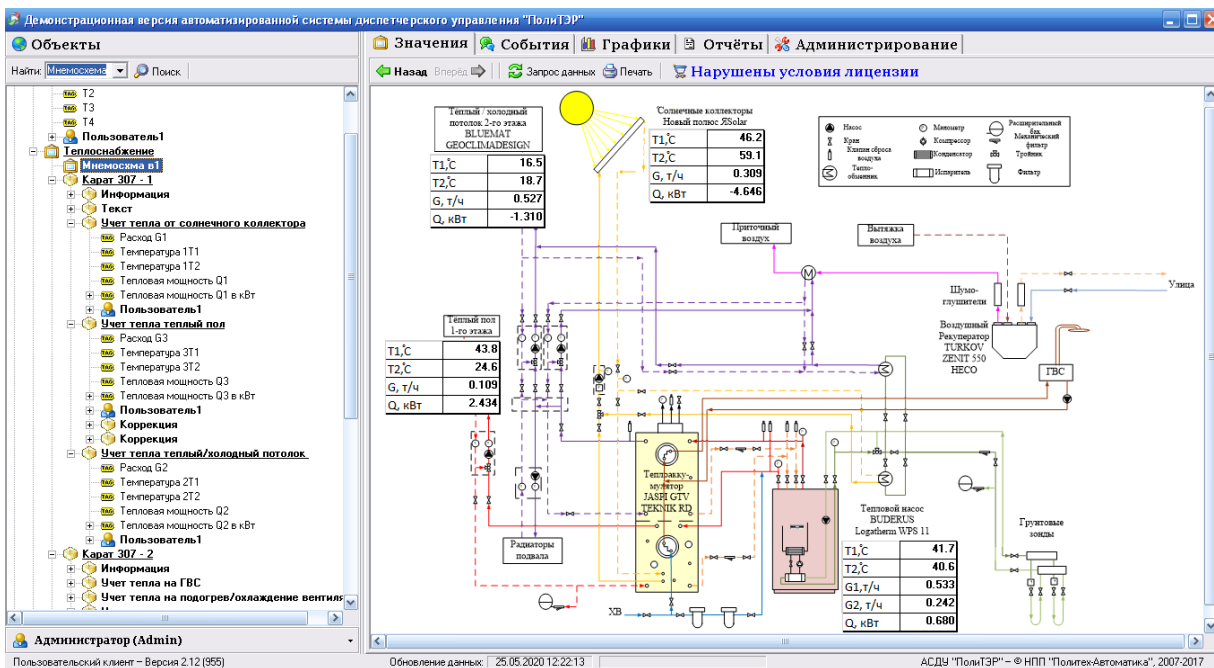


Рис. 2. Интерфейс систем ПолитЭР с мгновенными показаниями.

Третьей системой мониторинга является метеостанция MISOL WS-2310-1, она позволяет собирать в автоматическом режиме такие важные показатели, как температура, влажность внутри и снаружи дома, барометрическое давление, количество осадков, солнечную энергию, солнечный УФ-индекс, показания скорости и направления ветра. Все эти параметры важны для анализа энергоэффективного дома.

3. ПРОБЛЕМАТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

При использовании нескольких параллельных систем возникают различные трудности, для решения которых требуется комплексный подход и глубокое изучение принципов работы различных систем. В данном примере удалось найти необходимые пути решения большинства проблем на пути совместного использования этих систем.

3.1. Поиск и устранение неисправностей в системе сбора показаний

После монтажа любая система требует отладки. Установка системы мониторинга не стало исключением. В связи с тем, что подобных проектов по углубленному мониторингу параметров энергоэффективного дома не было, в системе присутствовали ошибки, большинство которых удалось выявить с помощью анализа результатов мониторинга на появления различных аномалий, связанных с получением, передачей и обработкой сигналов, поступающих с датчиков и устройств.

В поиске некорректных данных помогает то, что в умном доме присутствует сразу несколько систем мониторинга. Благодаря избыточности есть возможность проверять те или иные показания из разных источников.

3.2. Виды ошибок и способы их устранения

Большинство ошибок в данных, получаемых после первоначальной настройки, было связано с некорректным поступлением показаний температур от термометров сопротивления в тепловычислители. Некоторые ошибки в значениях температур были очевидны. К очевидным ошибкам можно отнести превышение температуры и расхода в несколько раз.

Чтобы найти неисправность такого рода надо рассматривать всю цепочку работы системы мониторинга с самого конца, начиная с самого датчика и закивая системой мониторинга.

Путем контроля параметра на каждом этапе было обнаружено, что ошибка находится в некорректной конфигурации тепловычислителя.

Куда сложнее происходит нахождение ошибок небольших отклонений различных параметров. К таким значениям можно отнести отклонения показаний температур на несколько градусов. Такие параметры очень трудно выявить из-за их неочевидности. Чаще всего причиной возникновения были

ослабленные разъемы на термометрах или в тепловычислителях.

3.3. Результаты нахождения и устранения неполадок

В результате проведенных работ система сбора информации стала работать более стабильно. Благодаря чему, может производиться длительный автоматический сбор данных без присутствия человека.

Благодаря этим данным появилась возможность получать реальные значения температур расходов и количества энергии в разных компонентах системы энергоэффективного дома. Появилась возможность производить анализ систем плоских солнечных панелей, грунтового теплового насоса, а также системы теплого потолка и системы теплый/холодный потолок, которые отвечают за поддержания требуемых значений внутри дома.

4. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММ

В результате работы систем мониторинга и управления энергоэффективного дома в течении нескольких лет было получено огромное количество разнообразных данных. Эта информация в академической среде называется «Большие данные» (англ. big data), она несет в себе ценные знания, которые невозможно получить любым другим способом кроме, как живым экспериментом, для которого требуется построить полноценный жилой дом. Сбор, сохранение и анализ полученных больших объемов данных позволит дать положительный толчок для энергоэффективного строительства в России. Никогда ранее в истории человечества не было таких средств и методик для обработки такого большого количества данных, чем сейчас. Данные от различных систем мониторинга смогут эффективно использоваться только совместно. Ведь, чем более полную картину о всех системах дома мы будем иметь, тем легче будет анализировать данные на предмет зависимостей одних показаний относительно других. Однако, несмотря на схожие параметры, каждая система имеет собственный принцип сбора данных. Поэтому необходимо было привести все данные к одному формату. Для работы с данными был выбран формат .XLSX в программе Microsoft Excel за простоту обработки большого количества данных, записанных в одну единицу времени. При сборе данных из разных источников, помимо размерности, требуется также соблюдения единого формата времени. Даже в рамках одной системы встречается проблема одновременного снятия показаний, что при большом объеме получаемых значений серьезно осложняет групповую обработку данных.

4.1. Проблемы и особенности обработки данных различных форматов на примере параметров из системы Тепломонитор

Из-за разных принципов работы все системы в доме по-разному собирают и архивируют информацию. Например, в системе ПолиТЭР данные обновляются один раз в 5 минут, с возможностью выгрузки усредненных параметров за каждые 10 минут. Данные со всех компонентов метеостанции обновляются одновременно с интервалом 10 минут. Из-за того, что система Тепломонитор имеет иной принцип работы, значения обновляются по-разному, так как в этой системе помимо температурных датчиков и расходомеров присутствует также управляющее оборудование, которое корректирует систему отопления.

В результате некорректной работы термометра, измеряющего температуру воды на выходе из солнечных коллекторов, для определения количества теплоты, полученной от солнца, требовалось использовать это значение из другой системы мониторинга. Благодаря избыточности системы сбора данных этот параметр дублировался системой Тепломонитор. В апреле 2020 г. у Компании ГидроЛОГО был запрошен весь массив данных, полученных от контролера. Эти данные собирались на сервере компании с 10 мая 2018 г., что является самым большим единым архивом данных. Получение возможности сортировки, обработки и систематизации этих данных позволило разработать принципы и методики обработки больших данных систем мониторинга.

	Темп. Аккумулятор @Солнце ГВС	Расчет. Темп. Поток @Потолок	Темп. Комнат. датч. @1-ый этаж	Темп. Уличный датчик @ Улица	Темп. ГВС @Контур ГВС	Темп. Коллектор @Солнце СКВ	Темп. Коллектор @Солнце ГВС	Темп. Аккумулятор @Солнце СКВ
15.мар								
0								
:01								
:03			20.9					
:04								
:05								17.2
:07	21.8							
:08					-3.7		-3.7	-3.4
:09								
:10					20.9			
:13								
:19		25.7						
:24								
:27								
:32								17.2
:33			20.9					
:34								
:36								
:37	21.8							
:38					-4		-4	-4.3
:40					20.2			
:43								
:48		27.6						
:52								
:54		28						
:56		32.3						16.3
:57								9.1
:59		27						

Рис. 3 Пример данных, полученных системой Тепломонитор по некоторым приборам в течении часа.

Полученный файл содержит более 5,6 млн. значений, снятых с различной периодичностью в зависимости от конкретного прибора (Рис.3). Поэтому для работы с этими данными требуется их усреднение и сведение к одному временному промежутку. При анализе файла была получена цифра в 7190 значений в сутки. Перебрав множество вариантов и стратегий работы с подобными файлами, был создан следующий алгоритм работы с файлами (Рис.4).



Рис.4 Алгоритм обработки данных из системы Тепломонитор

Если требуется совместное исследование данных с одного устройства за продолжительный срок, диапазон будет слишком велик, то потребуются предварительно убрать из исследуемого файла ненужные устройства. Для этого требуется осуществить сортировку всех данных по устройствам, а потом сгенерировать отдельный файл по требуемому устройству. Дальнейшая обработка будет подобна работе с файлом за непродолжительный срок

4.2. Особенности сопоставления результатов из различных систем.

При сборе данных со всех систем и последующей попытке одновременного анализа из разных источников, была найдена основная проблема их совместного использования, это проблема сопоставления значений относительно времени в разных системах. Решение именно этой проблемы повысило эффективность совместного использования различных систем мониторинга и позволило в дальнейшем проводить анализы для данных с большим количеством источников. Для хранения данных был выбран промежуток в 1 час. Для изучения в случае возникновения внештатной ситуации, оставлена возможность обращения к разрозненным архивам для установления причин ошибок и аварий.

5. НАХОЖДЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ В ПОЛУЧАЕМЫХ ДАННЫХ

После отладки и настройки системы сбора и архивирования значений, полученных системами мониторинга, стало возможно непосредственно использовать эти параметры для поиска и определения зависимостей, которые могли бы дать уникальную информацию или уточнить значения, полученные методами моделирования.

5.1. Результаты изучения аккумуляции дома

Благодаря оптимизации совместной работы с данными из нескольких систем, стало возможно проводить исследования, связанные с обработкой данных. Так, например, были проведены уникальные исследования аккумуляции здания [6].

В рамках этого исследования был произведен отбор показаний за неделю из нескольких систем мониторинга. Для этой работы применялись данные полученные из всех трех систем мониторинга.

В ходе обработки данных за каждый час, было тяжело сделать выводы по аккумуляции домом тепла. Поэтому было принято решение о том, чтобы сгруппировать графики и провести анализ данных при учёте за каждые 6 часов работы системы дома. Для этого расчёта были собраны такие данные, как сумма тепла тёплого пола и тёплого потолка, температуру наружного воздуха, температуру внутри дома, количество солнечной энергии собираемой метеостанцией, а также учёт тепла от солнечного коллектора, разность температур солнечного коллектора и аккумулятора, через который было посчитано количество энергии, полученное солнечными батареями.

Для нахождения аккумуляции домом был посчитан коэффициент корреляции, сведенный в таблице, при сдвиге графика на 12 и 18 часов. Исходя из посчитанного коэффициента корреляции, сведенного в таблице, самый большой показатель корреляции получился при сдвиге графика на 12 часов, что подтверждает аккумуляцию тепла домом равную этому времени.

Таблица 1. Коэффициент корреляции и детерминации при сдвиге графика на 12 и 18 часов

	Без смещения графика	Сдвиг графика на 12 часов	Сдвиг графика на 18 часов
Корреляция	0,325	0,420	0,107
Детерминация	0,105	0,176	0,011

При графическом анализе (Рис. 5) также заметны зависимость отопления от разности температур при смещении на 12 часов, что подтверждает 12 часовую задержку из-за аккумуляции.

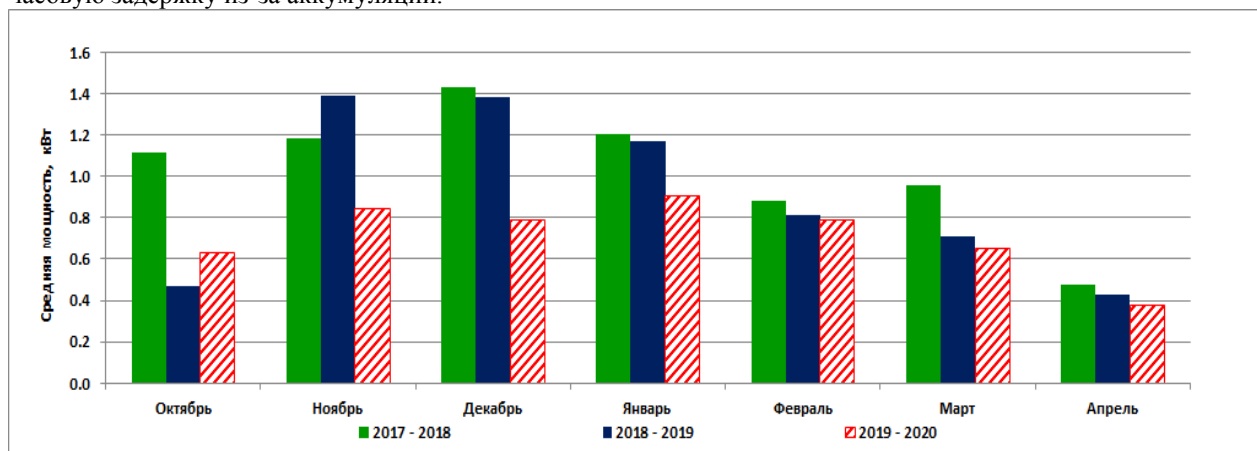


Рис. 6. Потребляемая мощность инженерной системы энергоэффективного дома с тепловым насосом.

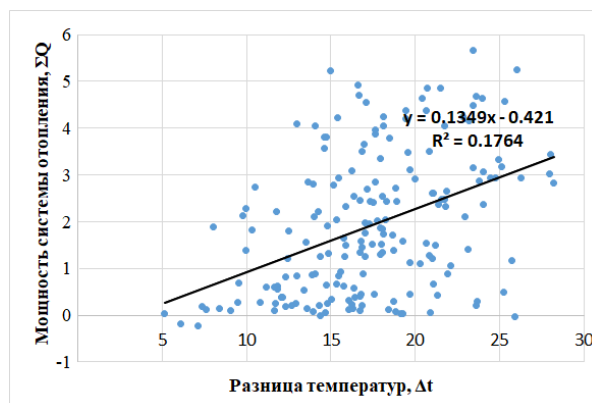


Рис. 5. Взаимосвязь прихода тепла в дом от разности внутренней и наружной температуры со смещением на 12 часов.

В результате работы были разработаны алгоритмы и схемы по сбору, обработке и архивированию данных для последующего использования при анализе энергоэффективного дома.

Вместе с расчетом аккумуляции было также произведено изучение работы системы дома в течение всего срока (рис. 6). Для этого производилось снятие показаний с приборов учета, и проведена совместная обработка этих данных. По результатам можно сделать вывод о существующей тенденции к снижению энергопотребления системами дома на 760 кВт·ч (16%). Наравне с этим увеличилась средняя внутренняя температура до 21 градуса, а также снизилась влажность до 39%. В среднем за отопительный сезон было найдено потребление равное 0.71 кВт. Таким образом, среднее удельное потребление электроэнергии на тепловой насос в пересчёте на год равно 17.7 кВт·ч/м² [6], что является достаточно низким значением для России.

Вероятным объяснением этого является то, что за эти 3 года, проведения разного рода оптимизации работы системы, а также устранения неполадок дали положительный результат.

2020-05-25–2020-05-26

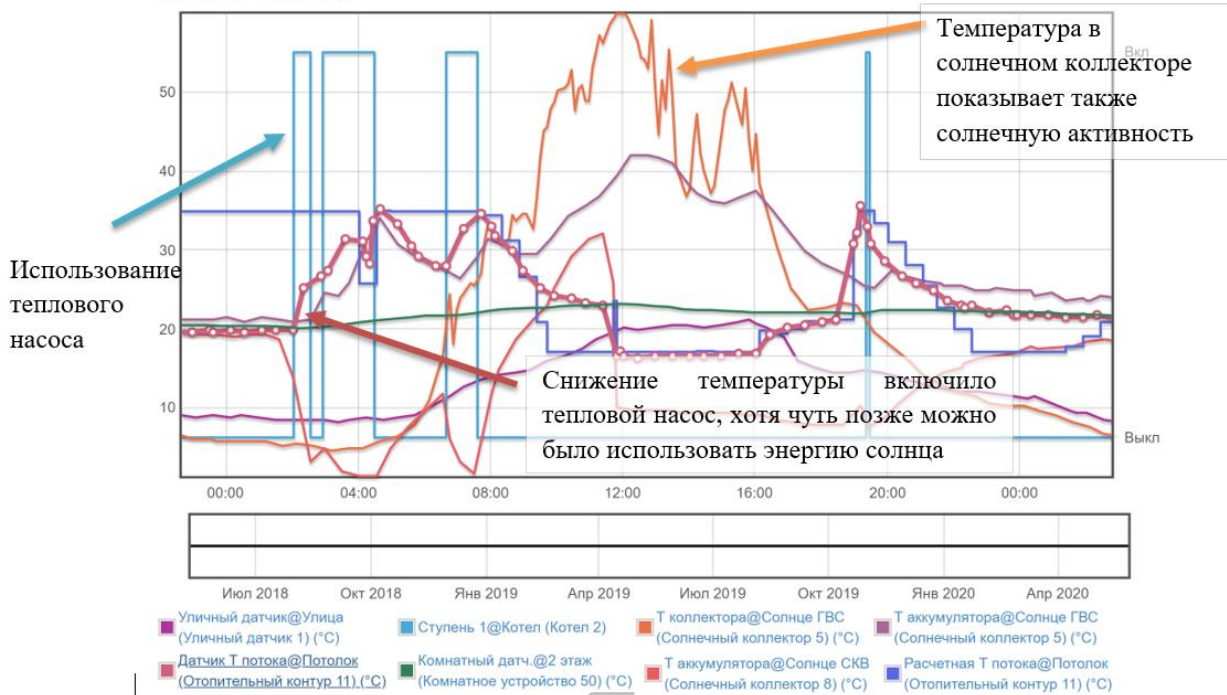


Рис. 7. Фрагмент данных за 25 мая и программы Тепломонитор

6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАРУЖНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ЗАДАНИЯ РЕЖИМА ОПТИМАЛЬНОГО ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ДОМОМ

Достигнутые результаты энергоэффективности, являются уникальными для нашей страны и позволяют на своем примере производить важные исследования уже сейчас. Однако, на данный момент этот проект использует не весь возможный потенциал энергетической эффективности. Поэтому в дальнейшем будут применяться различные мероприятия, направленные на повышении энергетической эффективности.

Благодаря проведенным исследованиям по изучению аккумуляции тепла домом, стали возможны внедрение в систему прогнозирования расхода тепла на основании прогноза погоды на 24 – 48 часов. Подобная технология уже применялась за рубежом. Так, например, в Дании были произведены исследования [7], в рамках которых режим потребления энергии на отопление здания определялся на основе прогноза наружной температуры, скорости и направления ветра и солнечного излучения. Это позволило правильно выбирать время выработки тепла с максимальной эффективностью. Основным принципом работы там являлось то, что каждые несколько часов прогноз уточнялся, позволяя получать более точные значения по теплопотреблению. В рамках исследуемого дома планируется сделать такую же систему для того, чтобы более эффективно использовать энергию солнечных батарей и солнечных коллекторов. В настоящее время нередки случаи, когда в солнечный день, за которым следует холодная ночь, ТеплоМо-

нитор сначала переходит в режим охлаждения, а затем повышенного нагрева, вместо того, чтобы оставаться в режиме аккумуляции энергии (рис. 7).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе реализован системный подход к строительству и эксплуатации энергоэффективного дома с разработанной системой управления и мониторинга, которая позволяет исследовать и внедрять новейшие технологии, достигая и фиксируя энергосберегающий эффект от их реализации в течение жизненного цикла здания.

В результате работы с системами мониторинга и управления энергоэффективного дома были разработаны алгоритмы и схемы по оптимизации работы этих систем. Представлены ключевые методы исправления различных ошибок при работе систем мониторинга и измерительного оборудования. Предложена и реализована концепция обработки данных из нескольких систем. Доказана эффективность использования нескольких систем ввиду благоприятной избыточности получаемых данных. Благодаря этому удалось восполнить часть некорректных данных получаемых одной из систем.

Было получено более 5,6 миллиона значений различных параметров с устройств мониторинга. Для этого были разработаны и применены специальные алгоритмы, которые позволили собрать, отсортировать и обработать такое большое количество данных. По этим данным удалось провести более полный анализ работы систем и в дальнейшем удалось выявить

некоторые зависимости, которые в дальнейших исследованиях помогли в более точном анализе работоспособности систем энергоэффективного дома и параметров энергоэффективности.

При параллельной обработке данных с помощью разработанных методик приведения к одному временному значению было обнаружено, что дом аккумулирует тепло в течении 12 часов за счет свойств тепловой изоляции и методик пассивного строительства. Это значение в дальнейшем, на основании погодных прогнозов, поможет получать прогнозы по потреблению тепла домом. Эти данные позволят правильно настроить системы управления для повышения энергосбережения, а также определять правильность переключения систем охлаждения и нагрева, используемых для поддержания заданной температуры внутри дома.

Также благодаря работе с приборами учета, были собраны и обработаны данные по мощности, потребляемой энергосистемой дома за 3 года. При анализировании этих данных было вычислено среднее удельное потребление электроэнергии на теплоснабжение в пересчете на год равное $17.7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ и обнаружена тенденция к снижению потребления, несмотря на увеличение эксплуатации здания.

Результатом работы стала возможность получения, сохранения и обработки данных всех систем в течении длительного времени, что само по себе является уникальным проектом. Появились методики для исследования совместной работы теплового насоса, солнечных коллекторов, теплого потолка и теплого пола за весь жизненный цикл здания. Эта информация представляет огромную ценность. Она будет служить каркасом для продвижения энергоэффективного строительства, ведь благодаря ей появилась возможность узнать, как все системы дома работают сообща.

При дальнейшем развитии дома, стала очевидна необходимость в разработке системы прогнозирова-

ния наружной температуры для задания режима оптимального теплопотребления в энергоэффективном доме.

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.
3. **Hill B.** Passive house development in Russia // III World Summit SmartEnergy Russia. 26-27 March 2019, Moscow. 95 p.
4. **Sultanguzin I., Toepfer H., Kalyakin I., Govorin A., Zhigulina E., Kurzanov S., Yavorovsky Yu.** Mathematical modeling and control system of nearly zero energy building // Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2018. No.2. P. 21 – 24.
5. **Абдуллин В.В., Шнайдер Д.А., Курзанов С.Ю., Яворовский Ю.В.** Использование технологии «интернета вещей» в отоплении зданий: упреждающее управление, распределенный мониторинг, интеллектуальная балансировка // С.О.К. Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2018. №8. С. 54 – 58.
6. **Петров В.А. Чайкин В.Ю. Султангузин И.А.** Разработка и использование систем мониторинга для анализа энергоэффективного дома. // 21-я конференция «Энергетики и металлургии настоящему и будущему России». Магнитогорск 2020.
7. **Bacher P., Madsen H., Aalborg Nielsen H., Perers B.** Short-term heat load forecasting for single family houses. // Energy and Buildings. Vol. 65, October 2013, P. 101-112.
8. **Кругликов Д.А., Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Нечаев А.Н., Трусов А.С.** Экспериментальное и численное исследование работы системы потолочного охлаждения на основе гипсокартонных панелей с системой потолочно-вытяжной вентиляции с охлаждением приточного воздуха // Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения». Нур-Султан, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 20 марта 2020 года. - Нур-Султан, 2020. – С. 347 – 350.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*д е с я т о й
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 6

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

П.Н. Анисимов, А.А. Медяков

ФГБОУ ВО Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ДВИГАТЕЛЕМ НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕСОСЕЧНЫХ МАШИН

АННОТАЦИЯ

В данной статье представлены результаты имитационного моделирования системы автономного энергообеспечения лесосечных машин с электроприводом. Имитационное моделирование осуществлено в среде MATLAB с использованием инструментов для динамического моделирования Simulink. Моделируемая система состоит из газификатора твердого древесного топлива, теплового двигателя, электрогенератора, аккумулятора и электродвигателей привода механизмов мобильной рубительной машины. В результате моделирования была определена минимальная емкость аккумулятора в 12 А·ч, необходимая для бесперебойной работы автономного энергетического модуля с газогенератором, тепловым двигателем максимальной мощностью 300 кВт и двигателем рубительной машины 200 кВт. Имитационная модель позволяет определять показатели эффективности системы при различных режимах работы. В заданном режиме удельный расход древесного топлива составил 2,217 кг/кВт·ч.

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергообеспечение территориально удаленных от централизованных сетей производственных объектов является актуальным вопросом, в том и числе и в нашей стране. Лесопромышленный комплекс является подходящим объектом для использования автономных энергетических систем [1]. Одной из проблем лесопромышленного комплекса России является недостаточно полное использование древесных ресурсов. Как правило, лесные массивы удалены от централизованных сетей энергоснабжения. В таких условиях древесину необходимо транспортировать на большие расстояния и поэтому из леса вывозится только наиболее ценная древесина, а переработка лесосечных отходов не выполняется. Многие необходимые лесохозяйственные работы, например, рубки прореживания, санитарные рубки, своевременное удаление сухостоя и т.д. проводятся не в недостаточном объеме, особенно в удаленных от инфраструктуры лесах [2].

Возможным решением вышеперечисленных проблем является использование низкокачественной древесины в качестве топлива для автономных энергоустановок малой мощности [3]. Это отопительные котельные населенных пунктов, производственных объектов, а также мини-электростанции с использованием газификации древесного топлива. Актуаль-

ными в этой области являются: вопросы энергетической эффективности данных энергоустановок на разных режимах работы; обоснование целесообразности их применения по сравнению с традиционными источниками энергии; вопросы проектирования автономных энергосистем и установление оптимальных режимов их работы. Имитационное моделирование является одним из наиболее эффективных инструментов для решения этих вопросов [4-6].

Данное исследование посвящено вопросу определения параметров автономного энергетического модуля с двигателем на генераторном газе для автономного энергообеспечения лесосечных машин. Вопросы возможного применения и технического устройства данных машин описываются в опубликованных работах [7, 8].

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Описание объекта исследования

Объектом исследования является энергетический модуль мобильной рубительной машины. Энергетический модуль является самостоятельной единицей. Оборудование энергетического модуля располагается на отдельном шасси прицепа для возможности транспортирования. Размещение энергетического модуля отдельно от технологической машины позволяет снизить её массу.

Основными элементами установки являются: газификаторы древесной щепы в количестве 2 или более единиц; тепловой двигатель на генераторном газе, например, поршневой двигатель внутреннего сгорания, либо двигатель внешнего сгорания; электрогенератор постоянного тока с системой регулируемого независимого возбуждения; аккумулятор электрической энергии; электродвигатели постоянного тока привода вентиляторов газогенератора, привода шнекового питателя газогенераторов; емкость с запасом топливной щепы; силовой кабель для соединения с лесосечной машиной. В качестве основной электрической нагрузки энергетического модуля является двигатель постоянного тока 200 кВт мобильной рубительной машины.

Преимуществом двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в качестве привода рубительной машины является его жесткая механическая

характеристика. Этим, в том числе, объясняется выпор основного привода.

Для питания основного двигателя постоянного тока используется система генератор-двигатель. Источником независимого питания обмотки возбуждения является аккумулятор. Преимущества системы генератор-двигатель: надежность, плавный пуск без реостатов и полупроводниковых преобразователей, простое регулирование частоты вращения двигателя и плавный его разгон с помощью изменения тока возбуждения генератора. При этом напряжение возбуждения самого двигателя поддерживается постоянным.

Для изменения напряжения обмотки возбуждения генератора может использоваться понижающе-повышающий преобразователь постоянного тока (buck-boost converter).

Поскольку основная нагрузка машины резко переменная, то для сглаживания пульсаций момента на валу первичного двигателя необходимо установить маховик.

2.2. Имитационное моделирование в MATLAB

Имитационное моделирование энергоблока выполнено в среде MATLAB с использованием инструментов для динамического моделирования Simulink и библиотеки элементов Simscape. На рисунке 1 представлен главная система модели с генератором 300 кВт, включающая несколько подсистем.

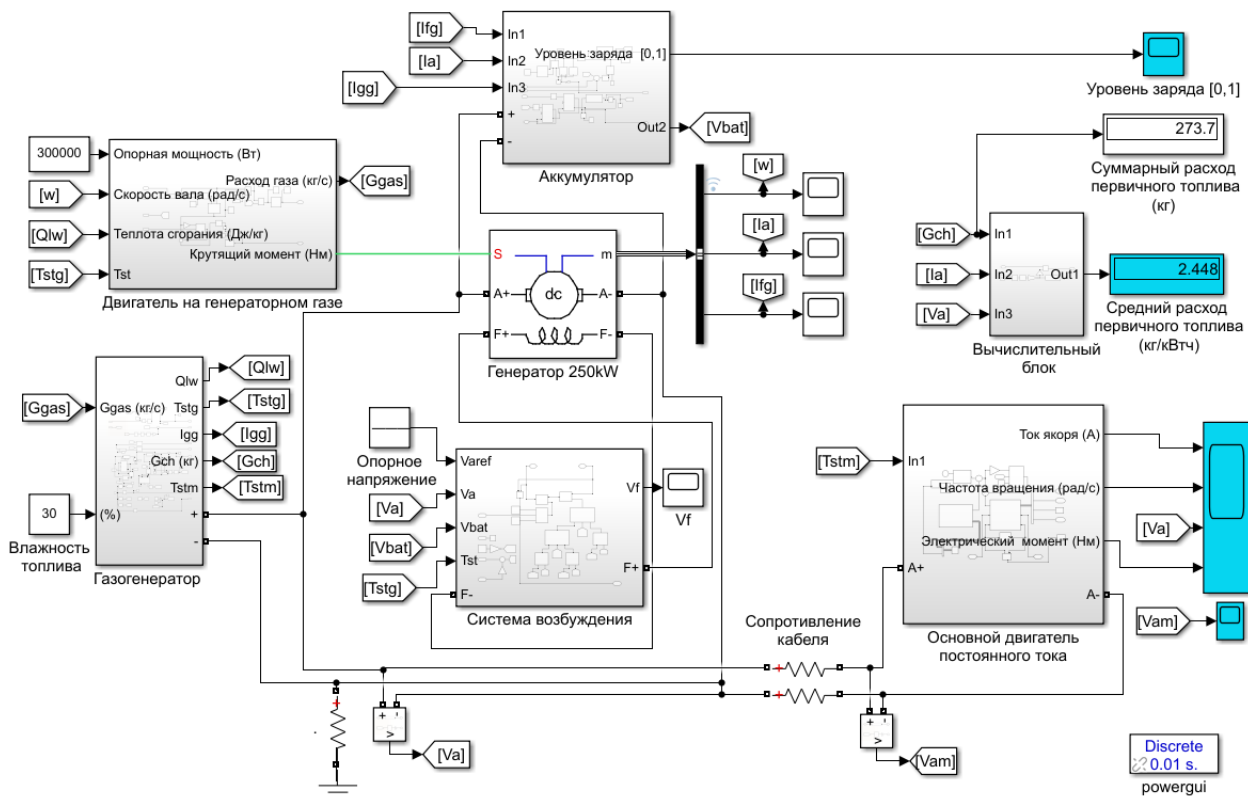


Рис. 1. Модель автономной энергосистемы: I_{fg} – ток возбуждения генератора, А; I_a – ток якоря генератора, А; I_{gg} – ток, потребляемый приводами газогенераторов, А; V_{bat} – напряжение аккумулятора, В; w – скорость ротора генератора, рад/с; V_a – напряжение якоря генератора, В; V_f – напряжение возбуждения генератора, В; T_{stg} – сигнал к запуску генератора; T_{stm} – сигнал к запуску двигателя; Q_{lw} – низшая теплота сгорания рабочей массы первичного топлива, Дж/кг; G_{gas} – расход генераторного газа в двигателе, кг/с; G_{ch} – расход первичного топлива (щепы) в газогенераторе, кг/с.

Подсистема двигатель на генераторном газе является источником крутящего момента для генератора. Регулирование крутящего момента осуществляется по фактической частоте вращения вала генератора, поддерживая заданную частоту вращения. Также данная подсистема система вычисляет потребление двигателем генераторного газа. Пуск двигателя осуществляется по сигналу к запуску от газогенератора, когда тот выйдет на номинальный режим работы.

Подсистема газогенератор вычисляет требуемый расход топливной щепы. В период запуска энерго-

блока электроснабжение газогенератора осуществляется от аккумулятора, после запуска от электрогенератора.

Система возбуждения поддерживает заданное опорное напряжение якоря генератора путем изменения напряжения на обмотке возбуждения. Питание системы возбуждения осуществляется от аккумулятора.

Вычислительный блок определяет средний удельный расход первичного топлива (щепы) в килограммах на 1 кВт·ч произведенной генератором электроэнергии. А также вычисляет суммарный расход первичного топлива за весь период моделирования.

Подсистема основной двигатель моделирует электрическую нагрузку лесосечной машины. На рисунке 2 представлена модель основного двигателя мобильной рубительной машины. Измельчитель древесины барабанного или дискового типа напрямую соединен с двигателем постоянного тока. Момент нагрузки измельчителя задается в виде графика и зависит от характеристик измельчаемой древесины.

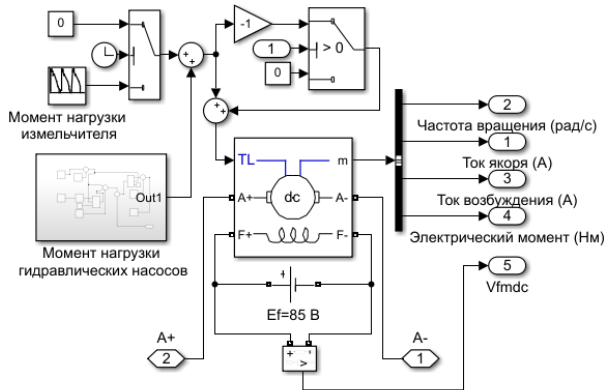


Рис. 2. Основной двигатель постоянного тока мобильной рубительной машины.

Помимо момента нагрузки самого измельчителя подсистема моделирует нагрузку других механизмов мобильной рубительной машины. На рисунке 3 представлена модель имитации нагрузки насосов гидросистемы мобильной рубительной машины.

Другие приводы мобильной рубительной машины гидравлические. Гидросистема включает 2 гидравлических насоса. Первый обеспечивает движение шасси и подъем контейнера при разгрузке щепы.

Второй обеспечивает вращение подающих роликов рубительной установки и работу гидроманипулятора.

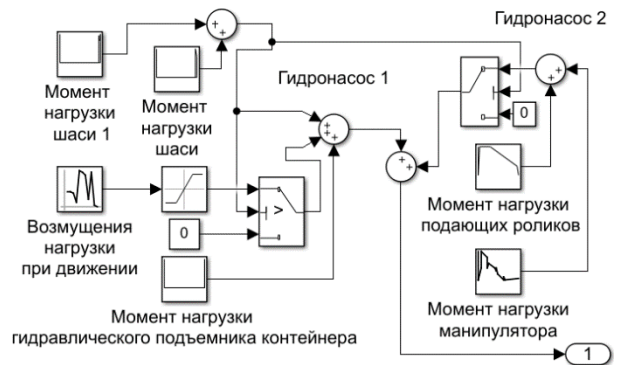


Рис. 3. Моделирование момента нагрузки на валу основного двигателя мобильной рубительной машины.

Для энергетически эффективного динамического регулирования электрической нагрузки в предлагаемой модели используется аккумуляторная батарея с управляемым переключателем (рис. 4), который при снижении тока нагрузки до определенного значения включает в цепь нагрузки аккумулятор для его зарядки и выключает после повышения тока нагрузки до выбранного значения. В Simulink для создания управляемого ключа были использованы реле, и элемент Boost Converter (преобразователь) в режиме Switching devices (управляемого ключа), на который реле подает управляющий сигнал.

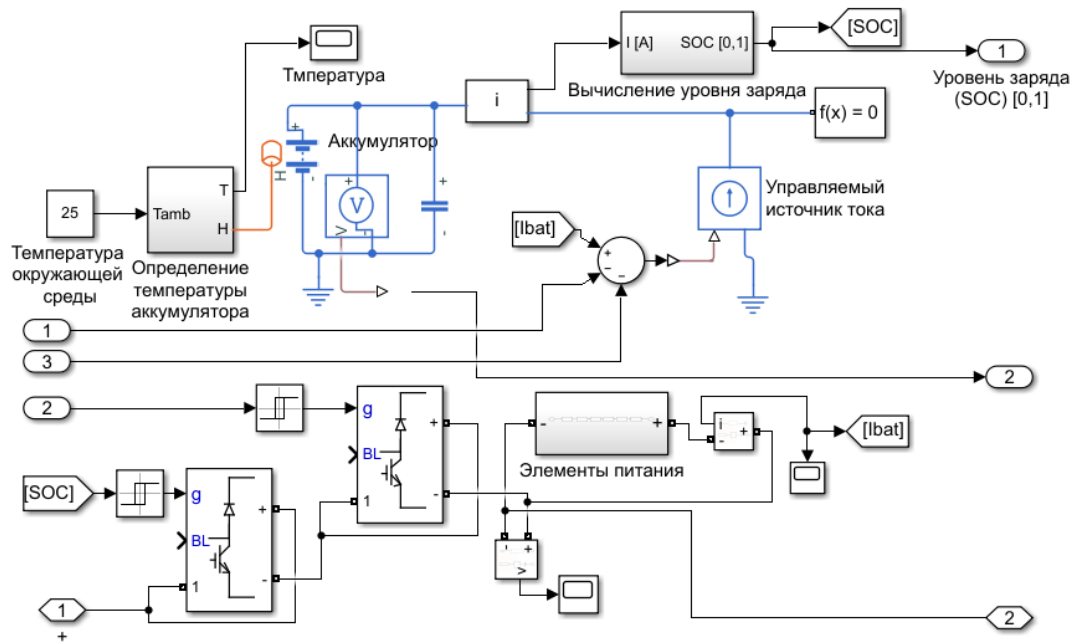


Рис. 4. Модель высоковольтного аккумулятора.

Система двигатель на органическом топливе - газогенератор достаточно инерционна, вследствие инерционности изменения производительности газогенератора по газу. К тому же газогенераторы работают стабильно и с максимальным КПД в определенном номинальном режиме. Таким образом, расход

газа, поступающего в двигатель, должен находиться в определенном диапазоне. В данных условиях динамическое регулирование мощности двигателя в соответствии с нагрузкой на валу затруднено.

Для решения данной проблемы в стационарных энергоустановках возможно накопление генераторного газа в ресивере со сжатием газа компрессором или без. Использование ресивера увеличивает металлоемкость, что не желательно для передвижной установки. Для уменьшения потерь избыточного количества энергии при резком снижении нагрузки можно аккумулировать её при помощи маховика, соединенного с валом генератора напрямую, либо через гидромуфту. Избыточную энергию можно аккумулировать в виде электрической энергии с помощью литий-полимерных и других аккумуляторов, а также суперконденсаторов (ионисторов).

Помимо питания системы независимого возбуждения, аккумулятор также используется для питания двигателей вентиляторов газогенератора и двигателя шнекового питателя во время запуска энергомодуля и вывода его на номинальную производительность по газу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Режимы работы установки

Режим работы энергетического модуля зависит от режима работы технологической машины, в данном примере мобильной рубительной машины. Было выполнено имитационное моделирование рабочего цикла системы энергетический модуль – мобильная

рубительная машина продолжительностью 3600 с. Рабочий цикл состоит из запуска энергомодуля из холодного состояния и работы с переменной нагрузкой. Заполнение газогенератора щепой с помощью шнековых питателей, прогрев и выход на номинальную производительность по газу происходит в течение 292 секунд, затем запускаются в работу генератор и основной двигатель. Затем мобильная рубительная машина начинает работу по измельчению древесины, периодически передвигаясь по лесосеке. К завершению цикла контейнер машины со щепой полностью заполняется, машина движется для разгрузки и выгружает щепу из контейнера.

На рисунке 5 представлены графики изменения во времени параметров двигателя постоянного тока мобильной рубительной машины. Из графиков видно, что при заданном режиме работы с переменной нагрузкой ток якоря меняется скачкообразно в соответствии с изменяющимся моментом. Напряжение якоря стабильно, возрастает в начальный момент пуска генератора. Во время всего рабочего цикла напряжение стабильно, амплитуда изменения напряжения не более 4% от номинального. Не смотря на скачкообразно изменяющуюся нагрузку на валу двигателя рубительной машины, амплитуда изменения скорости двигателя не более 10% от номинальной скорости. Изменение электрического КПД повторяет изменение момента нагрузки на валу двигателя.

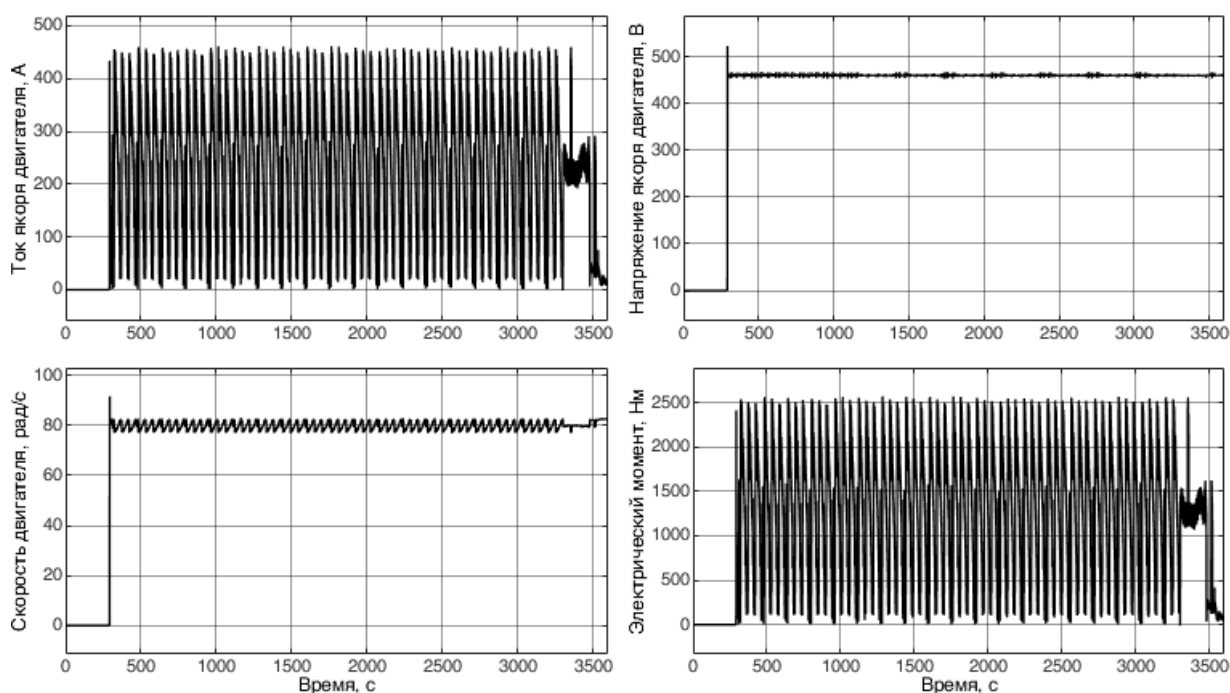


Рис. 5. Графики изменения во времени тока и напряжения якоря двигателя, его скорости и электрического момента.

Для обеспечения автономной работы энергетического модуля была установлена минимальная необходимая емкость аккумулятора. Для этого были получены графики изменения уровня заряда аккумулятора при различной емкости. Пример такого графика представлен на рисунке 6. В результате было установлено, что емкость 12 А·ч является минимально необходимой для запуска энергетического модуля из

холодного состояния. На рисунке 6 видно, что при начальном уровне заряда аккумулятора 80% от номинального уровень заряда снизится до 56%. Дальнейшее снижение уровня заряда приведет к большему падению напряжения. Поэтому для заданного режима работы установки рекомендуемая емкость аккумулятора более 12 А·ч. После запуска системы

аккумулятор полностью заряжается от тока якоря генератора.

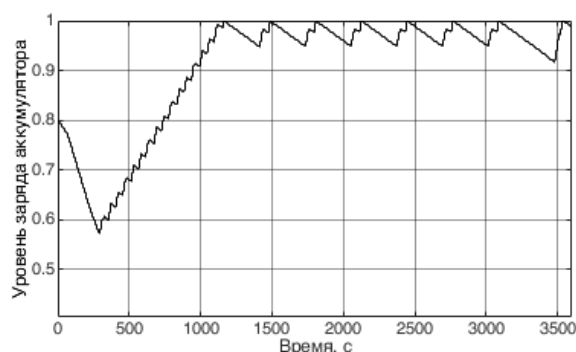


Рис. 5. Изменение уровня заряда аккумулятора емкостью 12 А·ч.

Таблица 1. Основные параметры энергетического модуля и двигателя лесосечной машины

Наименование параметра	Единица измерения	Значение	Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Генератор постоянного тока			Двигатель лесосечной машины		
Мощность	кВт	250	Мощность	кВт	200
КПД	%	92,7	Номинальное количество оборотов	рад/с	78,5
Ток генератора	А	477	Напряжение якоря номинальное	В	440
Напряжение генератора	В	460	Ток якоря номинальный	А	470
Частота вращения вала	рад/с	150	Сопrotивление якоря	Ом	0,02271
Сопrotивление генератора	Ом	0,0762	Индуктивность якоря	Гн	0,00119
Индуктивность якоря	Гн	0,00042	Напряжение возбуждения	В	85
Напряжение возбуждения генератора	В	85	Момент инерции	кг*м ²	16,02
Сопrotивление обмотки возбуждения	Ом	5,65	Индуктивность	Гн	0,1912
Индуктивность	Гн	9,54	Газогенератор		
Момент инерции	кг·м ²	12,018	Номинальная производительность по влажному генераторному газу при относительной влажности щепы 30%	кг/с	0,16
Масса	кг	3715	Низшая теплота сгорания рабочей массы	кДж/кг	12261
Высоковольтный аккумулятор			Низшая теплота сгорания влажного генераторного газа	кДж/кг	4162
Номинальное напряжение заряда	В	460	Температура процесса газификации	°С	600
Номинальное напряжение ячейки аккумулятора	В	96	Объём активной зоны газификатора	м ³	0,216
Емкость	А·ч	12	Масса щепы в бункере газогенератора	кг	480

В качестве показателя энергетической эффективности энергетического модуля был определен удельный расход первичного топлива (щепы) на 1 кВт·ч выработанной генератором электрической энергии. Средний удельный расход щепы начальной относительной влажностью 30% в газогенераторе за первый час работы установки составил 2,448 кг/кВт·ч. Это значение уменьшается при дальнейшей работе энергетического модуля, поскольку максимальный рас-

Разработанная имитационная модель позволяет смоделировать любой режим работы установки и подобрать необходимую емкость аккумулятора.

3.2. Параметры установки

Основные параметры энергетического модуля с двигателем на генераторном газе для автономного энергообеспечения лесосечных машин представлены в таблице 1. В результате имитационно моделирования доказана работоспособность установки при данных параметрах.

ход топлива наблюдается при запуске. При непрерывной работе системы машин в течение 4 часов средний удельный расход щепы составляет 2,217 кг/кВт·ч. Суммарный расход щепы за первый 1 час работы установки составил 273,7 кг, за 4 часа работы 1044 кг.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования были определены основные параметры энергетического модуля для автономного энергообеспечения лесосечной машины. При помощи имитационно моделирования была проверена работоспособность установки при данных параметрах. Также в результате имитационного эксперимента была установлена минимальная емкость аккумулятора при данных параметрах установки и режима работы. Был определен удельный расход первичного древесного топлива на 1 кВт производимой генератором электрической энергии в течение первого часа работы установки и в течение первых четырех часов непрерывной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карпачев С.П., Запруднов В.И., Быковский М.А.** Моделирование работы мобильной рубительной машины с мягкими контейнерами // Лесной вестник, 2019. Т. 23. № 3. С. 79–86.
2. **Мальшева Н.В., Филипчук А.Н., Золина Т.А., Сильнягина Г.В.** / Лесохоз. информ., 2019. № 1. С. 101–128.
3. **Кольниченко Г.И., Лавриченко В.А., Тарлаков Я.В., Сиротов В.А.** Использование топливной древесины в условиях распределенной энергетики // Лесной вестник, 2020. Т. 24. № 2. С. 74–80.
4. **Рамадан А., Денисов Р.С.** Моделирование автономных энергокомплексов на основе ВИЭ для изолированных потребителей в среде MATLAB SIMULINK // Вестник аграрной науки Дона, 2017. Т. 3. №39. С. 10–20.
5. **Tan S., Geng H., Yang G., Wang H., Blaabjerg F.** Modeling framework of voltage-source converters based on equivalence with synchronous generator // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018. N 6. P. 1291–1305.
6. **Mehrjerdia H., Hemmati R.** Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks // Journal of Cleaner Production, 2019. V. 234. P. 810-821.
7. **Анисимов П.Н., Онучин Е.М., Медяков А.А.** Аналитико-имитационная модель функционирования системы автономного энергообеспечения от двигателя внешнего сгорания на древесном топливе измельчающе-транспортной машины для производства щепы // Инженерный вестник Дона, 2019. Т. 57. - № 6. - С. 39.
8. **Anisimov P.N., Medyakov A.A.** Development of an autonomous energy supply system for harvesting wood resources based on wood fuel // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 315. N 5. P. 052058.

И.М. Бернадинер, П.В. Хорева, В.А. Екимова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД

АННОТАЦИЯ

Одной из крупнейших экологических проблем РФ является загрязненность территории отходами. В работе акцент сделан на отходах, образованных в процессе очистки городских сточных вод, – канализационные илы и осадки сточных вод (ОСВ). Дефицит площадей остро поставил вопрос ликвидации данных отходов. Основным методом ликвидации является высокотемпературное сжигание. Сложный процесс ликвидации требует предварительных теплотехнических исследований ОСВ.

В научной работе были произведены газоаналитические исследования дымовых газов, воспроизведен экспериментальный процесс предварительной сушки ОСВ и произведены калориметрические испытания конкретных образцов осадков с пересчетом на низшую теплоту сгорания.

1. ВВЕДЕНИЕ

Осадки городских сточных вод имеют большие объёмы, очень высокую влажность, неоднородный состав и свойства, содержат органические вещества, способные быстро разлагаться и гнить. Основное преимущество высокотемпературной ликвидации ОСВ заключается в значительном снижении их массы (примерно на 75%) и объема (до 90%), что особенно важно в условиях дефицита свободных площадей для организации полигонов и свалок. При сжигании разлагаются многие опасные органические соединения, а использование образующейся теплоты для производства электроэнергии и золошлаковых остатков для производства некоторых материалов может частично возместить затраты на переработку отходов. Данные теплотехнические исследования позволят грамотно и рационально организовать дальнейшие процессы утилизации и ликвидации отходов.

2. ИССЛЕДОВАНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ СЖИГАНИЯ ОБРАЗЦОВ ОСВ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА

2.1. Общие сведения

В данной научной работе были выполнены экспериментальные исследования по изучению и анализу состава отходящих газов на содержание O_2 , CO , CO_2 , NO_x и показателя избытка воздуха после

термического обезвреживания ОСВ с 4 разных станций аэрации Москвы и Московской области. В работе использовался газоанализатор модели «MRU Vario Plus», представленный на рис. 1. Газоанализатор Vario Plus – полустационарная мониторинговая многофункциональная система для проведения измерений в промышленности. Применяется при производстве стекла, кирпича, керамики, для наладки горелок, дизель - генераторов и котлов любых размеров, работающих на любом виде топлива - газообразном, жидком и твердом. Прибор может проводить измерения в автоматическом режиме в течение нескольких дней.

Функции газоанализатора:

- Длительные измерения и контрольные испытания промышленных установок;
- Режимные испытания и пусконаладка газовых жидкотопливных горелок;
- Анализ выбросов топливосжигающих устройств всех типов;
- Совмещение инфракрасных технологий и электрохимических сенсоров, что дает наивысшую точность результатов измерений [1].



Рис. 1. Газоанализатор «MRU Vario Plus», представленный на кафедре ЭВТ НИУ «МЭИ»

В электрической печи «Nabertherm HT 04/17», представленной на 1 этаже кафедры Энергетики высокотемпературной технологии (ЭВТ) НИУ «МЭИ», производился нагрев образцов с 40 °С до 1000 °С. Время каждого эксперимента составило 1 час 40 минут [2]. В таблице 1 представлены исходные данные составов образцов осадков.

Таблица 1. Исходный состав влажного осадка, %

№ осадка	Источник осадка	Состав рабочей массы, %						
		W ^P	A ^P	H ^P	C ^P	N ^P	O ^P	S ^P
I	Станция аэрации г. Зеленограда	6,31	82,19	1,23	6,62	0,61	2,83	0,21
II	Люберецкая станция аэрации	92,0	1,94	0,51	3,61	0,31	1,59	0,04
III	Станция аэрации Южное Бутово	90,0	3,62	0,51	3,7	0,44	1,65	0,08
IV	Курьяновская станция аэрации	87,0	6,61	0,43	3,55	0,36	1,94	0,11

Примечания:

Пробы осадков г. Москвы взяты из первичного отстойника, представляют собой жидкотекучую взвесь. Проба осадка г. Зеленограда взята после решетки грубой очистки (смесь с песком). Представляет собой практически сыпучий порошок (или подсушенную пасту). Значения влажности были определены экспериментально на кафедре ХиЭЭ НИУ «МЭИ» с помощью сушильного шкафа SNOL 58/350.

2.2. Исследования образца с Зеленоградской станции аэрации

В таблице 2 представлены исходные массы тигля и осадка, а также полученная масса золы после высокотемпературного обезвреживания ОСВ.

Таблица 2. Показатели массы первого образца, г

M _T	M _{T+осв}	M _{осв}	M _{T+золы}	M _{золы}
16,8	28,1	11,3	26,4	9,6

В ходе исследовательской работы были произведены 13 измерений состава дымовых газов газоанализатором. Данные по составу дымовых газов после сжигания осадка с Зеленоградских очистных сооружений представлены в таблице 3.

В ходе первого эксперимента выявлено, что максимальный выход CO и CO₂ приходится на 370 °С, а к 800 °С выделение CO прекращается вовсе, что приводит к полному окислению органической части образца.

Таблица 3. Состав дымовых газов после сжигания ОСВ с Зеленоградских очистных сооружений

	t	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	Изб.воз.
	°С	%	%	ppm	ppm	ppm	
1	130	21	0	3	0	0	-
2	200	20,9	0,1	143	2	2	60,5
3	300	20,2	0,6	0,141%	6	6	26,98
4	370	19,6	1,3	0,252%	11	10	15,85
5	400	19,7	1,2	0,207%	8	7	17,23
6	500	19,9	1,1	0,072%	9	8	19,57
7	560	20,3	0,9	177	14	16	23,68
8	600	20,2	0,9	70	18	17	26,32
9	700	20,3	0,7	14	20	19	30,07
10	740	20,3	0,8	6	14	14	31,22
11	800	20,3	0,9	0	10	10	31,38
12	900	20,3	0,6	0	10	10	31,73
13	1000	20,3	0,4	0	10	10	31,35

2.3. Исследования образца с Люберецких очистных сооружений

В таблице 4 представлены исходные массы тигля и осадка, а также полученная масса золы после высокотемпературного обезвреживания ОСВ.

Таблица 4. Показатели массы второго образца, г

M _T	M _{T+осв}	M _{осв}	M _{T+золы}	M _{золы}
18,6	32,1	13,5	19,1	0,5

В ходе исследовательской работы были произведены 13 измерений состава дымовых газов газоанализатором. Данные по составу дымовых газов после сжигания осадка с Люберецких очистных сооружений представлены в таблице 5.

В ходе второго эксперимента выявлено, что максимальный выход CO и CO₂ приходится на 400 °С, CO₂ на 500 °С, а к 800 °С выделение CO временно прекращается, но с 900 °С до 1000 °С идет догорание оставшейся органической части осадка.

Таблица 5. Состав дымовых газов после сжигания ОСВ с Люберецких очистных сооружений

	t	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	Изб.воз.
	°C	%	%	ppm	ppm	ppm	
1	130	20,9	0,1	0	1	1	-
2	200	20,9	0,2	3	1	1	0
3	300	20,8	0,2	493	6	6	0
4	370	20,3	0,5	0,23%	13	13	32,79
5	400	20,0	0,9	0,379%	25	24	20,03
6	500	19,5	2,1	0,094%	44	42	14,2
7	560	19,9	1,6	109	48	45	19,79
8	600	20,1	1,5	54	49	46	23,77
9	700	20,3	0,5	8	22	21	31,8
10	740	20,5	0,3	2	14	13	45,65
11	800	20,6	0,1	0	9	9	31,38
12	900	19,8	0	3	11	10	31,73
13	1000	20,6	0	20	14	13	31,35

2.4. Исследования образца с Южно-Бутовских очистных сооружений

В таблице 6 представлены исходные массы тигля и осадка, а также полученная масса золы после высокотемпературного обезвреживания ОСВ.

Таблица 6. Показатели массы третьего образца, г

М _т	М _{т+осв}	М _{осв}	М _{т+золы}	М _{золы}
17,4	34,2	16,8	17,8	0,4

В ходе исследовательской работы были произведены 13 измерений состава дымовых газов газоанализатором. Данные по составу дымовых газов после сжигания осадка с Южно-Бутовских очистных сооружений представлены в таблице 7.

В ходе третьего эксперимента выявлено, что максимальный выход CO и приходится на 500 °C, CO₂ на 560 °C, а к 740 °C выделение CO прекращается вообще, что приводит к полному окислению органической части образца.

Таблица 7. Состав дымовых газов после сжигания ОСВ с Южно-Бутовских очистных сооружений

	t	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	Изб.воз.
	°C	%	%	ppm	ppm	ppm	
1	130	20,9	0,2	0	1	1	0
2	200	20,9	0,2	1	1	1	0
3	300	20,9	0,2	40	3	3	0
4	370	20,8	0,2	329	7	6	0
5	400	20,6	0,3	0,113%	14	13	58,7
6	500	20,4	0,8	0,227%	35	33	35,64
7	560	19,4	2,6	0,061%	68	64	13,43
8	600	19,7	1,8	50	19	18	17,32
9	700	20,2	1	3	22	21	31,8
10	740	20,3	0,8	0	11	10	29,67
11	800	20,3	0,5	0	9	9	34,24
12	900	20,6	0,2	0	7	7	60,97
13	1000	20,7	0,1	0	9	9	0

2.4. Исследования образца с Курьяновских очистных сооружений

В таблице 8 представлены исходные массы тигля и осадка, а также полученная масса золы после высокотемпературного обезвреживания ОСВ.

Таблица 8. Показатели массы четвертого образца, г

М _т	М _{т+осв}	М _{осв}	М _{т+золы}	М _{золы}
17,4	38,8	11,4	17,7	0,3

Таблица 9. Состав дымовых газов после сжигания ОСВ с Курьяновских очистных сооружений

	t	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	Изб.воз.
	°C	%	%	ppm	ppm	ppm	
1	130	20,9	0,1	0	1	1	-
2	200	20,9	0,2	2	2	2	0
3	300	20,7	0,3	258	6	6	0
4	370	20,6	0,4	545	9	9	55,9
5	400	20,4	0,4	0,1295%	14	14	39,38
6	500	19,9	1,2	0,092%	40	38	20,83
7	560	20,2	0,9	88	58	56	26,45
8	600	20,3	0,6	32	39	31	32,4
9	700	20,6	0,2	9	12	12	52,35
10	740	20,6	0,2	6	8	8	62,89
11	800	20,7	0,1	0	7	7	-
12	900	20,6	0,1	0	6	6	-
13	1000	20,6	0,1	0	6	6	-

Вывод: Полученные данные необходимы для принятия решения об эффективности и целесообразности сжигания и последующей очистки дымовых газов от вредных примесей. Основное выделение угарного газа (CO) от обезвреживания ОСВ попадает в промежутки температур 370-500 °C, что представлено на рис. 2.

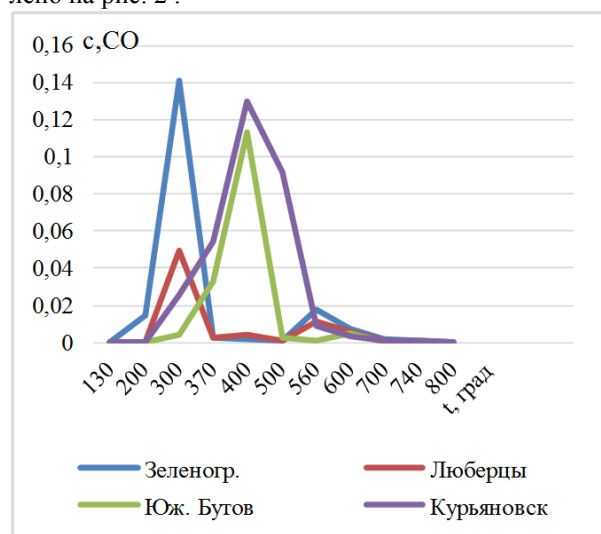


Рис. 2. График зависимости концентраций CO от температуры нагрева

В ходе исследовательской работы были произведены 13 измерений состава дымовых газов газоанализатором. Данные по составу дымовых газов после сжигания осадка с Курьяновских очистных сооружений представлены в таблице 9.

В ходе четвертого эксперимента выявлено, что максимальный выход CO и приходится на 400 °C, CO₂ на 500 °C, а к 800 °C выделение CO прекращается вовсе, что приводит к полному окислению органической части образца.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СУШКИ ОСВ

3.1. Общие сведения

Термическая сушка представляет собой технологию, которая направлена на резкое снижение влажности осадка сточных вод. Сушка в основном используется на крупных очистных сооружениях для увеличения теплотворной способности осадка при его последующем сжигании. Возможна сушка в случае использования осадка в сельском хозяйстве, однако этот способ используется нечасто в связи с высокой стоимостью. Испарение влаги из обработанного и обезвоженного осадка приводит к увеличению содержания сухого вещества, сокращению объема и массы осадка. Содержание сухого вещества в обезвоженном осадке до сушки, как правило, составляет 20–30%, после сушки – 50–90% [3].

Термическая сушка обычно включает в себя этап загрузки и выгрузки осадка, а также промежуточного хранения. Ей предшествует обезвоживание и накопление осадка в бункере. Для термосушки требуется оборудование для выработки и распределения тепла, термосушилка, биологический фильтр для очистки топочных газов, устройство последующей обработки

(например, установка для гранулирования) и хранить конечного продукта.

В исследовательской работе использовалась низкотемпературная печь Snol 58/350 (рис. 3) с принудительной воздушной конвекцией, представленная на кафедре Химии и Электрохимической Энергетики (ХиЭЭ) НИУ «МЭИ».



Рис. 3. Низкотемпературная печь Snol 58/350 с принудительной воздушной конвекцией

3.2. Экспериментальные исследования термической сушки

Термическая сушка осадка обычно является заключительным этапом обработки осадка или этапом подготовки осадка к ликвидации путем его сжигания. В процессе сушки происходит обеззараживание и уменьшение массы осадков сточных вод. В данной исследовательской работе использовались четыре образца осадков сточных вод с очистных сооружений Москвы и Московской области, исходные массы представлены в таблице 10. В низкотемпературной печи Snol 58/350 проводилось аналитическое исследование сушки ОСВ в исследовательской лаборатории. Образцы осадков нагревались до 150 градусов Цельсия и каждые 30 минут измерялась масса ОСВ на электронных весах Adventurer, результаты эксперимента представлены на таблице 11.

Таблица 10. Исходные массы ОСВ и чаши, г

№	1	2	3	4
Мчашки	17,793	18,003	18,675	17,644
Мчашки+осв	31,226	31,026	38,104	29,116
Мосв, г	13,433	13,023	19,429	11,472

Образец №1, с Зеленоградских очистных сооружений обладал большим количеством взвешенных (грубодисперсных) примесей (песок), уже в середине эксперимента показания массы перестали давать динамику изменений. Процент оставшегося осадка после сушки составил 93,695%, удалось выпарить лишь 6,305% влаги (таблица 12). Люберецкий образец (№2) за первые 30 минут эксперимента потерял почти 43,554% влаги и за последующие 4 часа эксперимента еще 48,360%. Осадок из Южно-Бутовских

(№3) очистных сооружений показал более равномерные показатели изменения массы, что в итоге привело к потере 90,427% влаги. Обезвоживание Курьяновских ОСВ (№4) позволило снизить влажность осадка на 87,431%, эксперимент занял 120 минут.

Таблица 11. Изменение массы образцов ОСВ в течение сушки, г

Время	Мосв 1, г	Мосв 2, г	Мосв 3, г	Мосв 4, г
Исх. М	13,433	13,023	19,429	11,472
0,5 ч	12,586	5,672	11,669	4,51
1 ч	12,58	2,073	7,4	2,046
1,5 ч	12,571	1,09	4,064	1,455
2 ч	12,571	1,073	2,405	1,442
2,5 ч	-	1,068	1,892	1,442
3 ч	-	1,063	1,872	-
3,5 ч	-	1,06	1,867	-
4 ч	-	1,057	1,863	-
4,5 ч	-	1,053	1,86	-

Процентное соотношение выпаренной влаги и сухого остатка представлено в таблице 12.

Таблица 12. Процентное соотношение высушенного осадка и выпаренной влаги

	1	2	3	4
% сухого осадка	93,695	8,086	9,573	12,569
% выпаренной влаги	6,305	91,914	90,427	87,431

Вывод: После термического воздействия осадок представляет собой сухой, не загнивающий сыпучий материал свободный от вредных патогенных микроорганизмов и готовый дальнейшим calorиметрическим испытаниям [4].

4. КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОСВ

4.1. Общие сведения

Для правильной организации и расчета процессов термической обработки необходимо знание теплоты сгорания осадков сточных вод. Теплота сгорания или калорийность является основной теплотехнической характеристикой топлива, определяет его энергетическую ценность и представляет собой количество теплоты, выделяющейся в ходе химических реакций окисления горючих компонентов топлива газообразным кислородом.

В данном эксперименте для определения теплоты сгорания четырех образцов ОСВ использовался calorиметр модели ИКА С2000 basic Version 2, представленный на кафедре ЭВТ НИУ «МЭИ» (рис. 4).

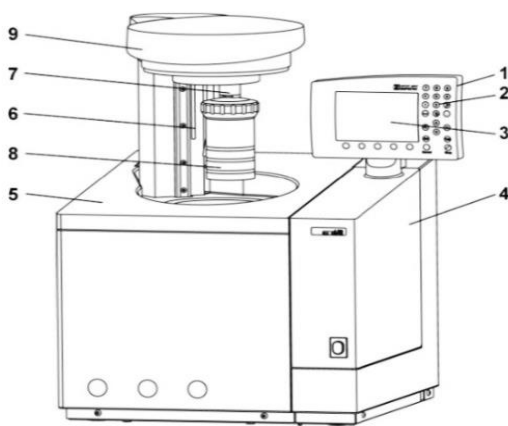


Рис. 4. Калориметр модели IKA C2000 basic Version 2: 1 – контроллер; 2 – клавиатура; 3 – дисплей; 4 – блок электроники; 5 – измерительная ячейка; 6 – датчик температуры; 7 – устройство для заливки кислорода; 8 – сосуд для разложения; 9 – крышка измерительной ячейки.

Калориметрическая бомба состоит из толсто-стенного герметичного цилиндра (8), выполненного

из специальной кислотоупорной стали и окруженного теплозащитной водяной рубашкой (ее объем точно отмерян). В этот цилиндр кладут образец топлива, через подведенную к крышке трубку (7) он заполняется кислородом под давлением 25-30 атмосфер. Образец с топливом (его масса точно известна) находится в чашечке из кварца или платины, которая стоит на стержне, закрепленном на крышке. Этот стержень вместе с образцом топлива и трубкой составляют единую электроцепь. Когда по ней пропускают ток, топливо сгорает. Энергия, выделяющаяся в результате горения образца, передается водяной рубашке. В ходе эксперимента измеряют повышение температуры водяной рубашки, которое обычно не превышает 1-2 градусов [5].

4.2. Экспериментальные калориметрические исследования образцов ОСВ

Эксперимент проводился на предварительно высушенный осадок. Состав предварительно высушенных осадков представлен в таблице 13.

Таблица 13. Исходный состав сухого осадка, %

№ осадка	Источник осадка	Состав рабочей массы, %						
		W ^P	A ^P	H ^P	C ^P	N ^P	O ^P	S ^P
I	Станция аэрации г. Зеленограда	0	87,7	1,31	7,06	0,69	3,02	0,22
II	Люберецкая станция аэрации	0	24,3	6,36	45,2	3,78	19,98	0,38
III	Станция аэрации Южное Бутово	0	36,19	5,1	36,98	4,44	16,53	0,76
IV	Курьяновская станция аэрации	0	51,0	3,28	27,44	2,44	15,0	0,84

Первоначально были произведены 4 измерения массы образцов на лабораторных электронных весах VIBRA SJ-2200CE (таблица 14).

Таблица 14. Исходная масса образцов осадка, г

Мосв 1	Мосв 2	Мосв 3	Мосв 4,
3,5	0,9	0,8	0,9

В ходе исследовательской работы были полученные данные теплоты сгорания четырех образцов ОСВ Москвы и Московской области, представленные в таблице 15.

Таблица 15. Экспериментальные данные теплоты сгорания образцов, МДж/кг

Q ₆₁	Q ₆₂	Q ₆₃	Q ₆₄
-	16,086	17,918	13,177

Вывод: из-за большого количества грубых примесей (песка) и малого содержания органической части в первом образце (осадок с Зеленоградских очистных сооружений) эксперимент не дал никакого результата. В ходе эксперимента, наивысшая теплота сгорания выявилась у осадков Южно-Бутовских очистных сооружений, равна 17,918 МДж/кг [6].

4.3. Пересчет теплоты сгорания по бомбе на низшую теплоту сгорания

Низшая теплота сгорания:

$$Q_n = Q_6 - 24,42(8,94H + W), \quad (1)$$

где 24,42 – теплота парообразования при температуре измерения 25 °С из расчета на 1% выделившейся воды, кДж/кг;

8,94 – коэффициент пересчета массовой доли водорода на воду;

H – массовая доля водорода в аналитической пробе топлива;

W – массовая доля воды в испытуемом продукте.

Таблица 16. Пересчет теплоты сгорания образцов по бомбе на высшую теплоту сгорания, МДж/кг

Q _{n1}	Q _{n2}	Q _{n3}	Q _{n4}
-	14,697	16,804	12,461

Полученные расчетные данные по результатам эксперимента отражают реальные показатели низшей теплоты сгорания образцов осадков сточных вод. В среднем значение калорийности осадка (трех удачных образцов) варьируется около 15 МДж/кг.

На рисунке 5 приведена сравнительная диаграмма значений теплоты сгорания различных топлив с полученным усредненным значением теплоты сгорания ОСВ.

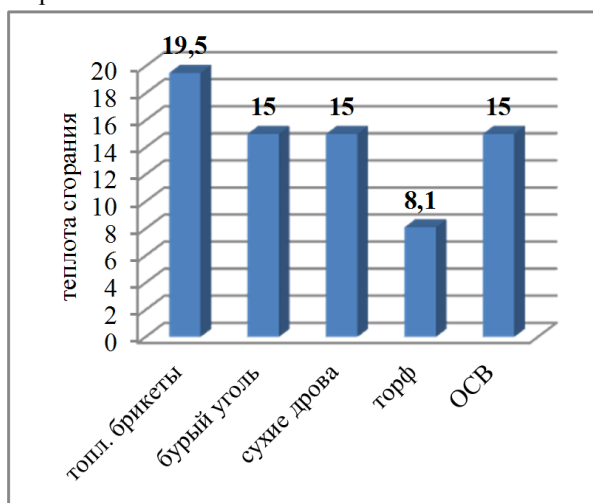


Рис. 5. Сравнительная диаграмма показателей теплоты сгорания некоторых топлив, МДж/кг

Вывод: Сравнительная диаграмма на рисунке 5 показательно демонстрирует конкурентное преимущество теплотворной способности осадков перед такими видами топлива, как торф, сухие дрова и некоторые виды бурых углей.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведенные на кафедре ЭВТ НИУ «МЭИ» исследования осадков сточных вод Москвы и Московской области направлены на последующую организацию высокотемпературной ликвидации отходов.

Анализ дымовых газов показывает максимальный выход угарного и других вредоносных газов. Данные показатели необходимы для дальнейшей оценки воздействия на окружающую среду и организации правильной и эффективной системы фильтрации.

Высокотемпературная сушка – это неотъемлемый этап подготовки осадков к утилизации и ликвидации. Опытным путем показано, что основной процент влаги осадок потерял в первый час эксперимента.

Экспериментальные calorиметрические исследования выявили энергетическую ценность каждого из образцов ОСВ или доказали неспособность состава к горению (осадок с Зеленоградских очистных сооружений). Средняя теплота сгорания остальных трех образцов приближается к 15 МДж/кг.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

W^P — влажность на состав рабочей массы ОСВ, %;
 A^P — зольность на состав рабочей массы ОСВ, %;
 H^P — количество водорода на состав рабочей массы, %;
 C^P — количество углерода на состав рабочей массы, %;
 N^P — количество азота на состав рабочей массы, %;
 O^P — количество кислорода на состав рабочей массы, %;
 S^P — количество серы на состав рабочей массы, %;
 M_T — масса тигля, г;
 $M_{T+ОСВ}$ — масса тигля с ОСВ, г;
 $M_{ОСВ}$ — масса ОСВ, г;
 $M_{T+ЗОЛЫ}$ — масса тигля с золой, г;
 $Q_{би}$ — теплота сгорания i -го образца по бомбе, МДж/кг;
 $Q_{би}$ — низшая теплота сгорания i -го образца, МДж/кг.

Индексы:

i — порядковый номер образца ОСВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прогресс** Инжиниринг. [Электронный ресурс]. URL: https://proengineering-spb.ru/product_30589.html
2. **Екимова В.А.** Экспериментальные исследования концентрации СО в дымовых газах при сжигании осадков сточных вод / В.А. Екимова, И.М. Бернадинер, П.В. Хорева // Двадцать пятая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов. – Москва, 14 – 15 марта 2019. – ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2019. С. 623.
3. **Реконструкция** сооружений обработки осадков сточных вод на очистных сооружениях канализации города Хабаровска / П.А. Бурьев, М.Н. Шевцов // Журнал: Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. Хабаровск.: Изд-во Тихоокеанский государственный университет. 2019. Т. 1. № 3. С. 276-279.
4. **Екимова В.А.** Экспериментальная термическая сушка образцов осадков сточных вод / В.А. Екимова, И.М. Бернадинер, П.В. Хорева // Двадцать шестая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: Тезисы докладов. – Москва, 12 – 13 марта 2020. – ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 601.
5. **Калориметрическая бомба.** [Электронный ресурс]. 2016. URL: <http://minregion.ru/science/1707-kalorimetricheskaya-bomba.html>
6. **Екимова В.А.** Экспериментальное изучение свойств осадков сточных вод (ОСВ) В.А. Екимова, И.М. Бернадинер, П.В. Хорева // Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия – 2020»: Материалы конференции. – Иваново. 2020. С. 106.

В.Д. Ванюшкин, С.К. Попов, А.А. Валинеева

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОКСОВОГО ОСТАТКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ

АННОТАЦИЯ

Доклад посвящен разработке и реализации расчетно-экспериментального метода определения свойств коксового остатка (мелкодисперсного продукта пиролиза отходов шин) для создания ресурсосберегающей пиролизной установки. Метод основан на использовании физического эксперимента, статистической обработки данных и математического моделирования. Произведена оценка возможности использования теории регулярного теплового режима в рамках рассматриваемой задачи. На основе анализов экспериментальных данных выделены сначала два, а потом три температурных интервала. В каждом интервале найдена линейная зависимость теплопроводности засыпки от температуры. Коэффициенты функций определены посредством минимизации функции отклика при использовании метода Бокса-Уилсона. Разработанный метод позволяет определять теплофизические свойства коксового остатка, которые могут использоваться для разработки эффективного теплообменника-охладителя этого вещества.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации отходов автомобильных шин является актуальной во всем мире. К числу перспективных термохимических методов переработки отходов шин относятся окислительная конверсия (газификация) с использованием различных кислородсодержащих окислителей, а также безокислительная конверсия (пиролиз). Продуктами термохимической переработки являются (в различных массовых долях в зависимости от параметров процесса) жидкое топливо, неконденсирующаяся газообразная фракция, служащая вторичным топливом, и твердая фракция – коксовый остаток или технический углерод [1 – 3]. Исследован и доведен до промышленной реализации процесс паровой конверсии отходов шин в шнековом реакторе [3 – 6]. Имеются возможности получить жидкое топливо, близкое по характеристикам к дизельному [7], повысить товарную ценность жидкой и твердой фракции продуктов пиролиза [8, 9]. Выполнен ряд исследований процесса пиролиза измельченных отходов шин, в том числе с различными добавками углеродсодержащих материалов [7, 10 – 16].

Непрерывный процесс пиролиза измельченных отходов шин реализуется, например, во вращающихся барабанных печах. Охлаждение твердых продуктов пиролиза в таком процессе может стать лимитирующим фактором для работы установки. Выгрузка коксового остатка при повышенных температурах с охлаждением на открытом воздухе может приводить к выгоранию. В экспериментах [17] наблюдалось выгорание слоя коксового остатка в начальной стадии охлаждения не на свободной поверхности слоя, а на глубине до 10 мм.

Для разработки эффективного теплообменника-охладителя коксового остатка необходимо знание его физических свойств. Определение плотности и порозности мелкодисперсного коксового остатка реализуется сравнительно несложно [17], удельную теплоемкость можно принять равной удельной теплоемкости углерода. Наибольшую проблему составляет определение теплопроводности коксового остатка в температурном диапазоне до 500 °С – температуры выгрузки из пиролизной печи.

В докладе представлены результаты разработки и реализации метода определения теплопроводности, сочетающего физический эксперимент, статистическую обработку данных.

2. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Физическое моделирование охлаждения твердых продуктов пиролиза выполнено в лаборатории кафедры Энергетики высокотемпературной технологии (ЭВТ) Национального исследовательского университета «МЭИ» (г. Москва) на экспериментальном стенде, включающем в себя измерительную камеру, туннельную печь, систему измерений, автоматизированного сбора и обработки информации.

Для моделирования условий охлаждения слоя коксового остатка использована измерительная камера – стальная ёмкость с установленными термоэлектрическими преобразователями (K-type), заполняемая исследуемым веществом. Высота слоя составляла 70 мм. Спаи трех термопар размещались вблизи осевой вертикальной плоскости на расстоянии от дна камеры соответственно 8, 35 и 60 мм.

Экспериментальный стенд оборудован системой автоматизированного сбора и обработки информации в составе модуля ввода-вывода USB-4718-AE компании Advantech™, соединенного с персональным компьютером, и программного обеспечения Advantech Automation™, позволяющего записывать и обрабатывать сигналы до 8 термопарных каналов с различным шагом по времени.

Заполненная коксовым остатком измерительная камера устанавливалась в предварительно разогретую туннельную печь, отапливаемую природным газом. Исследуемым материалом служил мелкодисперсный технический углерод, полученный в промышленной установке пиролиза отходов шин при температуре 500 °С.

Процесс нагрева был организован так, чтобы получить приблизительно однородное температурное поле в засыпке со средней температурой в диапазоне 450 – 600 °С. Процесс охлаждения проводился на открытом воздухе после извлечения камеры из печи и размещения её на огнеупорном основании из шамотного легковеса марки ШЛ-0,4. Фиксация температур в охлаждаемом слое длилась 4 часа 5 минут.

Посредством программного обеспечения Advantech Automation™ формировался в формате Excel файл с результатами измерений каждые 5 секунд. Содержание Excel-файла импортировалось в среду Mathcad для последующего анализа.

Результаты одного из экспериментов представлены на рис. 1.

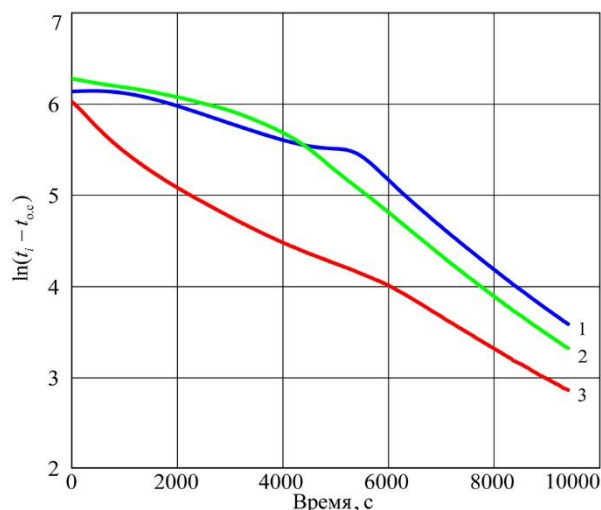


Рис. 1. Временные зависимости для логарифмов избыточных температур: 1 – средняя термопара; 2 – верхняя термопара; 3 – нижняя термопара.

Известен ряд экспериментальных методик по определению теплофизических свойств твердых тел, которые основаны на теории регулярного теплового режима [19–23].

Согласно [19, 22], необходимыми признаками регулярного теплового режима являются:

1) линейная зависимость логарифма избыточной температуры в некоторой точке тела от времени;

2) одинаковый угол наклона этих линейных зависимостей, построенных для двух точек тела.

Анализ графиков на рис. 1 приводит к выводу, что оба указанных выше признака регулярного теплового режима наблюдаются для средней и верхней термопары (кривые 1 и 2) по истечении 5500 с, когда средняя термопара показывает 260 °С.

На основе представленных данных можно вычислить темп охлаждения m_i в i -й точке тела, 1/с, по формуле:

$$m_i = \frac{\ln(t_i(\tau_1) - t_{0,c}) - \ln(t_i(\tau_2) - t_{0,c})}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1)$$

Здесь $t_i(\tau_1), t_i(\tau_2)$ – температура, показываемая i -й термопарой в моменты времени τ_1 и τ_2 ; $t_{0,c}$ – температура окружающей среды.

Если выбрать $\tau_1 = 5500$ с, $\tau_2 = 9500$ с, то темп охлаждения составит для средней термопары $m_{\text{сред}} = 4.65 \cdot 10^{-4}$ 1/с, а для верхней термопары $m_{\text{верх}} = 4.44 \cdot 10^{-4}$ 1/с. Различие незначительное – 4.5%, что позволяет принять гипотезу о равенстве темпов охлаждения в двух точках и заключить, что наблюдаемый режим охлаждения является регулярным по истечении 5500 с.

Однако в предшествующем высокотемпературном интервале от $t_{\text{нач}} = 480$ °С до 260 °С режим охлаждения иррегулярный. Следовательно, способы определения теплофизических свойств засыпки, основанные на теории регулярного теплового режима, в указанном температурном диапазоне неприменимы. Между тем этот диапазон значителен: он составляет около 50 % от общего диапазона охлаждения с $t_{\text{нач}}$ до температуры окружающей среды $t_{0,c}$.

Таким образом, необходимо применять другие подходы к определению теплофизических свойств коксового остатка (технического углерода). Перспективным представляется подход, основанный на сочетании математического моделирования и накопленных экспериментальных данных. Для реализации такого подхода разработана математическая модель измерительной камеры, воспроизводящая процесс охлаждения на открытом воздухе.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте измерительная камера размерами 120x130x80 мм с прогретой засыпкой высотой 70 мм устанавливается симметрично на огнеупорное основание. В силу симметрии условий теплообмена система имеет две вертикальные плоскости симметрии. Следовательно, при математическом моделировании в качестве расчетной области можно рассматривать четверть объема камеры и основания. Таким образом, расчетная область представляет собой два твердых тела – прямоугольных параллелепипеда,

установленных друг на друга. Нижний параллелепипед – огнеупорное основание, верхний – мелкодисперсная засыпка.

У камеры тонкие стальные стенки и днище, поэтому их толщинами и термическим сопротивлением пренебрегаем. Координаты спаев трех термопар, находящихся в слое засыпки, известны.

В плоскости соприкосновения камеры и основания – идеальный тепловой контакт. В силу симметрии ограждающие поверхности расчетной области, лежащие в плоскостях xOy и yOz , адиабатны. Нижняя поверхность основания также адиабатна. На прочих ограждающих поверхностях, контактирующих с окружающей средой, в том числе на верхней свободной поверхности засыпки, заполняющей камеру, – свободно-конвективный теплообмен.

Внутренние источники теплоты отсутствуют.

В начальный момент засыпка в камере изотермична и имеет заданную температуру в диапазоне 450 – 600 °С, а огнеупорное основание также изотермично и имеет температуру окружающей среды.

Теплофизические свойства засыпки и основания (теплопроводность, удельная теплоемкость) могут зависеть от температуры.

Таким образом, моделируемый процесс – трехмерная нестационарная теплопроводность в системе «измерительная камера – огнеупорное основание» без внутренних источников теплоты.

Численное решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности выполнено методом контрольного объема [24]. В итерационном процессе расчета температурных полей использован метод переменных направлений [24]. Программная реализация математической модели выполнена в среде Microsoft Visual C++, свободно распространяемой через интернет.

Модель дает возможность определить изменение во времени температуры засыпки в точках размещения спаев термопар при известных температурных зависимостях теплофизических свойств основания и засыпки – мелкодисперсного коксового остатка с заданной порозностью.

4. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Разработан и реализован расчетно-экспериментальный метод определения теплопроводности мелкодисперсного коксового остатка, сочетающий экспериментальное исследование процесса охлаждения и его математическое моделирование.

Основная идея метода – используя математическую модель измерительной камеры, установить на основе ее исследования теплопроводность коксового остатка, приближающую с удовлетворительной точностью расчетные температурные кривые процесса охлаждения к тем, что получены в эксперименте, во всем диапазоне исследованных температур. Погрешность определения теплопроводности оценивается

посредством среднеквадратичного отклонения Δ расчетных температур от экспериментальных в заданной точке объема коксового остатка за время проведения эксперимента:

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{экс}}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{экс}}} (t_{\text{экс}}(i) - t_{\text{расч}}(i))^2, \quad (2)$$

где $N_{\text{экс}}$ – количество точек экспериментального температурного графика, равностоящих во времени; $t_{\text{экс}}(i)$ – температура в i -й момент времени, измеренная термопарой, °С; $t_{\text{расч}}(i)$ – температура в i -й момент времени в точке размещения термопары, рассчитанная посредством математической модели, °С.

В рамках такого подхода решаемая задача может быть отнесена к классу обратных задач теплопроводности [25]. Наиболее близкой по предметной области является задача, исследованная в работе [26].

Решение обратной задачи теплопроводности в данном случае состоит в определении теплофизических свойств засыпки (при известных свойствах основания). Задача считается решенной, если значения теплофизических свойств засыпки, использованные в модели, обеспечивают минимум Δ .

Можно оценить максимальное значение величины Δ . Максимум Δ_{max} будет наблюдаться при нулевой теплопроводности засыпки. Засыпка в таком случае не охлаждается, т.е. в любой момент времени температура в любой ее точке (в том числе и в точке размещения средней термопары) равна начальной температуре $t_{\text{нач}} = 480$ °С (для кривой 1 на рис. 2). Отсюда для условий эксперимента получаем $\Delta_{\text{max}} = 257$ °С.

Экспериментальная кривая охлаждения засыпки в точке размещения средней термопары показана на рис. 2.

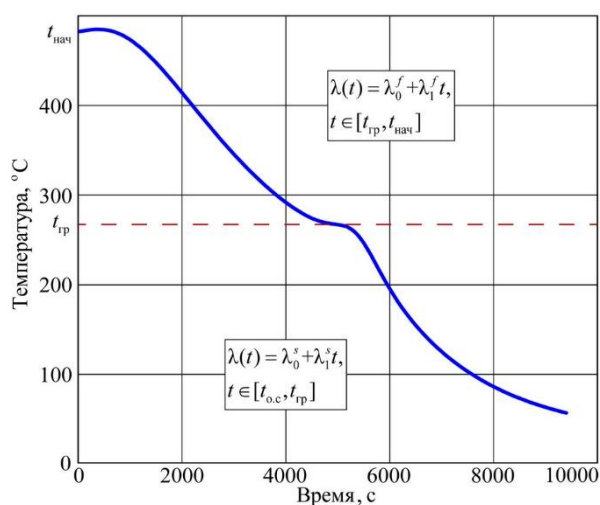


Рис. 2. Характерные участки экспериментальной кривой.

Характер кривой заметно меняется при переходе через температуру (назовем ее граничной) $t_{гр} = 270$ °С: процесс охлаждения ускоряется, т.е. темп охлаждения возрастает. Это дает основание выдвинуть гипотезу: в материале происходят при $t_{гр}$ структурные превращения, приводящие к изменению (повышению) теплопроводности в области $t < t_{гр}$. Данная гипотеза формализуется следующим образом: температурная зависимость для теплопроводности засыпки описывается совокупностью двух линейных функций в смежных диапазонах температур:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lambda_0^f + \lambda_1^f t, \quad t \in [t_{гр}, t_{нач}]; \\ \lambda(t) &= \lambda_0^s + \lambda_1^s t, \quad t \in [t_{о.с}, t_{гр}], \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты λ_0^f, λ_1^f относятся к первому (first) температурному диапазону охлаждения от $t_{нач}$ до $t_{гр}$, коэффициенты λ_0^s, λ_1^s – ко второму (second) диапазону от $t_{гр}$ до $t_{о.с}$ (рис. 2). При этом на границе диапазонов при $t = t_{гр}$ функция $\lambda(t)$ неразрывна:

$$\lambda_0^f + \lambda_1^f t_{гр} = \lambda_0^s + \lambda_1^s t_{гр}. \quad (4)$$

В уравнения (3) входят четыре неизвестных коэффициента $\lambda_0^f, \lambda_1^f, \lambda_0^s, \lambda_1^s$, однако с учетом уравнения (4) независимыми коэффициентами являются лишь три. Выберем $\lambda_0^f, \lambda_1^f, \lambda_0^s$ в качестве трех искомым независимых коэффициентов и организуем их поиск методами планирования многофакторного эксперимента и реализации «крутого восхождения» посредством математической модели измерительной камеры. Используем полный факторный эксперимент с варьированием каждого из трех факторов на двух уровнях: ПФЭ 2^3 [28]. При этом функцией отклика выбрано среднее квадратичное отклонение Δ , определяемое уравнением (2).

Реализация крутого восхождения позволяет достичь снижения функции отклика до уровня $\Delta_{мин} = 19.45$ °С, что составляет 7.6 % от максимума $\Delta_{макс}$. Иллюстрация математической модели с найденной функцией теплопроводности засыпки и экспериментальных данных для средней термопары представлена на рис. 3.

Значение минимума достигается при $\lambda_0^f = 0.062$ Вт/(м·°С), $\lambda_1^f = 1.683 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·°С²), $\lambda_0^s = 0.065$ Вт/(м·°С).

Анализ графика логарифма избыточной температуры для средней термопары 1 (см. рис. 1) позволяет заключить, что можно выделить три температурных диапазона, существенно различающихся темпом охлаждения. Первый интервал от $t_{нач} = 480$ °С до

$t_{гр,1} = 280$ °С с темпом охлаждения $m_{сред,1} = 1.62 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

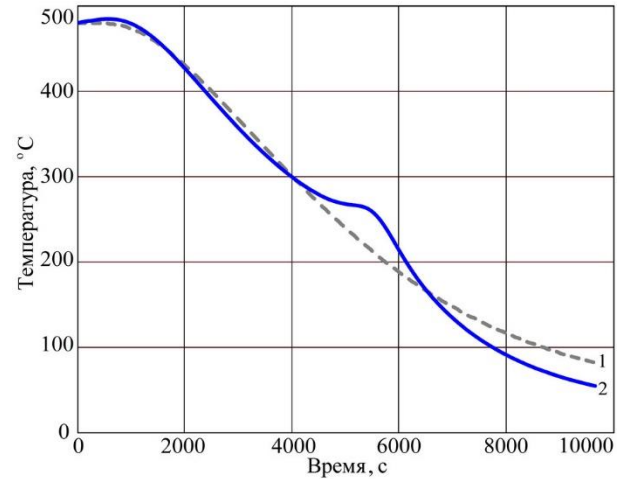


Рис. 3. Сопоставление температурных кривых для двух температурных диапазонов: 1 – математическая модель, 2 – экспериментальные данные.

Второй интервал $t_{гр,1} = 280$ °С до $t_{гр,2} = 260$ °С с темпом охлаждения $m_{сред,2} = 0.72 \cdot 10^{-4}$ 1/с и третий от $t_{гр,2} = 260$ °С до $t_{о.с}$ с темпом охлаждения $m_{сред,3} = 4.65 \cdot 10^{-4}$ 1/с. Таким образом, введены в рассмотрение две граничные температуры $t_{гр,1} = 280$ °С и $t_{гр,2} = 260$ °С, и можно предположить, что температурная зависимость для теплопроводности засыпки описывается совокупностью трех линейных функций:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lambda_0^f + \lambda_1^f t, \quad t \in [t_{гр,1}, t_{нач}]; \\ \lambda(t) &= \lambda_0^s + \lambda_1^s t, \quad t \in [t_{гр,2}, t_{гр,1}]; \\ \lambda(t) &= \lambda_0^{th} + \lambda_1^{th} t, \quad t \in [t_{о.с}, t_{гр,2}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь коэффициенты $\lambda_0^{th}, \lambda_1^{th}$ относятся к третьему (third) температурному диапазону. При этом выполняются условия неразрывности функции на границах температурных диапазонов:

$$\begin{aligned} \lambda_0^f + \lambda_1^f t_{гр,1} &= \lambda_0^s + \lambda_1^s t_{гр,1}; \\ \lambda_0^s + \lambda_1^s t_{гр,2} &= \lambda_0^{th} + \lambda_1^{th} t_{гр,2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Благодаря двум уравнениям (6), из шести коэффициентов $\lambda_0^f, \lambda_1^f, \lambda_0^s, \lambda_1^s, \lambda_0^{th}, \lambda_1^{th}$, входящих в уравнения (5), четыре являются независимыми. В качестве таковых выбраны $\lambda_0^f, \lambda_1^f, \lambda_0^s, \lambda_0^{th}$. Дальнейший ход исследования повторяет тот, что реализован для двух температурных интервалов, но с расширением на четыре фактора: ПФЭ 2^4 [27].

Реализация крутого восхождения позволяет достичь дополнительного снижения функции отклика до уровня $\Delta_{мин} = 18.97$ °С, что составляет 7.4 % от максимума $\Delta_{макс}$. Однако численное снижение

функции отклика не дает качественного приближения расчетной зависимости к экспериментальной, что проиллюстрировано на рис. 4.

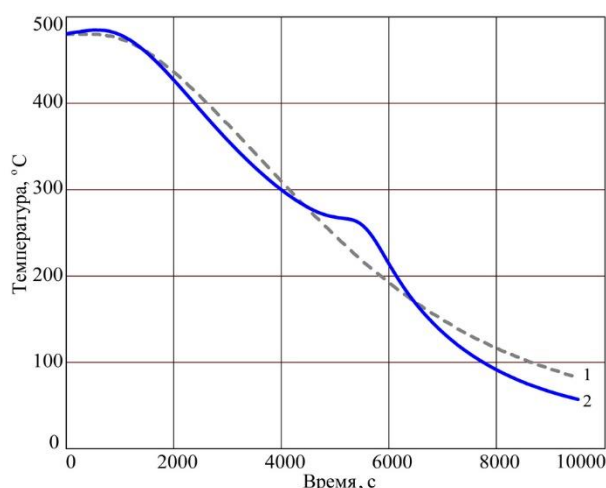


Рис. 4. Сопоставление температурных кривых для трех температурных диапазонов: 1 – математическая модель, 2 – экспериментальные данные.

На рис.4 можно заметить большее отклонение расчетной зависимости в области температур от $t_{нач} = 480$ °С до $t_{тр.1} = 280$ °С, чем на рис. 3. Общее снижение функции отклика достигнуто за счет сближения данных математической модели с экспериментальными в диапазоне температур 280-180 °С. В связи с этим дополнительно проведено исследование, используя соотношение темпов охлаждения, которое для трёх выделенных диапазонов составило $m_{сред.1} : m_{сред.2} : m_{сред.3} = 1:0.44:2.87$. Это соотношение применено соответственно к коэффициентам $\lambda_0^f, \lambda_0^s, \lambda_0^h$. Базовым принималось значение $\lambda_0^f = 0.062$ Вт/(м·°С), исходя из ранее полученных результатов.

По результатам ПФЭ 2⁴ пропорционально темпу охлаждения выявлено не только увеличение значений функции отклика, но и качественное ухудшение характера расчетного температурного графика относительно экспериментальной кривой в каждой из выделенных температурных зон, что проиллюстрировано на рис. 5. При реализации крутого восхождения из центра плана значение функции отклика удалось снизить лишь до $\Delta_{min} = 50.61$ °С, что составляет 19.7 % от максимума Δ_{max} .

Таким образом, попытка использовать локальные темпы охлаждения в процессе поиска теплопроводности коксового остатка не дала позитивного результата.

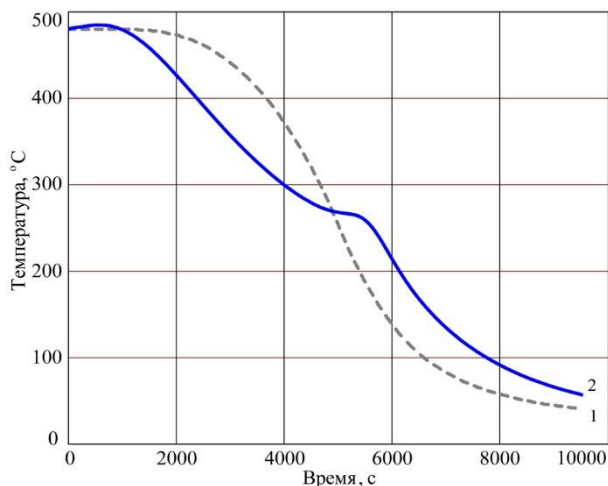


Рис. 5. Сопоставление температурных кривых для трех температурных диапазонов при определении теплопроводности пропорционально темпу охлаждения: 1 – математическая модель, 2 – экспериментальные данные.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан и апробирован расчетно-экспериментальный метод определения свойств мелкодисперсных материалов при высоких температурах, в частности теплопроводности, основанный на физическом и математическом моделировании.
2. В результате реализации разработанного метода установлены температурные зависимости теплопроводности коксового остатка (технического углерода) – твердого продукта пиролиза отходов автомобильных шин для двух температурных диапазонов, Вт/(м·°С): $\lambda = 0.065 + 0.572 \cdot 10^{-5} t$ в интервале 60–270 °С; $\lambda = 0.062 + 1.683 \cdot 10^{-5} t$ в интервале 270–480 °С. Полученные результаты являются необходимыми исходными данными для создания и исследования математической модели теплообменника–охладителя коксового остатка с целью разработки ресурсосберегающей пиролизной установки.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Δ — среднеквадратичное отклонение расчетных температур от экспериментальных в заданной точке объема исследуемого материала, °С;

$t_{нач}$ — температура засыпки в начале эксперимента, °С;

$t_{тр}$ — температура на границе двух смежных диапазонов температур, °С;

$t_{о.с}$ — температура окружающей среды во время эксперимента, °С;

λ — теплопроводность, Вт/(м·°С);

λ_0 — свободный член линейной температурной функции теплопроводности, Вт/(м·°С);

λ_1 — угловой коэффициент линейной температурной функции теплопроводности, Вт/(м·°С²).

Индексы:

расч — данные, полученные с помощью математической модели;

эксп — данные, полученные с помощью эксперимента;

i — порядковый номер экспериментальной точки;

f — первый температурный диапазон;

s — второй температурный диапазон;

th — третий температурный диапазон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Castaldi M.J., Kwon E., Weiss B.** Beneficial use of waste tires: an integrated gasification and combustion process design via thermogravimetric analysis (TGA) of styrene-butadiene rubber (SBR) and polyisoprene (IR). *Environmental Engineering Science*. 2007. V. 24. № 8. P. 1160-1178.
2. **Naveed S., Malik A., Ramzan N., Akram M.** A comparative study of gasification of food waste (FW), poultry waste (PW), municipal solid waste (MSW) and used tires (UT). – *Nucleus*, 2009, 46, 77-81.
3. **Kalitko V.A.** Steam-thermal recycling of tire shreds: calculation of the rate of explosion-proof feed of steam. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2008. V. 81. № 4. P. 781-786.
4. **Kalitko U.** Waste Tire Pyrolysis: Heat-Mass Balances & New Engineering Solutions with Steam. *Journal of Solid Waste Technology and Management*. 2012. https://www.researchgate.net/publication/227340072_Waste_Tire_Pyrolysis_Heat-Mass_Balances_New_Engineering_Solutions_with_Steam
5. **Kalitko U.** Triple-screw reactor & jet Venturi condenser for scrap tire pyrolysis recycling with steam. 2013. http://www.academia.edu/35306514/TRIPLE-SCREW_REACTOR_and_JET_VENTURI_CONDENSER_FOR_SCRAP_TIRE_PYROLYSIS_RECYCLING_WITH_STEAM
6. **Kalitko U.** Waste Moving-Stirring Bed in Thermal Processing of Auger or Kiln Pyrolysis Reactor: Math Model Engineering Solution for the Effective Cross-Section Charge of Reactors. April 2015. – DOI 10.13140/RG.2.1.4995.7283. <https://www.researchgate.net/publication/275649560>
7. **Shah J., Jan M.R., Mabood F.** Catalytic conversion of waste tyres into valuable hydrocarbons. *Journal of Polymers and the Environment*. 2007. V.15. P. 207-211.
8. **Murillo R., Navarro M. V., Lopez J. M. etc.** Activation of pyrolytic tire char with CO₂: Kinetic study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004. V. 71. № 2. P. 945-957. DOI 10.1016/j.jaap.2003.12.005
9. **Murillo R., Aylón E., Navarro M. V. etc.** The application of thermal processes to valorise waste tyre. *Fuel Processing Technology*. 2006. V. 87. № 2. P. 143-147. DOI 10.1016/j.fuproc.2005.07.005
10. **Mohan D., Pittman C.U., Steele P.H.** Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels*. 2006. V. 20, № 3. P. 848-889.
11. **Paradela F., Pinto F., Ramos A.M., Gulyurtlu I., Cabrita I.** Study of the slow batch pyrolysis of mixtures of plastics, tyres and forestry biomass wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2009. V. 85, № 1-2. P. 392-398.
12. **Cao Q., Liu G., Bao W.R., Lv Y.K.** Influence of co-pyrolysis and catalysis of biomass with waste tyre on pyrolytic oil properties. *Journal of Chemical Industry and Engineering*. 2007. V 58, № 5. P. 1283-1289.
13. **Cao Q., Jin L.E., Bao W.R., Lv Y.K.** Investigations into the characteristics of oils produced from co-pyrolysis of biomass and tire. *Fuel Processing Technology*. 2009. V. 90, № 3. P. 337-342.
14. **Navarro M.V., Martinez D.J., Murillo R., Garcia T., Lopez M.J., Callen M.S., Mastral M.A.** Application of a particle model to pyrolysis. Comparison of different feedstock: plastic, tyre, coal and biomass. *Fuel Processing Technology*. 2012. V. 103. P. 1-8.
15. **Wen-liang Wang, Jian-min Chang, Li-ping Cai, Sheldon Q. Shi.** Quality improvement of pyrolysis oil from waste rubber by adding sawdust. *Waste Management*. 2014. V. 34. №12. P. 2603-2610.
16. **Луговой Ю.В.** Кинетика пиролиза полимерного корда в присутствии хлоридов металлов подгруппы железа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук, Иваново: ФГБОУ ВПО «Гверской государственной технической университет», 2010. 17 с.
17. **Бернадинер П.И.** Режимы охлаждения твердых продуктов пиролиза / П.И. Бернадинер, В.Д. Ванюшкин, С.К. Попов, И.Н. Свистунов // Энергосбережение — теория и практика: Труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 5—12 октября 2018 г.) — М.: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 390-394.
18. **Ванюшкин В.Д.** Экспериментальное исследование процесса охлаждения продуктов пиролиза отходов шин / В.Д. Ванюшкин, С.К. Попов, И.Н. Свистунов // Инженерно-физический журнал. 2020, Т. 93, № 2 (март-апрель). С. 398-402.
19. **Кондратьев Г.М.** Регулярный тепловой режим. – М.: ГИТТЛ, 1954. 408 с.
20. **Кондратьев Г.М.** Тепловые измерения: учебное пособие / Г.М. Кондратьев. – М.–Л.: Машгиз, 1957. 244 с.
21. **Кондратьев Г.М.** Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима. – М.–Л.: Стандартгиз, 1936. 124 с.
22. **Костановский А.В.** Регулярный тепловой режим и его приложение для измерения тепловых свойств твердых тел. Нестационарная теплопроводность: учебное пособие / А.В. Костановский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 32 с.
23. **Жумагулов М.Г.** Разработка тепловых режимов энерготехнологической установки по производству углеродистого теплоносителя: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2010. 18 с.
24. **Патанкар С.В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с англ. / С.В. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
25. **Бек Дж.** Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бек, Б. Блакуэлл, Ч. Сент-Клэр мл. – М.: Мир, 1989. 312 с.
26. **Крылова О.Б.** К определению теплофизических свойств насыпной металлической садки / О.Б. Крылова, В.И. Становой, А.А. Буйлов, А.У. Пуговкин // Математическое моделирование процессов в теплотехнических установках: Межвуз. сб. науч. тр. / Иван. гос. ун-т, Иван. энерг. ин-т. – Иваново: ИвГУ, 1986. С. 76-80.
27. **Адлер Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. 279 с.

Е.Г. Гаши, А.И. Киселева, Г.А. Романов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ

АННОТАЦИЯ

В исследовании проведен анализ потенциала нетрадиционных и возобновляемых источников для систем энергообеспечения объектов. Рассмотрен мировой опыт внедрения альтернативных источников энергии и дана оценка состоянию и внедрению гибридных схем в России. Предложены варианты гибридных схем энергообеспечения для объектов различного назначения. Рассматриваются ключевые проблемы активного использования и предлагаются пути их решения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Гибридные системы энергоснабжения получили широкое распространение в странах ЕС. Принятые в этих странах программы и нормативные документы, по повышению энергоэффективности теплоснабжения и использованию для этого возобновляемых источников энергии (ВИЭ), поспособствовали широкому внедрению гибридных систем и установок [1]. В энергобалансе ЕС доля ВИЭ быстро растет и к 2020 г. должна достигнуть 20 %, в энергобалансе мира такая доля использования ВИЭ планируется к 2030 г. (рис. 1). Конкретно в области холодотеплоснабжения доля ВИЭ ежегодно увеличивается во всех странах без исключения.

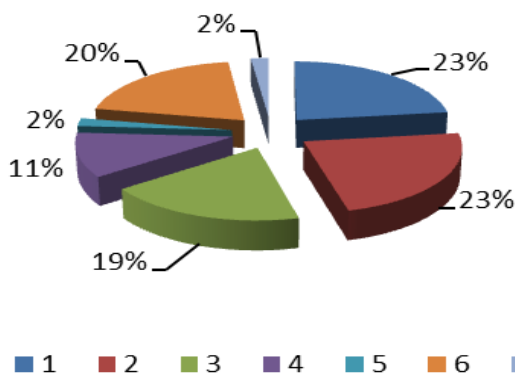


Рис.1. Оценка структуры энергобаланса ЕС к 2030 г.: 1 – нефть, 2 – газ, 3 – уголь, 4 – АЭС, 5 – ГЭС, 6 – ВИЭ, 7 – сжигаемая биомасса.

В России, хоть эти системы пока и не пользуются высоким спросом, создавались ТЭЦ разного типа и мощности как раз для решения таких задач, были разработаны разные типы турбин, набор соответствующих схемных решений. В основном, это касалось

крупных потребителей (промышленных предприятий, городов), в настоящее же время вновь стала актуальной проблема обеспечения надежного энергообеспечения удаленных и труднодоступных поселений вне систем централизованного энергоснабжения. За период 2013-2018 гг. наметился определённый прогресс в развитии возобновляемой энергетики в России. Правительством РФ принято ряд Постановлений и Распоряжений по организации работ в области ВИЭ. Однако, несмотря на обширный список документов, призванных обеспечить развитие ВИЭ в России, в реальности они носят в основном декларативный характер и слабо применяются на практике. При этом, по оценкам российских специалистов, потенциал ВИЭ в России составляет более чем 270 млн т.у.т. — около 30 % от общей первичной поставки энергоресурсов. К сожалению, первоначально установленная доля ВИЭ – 4,5% от общего производства электроэнергии в 2020 году, была снижена до 2,5%. Сегодня в России речь идет о достижении экономического роста, потребности в освоении пространства с разными климатическими условиями, соответствующем строительстве больших объемов жилья и эффективных производственных мощностей [2]. Рациональное применение комбинированных, гибридных систем на основе ВИЭ в этих случаях вполне может способствовать более эффективным решениям, приводящим к различным системным (мультипликативным) эффектам.

Непостоянство выхода энергии и несовпадение мест проявления ВИЭ и потребляемых нагрузок (городов) ставит под сомнение целесообразность применения гибридных систем энергообеспечения. Однако в то же самое время, природная неисчерпаемость и экологичность представляют широкие возможности для применения систем теплоснабжения на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

2. ГЕНЕРАЦИЯ И СТРУКТУРА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ВИЭ

Структура энергопотребления в мире (рис.2) предоставляет исчерпывающий ответ о доле ВИЭ в энергоструктуре.

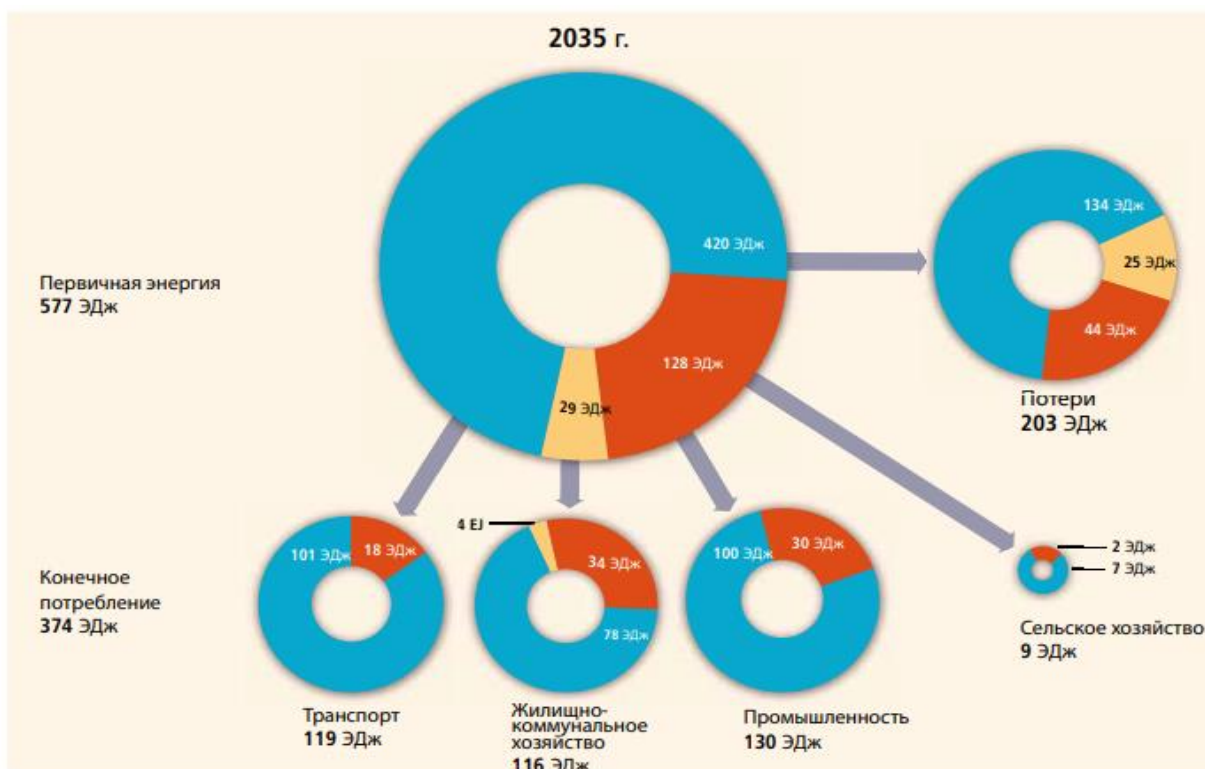


Рис. 2. Ожидаемая структура мирового энергопотребления к 2035 г. : ● — невозобновляемые источники энергии, ● — современные возобновляемые источники энергии, ● — традиционные биомассы.

По сравнению с показателями 2008 года, генерация первичной энергии имеет незначительный рост: в 2008 г. – 492 ЭДж, в 2035 г. – 577 ЭДж. Лидирующими областями по потреблению энергии остаются транспорт, ЖКХ и промышленность.

Мировыми лидерами по использованию НиВИЭ остаются Китай и США (табл. 1). Стоит отметить, что большинство стран используют мощность нетрадиционных источников в основном для генерации электрической энергии. Наибольшее применение в сфере энергетики этих стран получили солнечные электростанции:

Tengger Desert (КНР) – 1500 МВт;

Solar Star (США) – 579 МВт;

Topaz (США) – 550 МВт;

Desert Sunlight Solar Farm (США) – 552 МВт.

Солнечная энергетика, в первую очередь, является очень популярной как в жилом, так и в коммерческом секторе [3-5]. Такой спрос объясняется довольно ясной погодой в некоторых странах Европы. Например, согласно данным Solar Trade Association (STA) генерация всех солнечных батарей в апреле 2020 г. достигла пика в 9,68 ГВт, в Германии установлен рекорд в 32,23 ГВт. Последние годы показывают высокую эффективность солнечных систем: чаще стали фиксироваться случаи отрицательных цен на электрическую энергию. Однако высокая стоимость установок и зависимость от погоды и времени суток являются непреодолимыми преградами для строительства СЭС в ряде стран.

2.1. ВИДЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ В РОССИИ

Огромная территория и разнообразие климатических поясов в России дают преимущества и располагают к использованию самых разных альтернативных источников энергии. ГЭС являются самым популярным альтернативным источником энергии в России [6]. Выработка энергии за счет существующих 200 речных ГЭС достигает 20% от всей производимой энергии в стране.

Солнечная энергия в России используется как у населения в качестве основного или альтернативного источника энергии, так и в промышленных масштабах [7, 8]. Самыми крупными солнечными установками являются СЭС – «Владиславовка» (Крым), а также установки в Самарской, Астраханской, Оренбургской областях. Общая мощность всех установок около 400 МВт.

Геотермальная энергетика получила широкое распространение на Камчатке, чему способствует обилие вулканов. Мощность геотермальных источников позволяет покрыть около 40% потребляемой мощности. По проведенным исследованиям потенциал геотермальных источников на Камчатке оценивается в 5000 МВт, однако годовое использование не превышает 80 МВт.

Другие виды альтернативной энергетики, такие как ветроэнергетика и др. хоть и используются в частных случаях но не получили широкого распространения из-за отсутствия инвестиций и пробелов в законе.

Таблица 1. Рейтинг стран по мощности и выработке энергии на основе НиВИЭ в 2017 г.

	1	2	3	4	5
Электроэнергия					
Мощность возобновляемых источников (включая гидроэнергетику)	Китай	США	Бразилия	Германия	Индия
Мощность возобновляемых источников (не включая гидроэнергетику)	Китай	США	Германия	Индия	Япония
Генерация биоэнергетических установок	Китай	США	Бразилия	Германия	Япония
Мощность биоэнергетических установок	США	Бразилия	Китай	Индия	Германия
Мощность гидроэнергетических установок	Китай	Бразилия	Канада	США	Россия
Генерация гидроэнергетических установок	Китай	Бразилия	Канада	США	Россия
Мощность солнечных фотоэлектрических источников	Китай	США	Япония	Германия	Италия
Мощность солнечных фотоэлектрических источников <i>на душу населения</i>	Германия	Япония	Бельгия	Италия	Австралия
Гелиоконцентраторы	Испания	США	Южная Африка	Индия	Марокко
Мощность ветроэнергетических установок	Китай	США	Германия	Индия	Испания
Мощность ветроэнергетических установок <i>на душу населения</i>	Дания	Ирландия	Швеция	Германия	Португалия
Тепловая энергия					
Мощность солнечных нагревательных коллекторов	Китай	США	Турция	Германия	Бразилия
Мощность солнечных нагревательных коллекторов <i>на душу населения</i>	Барбадос	Австрия	Кипр	Израиль	Греция
Тепловая мощность геотермальных источников	Китай	Турция	Исландия	Япония	Венгрия

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИЭ В РОССИИ

В настоящее время выработка электроэнергии в России за счет гибридных систем на основе возобновляемых источников энергии составляет менее 1% от общей генерации. Несмотря на низкие показатели использования мощности НиВИЭ в России по сравнению с другими странами, гибридные системы энергоснабжения нашли широкое применение на следующих объектах [9]:

- частные дома и коттеджи;
- коттеджные поселки;
- загородные усадьбы;
- объекты инфраструктуры (очистные сооружения);
- общественные учреждения (д/сады, школы);
- общественные здания;

- небольшие промышленные объекты (цеха);
- МКД 2-3 этажности;
- небольшие микрорайоны.

Для теплоснабжения частных домов широкое распространение вне зависимости от климатической зоны получили тепловые насосы [10]. Использование теплового насоса позволяет в холодное время года отапливать жилой дом, в теплое – охлаждать. На примере индивидуального жилого дома (Республика Бурятия) можно оценить эффективность использования гибридных систем тепло- и холодоснабжения.

На рис. 3 представлена схема энергоснабжения жилого дома с использованием реверсивного грунтового теплового насоса и солнечных коллекторов. Источником тепла и холода являются три скважины глубиной 100 м. Две группы вакуумных солнечных коллекторов (рис.4-5): на крыше дома 120 трубок и на теплице 100 трубок (итого 18 м²). У СК несколько режимов (вариантов) работы:

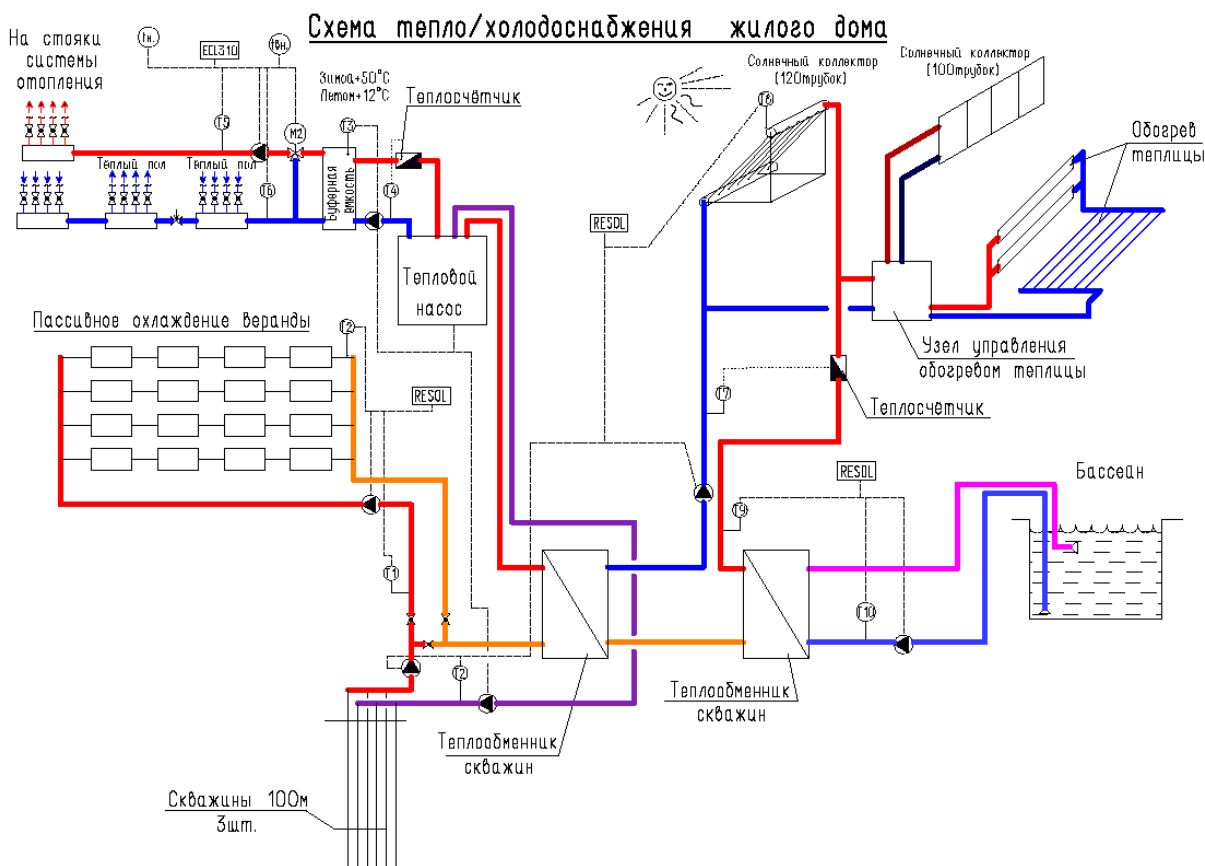


Рис. 3. Схема теплоснабжения жилого дома на основе группы солнечных коллекторов и теплового насоса

1. зимой (отопительный период) все 220 трубок работают на подогрев низкого контура ТН и покрывают 15-17% годового потребления тепловой энергии на отопление;

2. с середины марта (конец отопительного сезона) месяца 100 трубок, установленных на теплице, переключаются на обогрев почвы в теплице и уже через месяц, в середине апреля, высаживается рассада. В конце мая все коллекторы работают на подогрев воды в уличном бассейне и на подогрев скважин.



Рис.4. Группа солнечных коллекторов для энергообеспечения жилого дома (расположение - крыша).

Такое сочетание источников энергии «тепловой насос и солнечный коллектор» является наиболее

распространенным на территории Российской Федерации. Почти вся территория России подвержена инсоляции в той или иной мере, поэтому таких примеров немало: гибридная солнечная электростанция мощностью 45 кВт в Краснодарском крае, каскад геотермальных насосов в Омской области, солнечная гибридная система, обеспечивающая высокую степень бесперебойности электроснабжения в Ростове-на-Дону, геотермальный тепловой насос в Ленинградской области и т.д. [2]

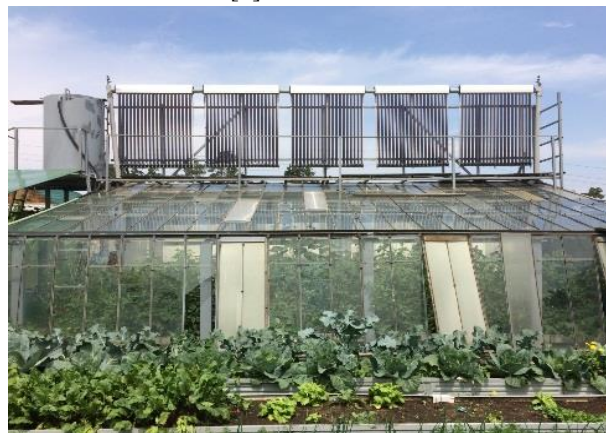


Рис.5. Группа солнечных коллекторов для энергообеспечения жилого дома (расположение - теплица).

4. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ АКТИВНОГО ВНЕДРЕНИЯ ВИЭ

Успешное применение ВИЭ, тепловых насосов в России все еще остается уделом групп энтузиастов, вне государственной политики и поддержки, в результате страна не реализует дополнительные возможности развития экономики и промышленности.

По мнению создателей вышеупомянутых проектов, ключевыми мерами системной поддержки развития и реализации ВИЭ являются:

- увеличение рынка путем предоставления дотаций на приобретение техники на основе ВИЭ;
- предоставление льготных кредитов на приобретение и установку техники через уполномоченные банки;
- стимулирование строительства энергоэффективного жилья с установкой систем на основе ВИЭ и ТНУ в качестве источников теплоснабжения;

- применение понижающих коэффициентов к местному тарифу на электроэнергию для пилотных установок на ВИЭ (как это делается для домов, оборудованных электроплитами);

- создание (актуализация) отечественных нормативов, стандартов, сводов правил, ГОСТов, регламентирующих применение соответствующих установок на ВИЭ в российских условиях;

- широкая информационная поддержка успешных проектов в разных сферах и областях.

Ключевые проблемы, препятствующие массовому внедрению проектов с использованием ВИЭ, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Ключевые проблемы активного внедрения ВИЭ и их взаимосвязка

Экономические	Технические	Организационные
Высокая стоимость оборудования (преимущественно импортного), отсутствие каких-либо субсидий или льгот для владельцев, установивших системы на основе ВИЭ.	Многообразие региональных климатических, тарифных, инфраструктурных и геологических условий, доступных источников ВИЭ и технических решений на базе разных типов ВИЭ делает невозможным создание типовых проектов применения ВИЭ. Необходимым является подготовка тщательного и дорогостоящего технико-экономического обоснования каждого проекта с ВИЭ.	Недостаточная нормативная база, технические регламенты, стандарты, дефицит эмпирических данных о российских проектах, альбомов лучших практик.
Относительно низкая стоимость топлива (в особенности магистрального газа) при относительно высоких тарифах на электроэнергию отрицательно сказываются на экономике проектов.	Ограничения по использованию ВИЭ по климатическим условиям в регионах средней полосы и севера России (более низкая рабочая температура требует дополнительных расчетов и обоснований, особенно при реконструкции работающих систем теплоснабжения).	Ограниченное отечественное производство и отсутствие российских комплектующих, (качественных компрессоров, ветротурбин, аккумуляторов).
Высокие процентные ставки по кредитам на дорогое оборудование.	Неоднородность потенциала ВИЭ в региональном разрезе как в плане природных (водоемы, почва, геотермальное тепло), так и техногенных (стоки, вентвыбросы и др.) источников.	Отсутствие сервисной поддержки у многих производителей.
Низкая рентабельность проектов «ВИЭ как есть», необходимость нестандартных технических решений (по аккумулированию тепла, использованию низкопотенциального тепла).	Необходимость обеспечить высокую надежность теплоснабжения от ВИЭ при возможных перебоях с электроснабжением может потребовать, как независимого второго ввода электроэнергии, так и установки дублирующего резервного оборудования на топливе, возможные ограничения по пропускной способности питающих центров и линий электропередач, особенно в сельской местности.	Сложность и непрозрачность получения электрической мощности для работы ВИЭ в энергосбытовых организациях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на существующие препятствия активного внедрения ВИЭ, мировые тенденции показывают рост и возможность применения возобновляемых источников в большинстве стран. Гибридные системы еще не оценены по достоинству, хотя их применение дает некоторые преимущества перед традиционными системами: значительное снижение загрязнения окружающей среды, дополнительное производство электроэнергии в требуемых объемах в зонах централизованного энергоснабжения, а так же широкие возможности для иностранных инвестиций.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
- НиВИЭ – нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- 1 ЭксаДжоуль = $10^9 \cdot 10^9$ Джоуль = 277 ПетаВатт·час;
- СЭС – солнечная электростанция;
- СК – солнечный коллектор;
- ТН – тепловой насос;
- ТНУ – теплонасосная установка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Power Systems of the Future // A 21st Century Power Partnership Thought Leadership Report. Denver: National Renewable Energy Laboratory. 2015. P. 37-38.

2. **Возобновляемая** энергетика: примеры и практика реального использования / Под. ред. Е.Г. Гашо, Р.Н. Разренова. М.: Российская инженерная академия, 2019. 80 с.
3. **Li X, Min Z, Zhu P.** Storage and Recycling of Interfacial Solar Steam Enthalpy // *Joule*. 2018. V 2. P. 247-248.
4. **Дашеев С.С., Малышев Е.А.** // Солнечная энергетика: состояние и перспективы. Вестник науки и образования. 2018.
5. **Eyerer S., Schiffler C., Hofbauer S., Bauer W., Wieland C., Spliethoff H.** Combined heat and power from hydrothermal geothermal resources in Germany: An assessment of the potential // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. V 120. P. 34-49.
6. **Автономные** источники электроэнергии: состояние и перспективы / Григораш О.В., Божко С.В., А.Ю. Попов и др. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2012. 174 с.
7. **Атлас** ресурсов солнечной энергии на территории России / О. С. Попель и др. М.: ОИВТ РАН, 2010. 81 с.
8. **Carvalho D, Guardia E., Marangon Lima J.** Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system // *Solar Energy*. 2019. V 191 P. 530-539.
9. **Максимова В.Н., Васильева Е.А.** Комбинированные энергетические установки // *Альтернативные источники энергии: Сборник докладов V студ. науч.-пр. конф.* СПб.: СПбГУПТД, 2018. С. 34-39.
10. **Баранов Н. Н.** Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии : учеб. пособие для вузов / Н. Н. Баранов. - М.: ИД МЭИ, 2012. 384 с.

И.А. Дядиченко¹, И.Ф. Самсон^{1,2}¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия²Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), Санто-Доминго, Доминиканская республика

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПАРИТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДА В СХАТ

АННОТАЦИЯ

Ископаемые ресурсы являются основой мировой экономики. Однако, добыча, транспортировка и потребление этого источника энергии вредны для окружающей среды. Экономические причины и поиск новых решений, основанных на рекуперации энергии, вызвали рост интереса к адсорбционной технологии.

В последние десятилетия значительно возросло количество исследований по адсорбционным холодильным системам, поскольку, в отличие от парокомпрессионных холодильных установок, они причиняют меньший вред окружающей среде. [1]

1. ВВОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

СХАТ представляют собой особый тип холодильного аппарата, в котором отсутствует сжатие. В таких устройствах происходят циклические процессы, состоящие из последовательных стадий: адсорбции / испарения (днём) и десорбции / конденсации (ночью). [2]

Технология адсорбционной холодильной техники использует хладагенты с нулевым потенциалом истощения озона и нулевой потенциалом глобального потепления и могут работать без потребления электроэнергии, а также не имеют движущихся частей. Отличительной особенностью СХАТ является отсутствие компрессора. Традиционные холодильные системы преобразуют потребляемую электроэнергию в механическую работу путём сжатия рабочей жидкости. Функционирование адсорбционной холодильной системы опирается на переменную адсорбционную способность выбранной рабочей пары, что происходит в связи с периодическим изменением температуры в адсорбенте. В СХАТ давление в системе ночью во время адсорбции определяется параметрами испарителя. Из-за отсутствия устройств контроля давление больше значение придаётся подбору геометрических параметров испарителя [3]

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В холодильной камере находится резервуар с водой, внутри которого расположен испаритель, наполненный метанолом. Ввиду того, что работа СХАТ является периодической, в течение процесса производства холода важно добиться получения

льда, который будет использоваться в качестве аккумулятора холода в дневную часть цикла. Постановка задачи: Выбрать конструкцию испарителя для проектируемого экспериментального образца СХАТ. Количество теплоносителя 1 (метанол): 6 кг. Количество теплоносителя 2 (вода): 15 кг. Провести тепловой расчёт и проанализировать условия образования льда.

Рассмотрены две геометрии испарителя: прямоугольная и цилиндрическая.

3. РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Общий тепловой баланс системы:

$$Q_{\text{отвед}} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.1)$$

где: $Q_{\text{отвед}} = M_{\text{мет}} \cdot r_{\text{мет}}$ – общее количество отведённого тепла, Дж.

$M_{\text{мет}}$ – масса метанола в системе, кг;

$r_{\text{мет}} = 1,12 \cdot 10^6$ – теплота парообразования метанола, Дж/кг.

Теплота, отведённая от метанола для его охлаждения, Дж:

$$Q_1 = M_{\text{мет}} \cdot C_{p_{\text{мет}}} \cdot (t_{\text{мет}}^{\text{нач}} - t_{\text{мет}}^{\text{кон}}), \quad (2.2)$$

где: $C_{p_{\text{мет}}}$ – теплоёмкость метанола при 0 °С, Дж/кг·К; $t_{\text{мет}}^{\text{нач}}$, $t_{\text{мет}}^{\text{кон}}$ – температура метанола в разные моменты времени, °С.

Теплота, отведённая от воды для ее охлаждения, Дж:

$$Q_2 = M_{\text{воды}} \cdot C_{p_{\text{воды}}} \cdot (t_{\text{воды}}^{\text{нач}} - t_{\text{воды}}^{\text{кон}}), \quad (2.3)$$

где: $M_{\text{воды}}$ – масса воды в системе, л; $C_{p_{\text{воды}}}$ – теплоёмкость воды при 0 °С, Дж/кг·К; $t_{\text{воды}}^{\text{нач}}$, $t_{\text{воды}}^{\text{кон}}$ – температура воды в разные моменты времени, °С.

Теплота, отведённая от воды для образования льда, Дж:

$$Q_3 = M_{\text{лед}} \cdot r_{\text{з.в.}}, \quad (2.4)$$

где: $M_{\text{лед}}$ – масса образованного льда, кг; $r_{\text{з.в.}}$ – теплота затвердевания воды Дж/кг.

Уравнение теплового баланса для оценки отведённого тепла, необходимого для охлаждения метанола:

$$\frac{dm}{dt} \cdot r_{\text{мет}} = M_{\text{мет}} \cdot C_{p_{\text{мет}}} \cdot \frac{dt_{\text{мет}}}{dt}, \quad (2.5)$$

При расчёте сделаем предположение, что расход метанола в системе постоянен. Для того, чтобы подробно рассмотреть распределение температур изобразим разрез стенки испарителя

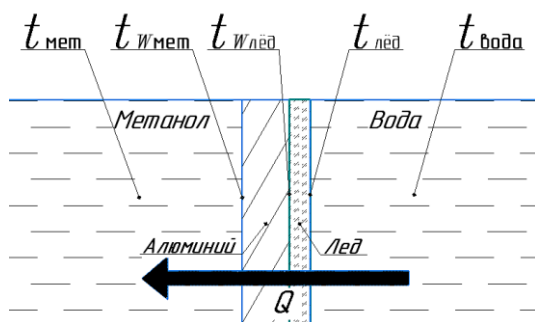


Рис. 1 Разрез стенки испарителя: $t_{мет}$ – температура метанола, °С; $t_{Wмет}$ – температура стенки, контактирующей с метанолом, °С; $t_{Wлёд}$ – температура стенки, контактирующей со льдом, °С; $t_{лёд}$ – температура льда, °С; $t_{вода}$ – температура воды, °С;

Мощность теплового потока, отводимого из холодильной камеры в единицу времени, Вт:

$$Q = \frac{\bar{G}_{мет}}{3600} \cdot r_{мет}, \quad (2.6)$$

где: $\bar{G}_{мет}$ – принятый средний расход метанола, кг/ч.

Тепловой баланс на границе раздела фаз лёд-вода:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{мет.ср.}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{лёд}}{\lambda_{лёд}}} \cdot (t_{лёд} - t_{мет}) \cdot F_{сумм} = \alpha_{вод.ср.} \cdot F_{сумм} \cdot (t_{вода} - t_{лёд}), \quad (2.7)$$

где: $\alpha_{мет.ср.}$ – усреднённое значение коэффициента теплоотдачи со стороны метанола, Вт/м²·К; $\alpha_{вод.ср.}$ – усреднённое значение коэффициента теплоотдачи со стороны воды, Вт/м²·К; $F_{сумм}$ – общая площадь контактной поверхности испарителя, м².

Термическое сопротивление для прямоугольного испарителя, м²К/Вт:

$$R_{п} = \frac{1}{\alpha_{мет.ср.}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{лёд}}{\lambda_{лёд}}, \quad (2.8)$$

где: δ_w – толщина стенки испарителя, м; λ_w – теплоёмкость стенки испарителя, Вт/м; $\delta_{лёд}$ – толщина образованного льда, м; $\lambda_{лёд}$ – теплоёмкость льда, Вт/м.

Термическое сопротивление для цилиндрического испарителя, м²К/Вт:

$$R_{ц} = \frac{1}{\alpha_{мет.ср.}} + \frac{\ln(r_2/r_1)2\pi r_1 L}{2\pi \lambda_w L} + \frac{\ln(r_{лёд}/r_2)2\pi r_1 L}{2\pi \lambda_{лёд} L}, \quad (2.9)$$

где: r_2 – внешний радиус цилиндра, м; r_1 – внутренний радиус цилиндра, м; λ_w – теплоёмкость материала стенок испарителя, Вт/м; L – высота цилиндра, м; $r_{лёд}$ – сумма внешнего радиуса цилиндра и толщины льда, м.

Преобразуем формулу (2.7):

$$Q = \frac{1}{R_{терм}} \cdot (t_{лёд} - t_{мет}) \cdot F_{сумм} = \alpha_{вод.ср.} \cdot F_{сумм} \cdot (t_{вода} - t_{лёд}), \quad (2.10)$$

где: $R_{терм}$ – термическое сопротивление, м²К/Вт.

Формула (2.10) показывает, что $t_{лёд}$ зависит от $t_{мет}$ и $t_{вода}$, которые в свою очередь будут зависеть от теплового потока и термического сопротивления.

Как было указано ранее тепловой поток зависит от расхода метанола, удаляемого из испарителя.

Масса льда, образовавшаяся на поверхности испарителя:

$$M_{лёд} = F_{сумм} \cdot \rho_{лёд} \cdot \delta_{max}, \quad (2.11)$$

где: $\rho_{лёд}$ – плотность льда, кг/м³; δ_{max} – максимально возможная толщина льда, м

Тепловой баланс для нахождения температуры метанола во время начала образования льда предполагая, что соблюдаются условия образования льда на границе фаз лёд-вода:

$$Q = R_{терм} \cdot (t_{лёд} - t_{мет}) \cdot F_{сумм} \quad (2.12)$$

4. СРАВНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЙ ИСПАРИТЕЛЕЙ СХАТ

Параметры выбранных форм геометрий испарителей СХАТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры испарителей

Тип геометрии	Объём, л	Площадь, м ²
Прямоугольная	9	0,27
Цилиндрическая	9	0,303

Были рассчитаны значения коэффициентов теплоотдачи. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение характеристик испарителей одинакового объема

Тип испарителя	Прямоугольный	Цилиндрический
Параметр		
Осреднённый коэффициент теплоотдачи между стенкой и метанолом, Вт/м ² ·К	128,1	137,4
Осреднённый коэффициент теплоотдачи между стенкой и водой, Вт/м ² ·К	381,6	412,3

Определены значения термического сопротивления в зависимости от толщины наросшего льда. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета термического сопротивления испарителей

Толщина льда δ , м	Термическое сопротивление со стороны метанола, $\frac{м^2 \cdot К}{Вт}$	
	Прямоугольный испаритель	Цилиндрический испаритель
0	0,0080	0,0070
0,01	0,0123	0,0115
0,02	0,0170	0,0160
0,03	0,0210	0,0200
0,04	0,0260	0,0230
0,05	0,0300	0,0270
0,06	0,0350	0,0300

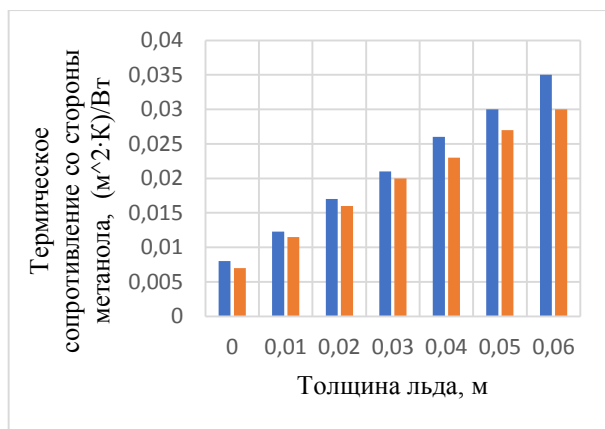


Рис 2. Графическое сравнение результатов расчета термического сопротивления со стороны метанола: ■ – значения для испарителя прямоугольной формы, ■ – значения для испарителя цилиндрической формы.

Анализируя данные в таблице 3 можно сделать вывод, что при использовании в СХАТ испарителя цилиндрической формы лёд будет нарастать лучше

Были произведены расчеты температуры метанола, при которых будет гарантировано продолжение образования льда после достижения обозначенной толщины. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчета требуемой температуры метанола

Толщина льда, м	$t_{мет}$ для цилиндрического испарителя, °С	$t_{мет}$ для прямоугольного испарителя, °С
0	-3,42	-3,36
0,01	-5,90	-5,95
0,02	-8,21	-8,55
0,03	-10,27	-11,14
0,04	-11,80	-13,74
0,05	-13,86	-16,33
0,06	-15,40	-18,93

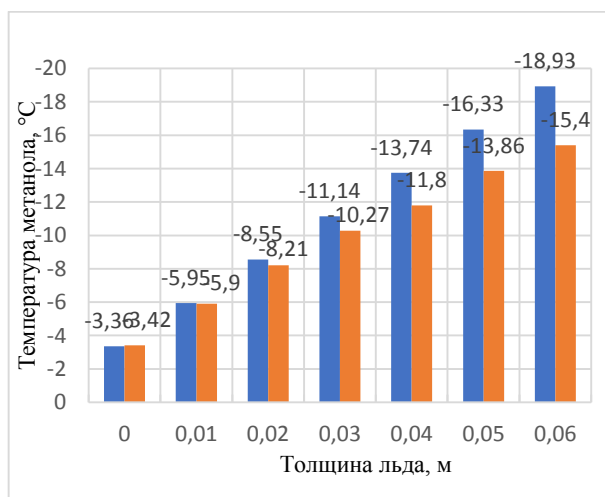


Рис. 3 Графическое сравнение результатов расчета требуемой температуры метанола: ■ – значения для испарителя прямоугольной формы, ■ – значения для испарителя цилиндрической формы.

Анализируя таблицу 2.8 можно сделать вывод, что при условии неизменного теплового потока чтобы создать корку льда толщиной 60 мм для испарителя цилиндрической формы требуемая температура метанола выше, чем для испарителя прямоугольной формы. Это говорит о том, что цилиндрическая форма испарителя является более эффективной для охлаждения воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приняты размеры испарителей прямоугольной и цилиндрической формы с объемом 9 литров, рассчитаны площади контактных поверхностей. Произведено сравнение прямоугольной и цилиндрической геометрии испарителя. Выявлено:

- Для цилиндрической формы значение термического сопротивления меньше, чем для испарителя прямоугольной формы при равных значениях толщины льда.

- Требуемая температура метанола для создания максимально возможной толщины корки льда для цилиндрического испарителя выше, чем для прямоугольного.

Можно сделать заключение, что цилиндрическая форма является более подходящей для будущего прототипа испарителя СХАТ.

Работа была выполнена в рамках гранта Fondocyt 2015- 2E4-091

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

СХАТ – солнечный холодильник адсорбционного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсон И. Ф. Совершенствование характеристик и разработка метода расчета солнечной адсорбционной холодильной установки периодического действия: дис. ... канд. тех. наук: 05.04.03. — М., 2015. — 132 с.
2. Echarrí R., Samson I., Gariaev A., Sartarelli A. Dynamic Simulation of Absorber for Solar Adsorption Refrigerator: A Validated Numerical Model // Energy and Power Engineering. - 2017. - №9.
3. Mateo1 M., Echarrí R., Samson I. Thermal Analysis and Experimental Validation of Parabolic Trough Collector for Solar Adsorption Refrigerator // Energy and Power Engineering. - 2017. - №9.

В.М. Зайченко, Ю.М. Фалеева

Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

ДВУХСТАДИЙНАЯ ПИРОЛИТИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ КОФЕЙНОЙ ШЕЛУХИ И ПЕРГАМЕНТА В СИНТЕЗ-ГАЗ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается технология двухстадийной пиролизической конверсии биомассы в газообразное топливо. Кофейная шелуха и пергамент были использованы в этом исследовании. Представлены экспериментальные данные о составе и количестве газообразных продуктов, образующихся в процессе термической обработки шелухи и пергамента. Результаты показали, что метод позволяет получить более 1.34 м³ синтез-газа, который состоит из 96-97 % водорода и оксида углерода, с теплотворной способностью около 11.7 МДж/м³. В то же время остается 26-29 % твердого остатка (биоуголь) с теплотворной способностью 27-31 МДж/кг. Полученный синтез-газ может быть использован для выработки электроэнергии и производства жидких химикатов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Учитывая ограниченные запасы ископаемого топлива, большое внимание в научных исследованиях уделяется развитию возобновляемых источников энергии. Использование биомассы в качестве топливно-энергетического ресурса может снизить зависимость от ископаемых видов топлива, а также внести вклад в защиту окружающей среды. Кофе является одним из основных сельскохозяйственных товаров в мире и вторым экспортным товаром после нефти [1]. Его мировое производство в 2017 году составило около 9.5 тыс. т [2]. Кофейные деревья растут в экваториальных и тропических широтах, так как они требуют теплого климата со стабильными температурами и осадками. Лидерами по производству кофейных зерен являются Бразилия, Вьетнам, Индонезия, Колумбия, Индия и другие страны.

Характер образующихся отходов зависит от типа переработки кофейных зерен после сбора урожая. Существует два основных метода: сухая и влажная обработка [3]. Плоды кофейного дерева имеют сложную слоистую структуру: наружная кожура (экзокарп), мякоть и тонкий слой клейковины (мезокарп), пергаментная оболочка (эндокарп) и пара кофейных зерен, покрытых тонкой серебряной кожичей [4]. При сухой обработке кофейные ягоды подвергаются воздействию солнечной или печной сушке в течение нескольких недель, а затем механи-

чески очищаются, при этом удаляется кофейная шелуха, представляющая собой смесь кожуры, мякоти, клейковины и пергамента. Вес очищенного кофейного зерна составляет приблизительно 50 % от массы высушенной кофейной ягоды. Таким образом, при сухой обработке на каждый 1 кг кофейных зерен образуется примерно 1 кг шелухи [3]. Влажная обработка кофейных зерен не требует длительной сушки ягод, но включает несколько этапов и считается более сложной с технологической точки зрения. Сначала наружную кожуру и большую часть мякоти механически удаляют прессованием ягод. На следующем этапе оставшуюся мякоть и клейковину удаляют путем ферментации и промывки. После этого чистые зерна сушат до влажности 12 % и затем очищают от пергаментной оболочки (6.1 % от массы зерна) [3]. Влажная обработка позволяет извлечь кофейный пергамент отдельно от других фракций.

Образующиеся при обработке кофе отходы обычно утилизируют путем прямого сжигания или вовсе выбрасывают, что приводит к загрязнению окружающей среды. В то время как отходы кофе могут быть преобразованы в полезную форму энергии путем применения технологии двухступенчатой термохимической конверсии биомассы, которая разрабатывается в Объединенном институте высоких температур Российской академии наук [5]. На первой стадии сырье нагревают в бескислородной среде до конечной температуры приблизительно 1000 °С (зона пиролиза). Вторая стадия заключается в пропускании парогазовой смеси, полученной на первой стадии, через углеродную матрицу при температуре 1000±5 °С (зона газификации). В результате взаимодействия летучих с углеродом в высокотемпературной зоне образуется синтез-газ, состоящий в основном из оксида углерода и водорода с примесью диоксида углерода, метана и азота. Преимущество этой технологии заключается в высокой степени конверсии перерабатываемого сырья и отсутствии жидкой фракции в полученном газе.

Целью данной работы является изучение возможности переработки кофейных отходов с использованием технологии двухстадийного пиролиза и сравнение характеристик синтез-газа и биоугля, полученных из двух материалов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1. Исходный материал

В этом исследовании использовали кофейную шелуху (смесь кожуры, мякоти, клейковины и пергамент) после сухой обработки и кофейный пергамент после влажной обработки кофейных зерен. Кофейная шелуха (СН) и кофейный пергамент (СР) были предоставлены Kyagalanyi Coffee Ltd (Кампала, Уганда). Образцы высушивали при температуре 105 °С для снижения влажности до 1-1.5 % по массе.

2.2. Экспериментальная установка и процесс

Экспериментальная установка (рис. 1) включает реактор в виде стальной трубы диаметром 37 мм и длиной 850 мм. В реакторе на разной высоте установлены чаши, плотно прилегающие к стенкам трубы и имеющие перфорацию в днище для газопроницаемости. В нижнюю чашу (зона пиролиза) помещалось исходное сырье, в верхнюю (зона газификации) – биоуголь, прошедший предварительный нагрев в инертной среде при 1000 °С. Реактор размещали в двухсекционной электрической печи, оборудованной двумя автономными нагревателями.

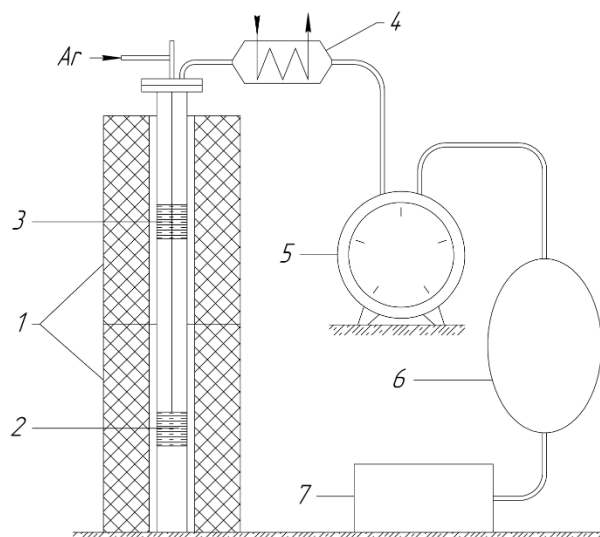


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – двухсекционная печь; 2 – зона пиролиза; 3 – зона газификации; 4 – теплообменник; 5 – газовый счетчик; 6 – газгольдер; 7 – газоанализатор.

Перед экспериментом лабораторную установку продували аргоном для создания инертной среды. Сначала зону газификации нагревали до температуры 1000 ± 5 °С, которая в дальнейшем поддерживалась на постоянном уровне. Установку снова продували аргоном. Затем температуру в зоне пиролиза увеличивали до 1000 °С со скоростью 7 °С/мин. Газообразные и парообразные продукты, образующиеся в процессе пиролиза из материала, проходили через биоуголь при температуре 1000 °С. В результате гетерогенных реакций взаимодействия продуктов пиролиза с поверхностью биоугля образовывался

синтез-газ, в основном состоящий из водорода и окиси углерода. Полученную газовую смесь пропускали через стеклянный теплообменник. Объем неконденсирующихся газов измеряли газовым счетчиком барабанного типа РГ 7000. Газовая смесь собиралась в газгольдере. Состав газовой смеси определяли с помощью газоанализатора.

2.3. Анализ исходного сырья и продуктов

Элементный состав сырья и полученного биоугля определяли с использованием элементного анализатора Vario Macro Cube (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия). Зольность определялась в соответствии с ГОСТ Р 56881-2016. Содержание элементарного кислорода определяли по разнице. Высшая теплота сгорания (ННВ) сырья и биоугля была рассчитана на основе элементных составов. Состав газовой смеси определяли с использованием газоанализатора Vario Plus Industrial (MRU GmbH, Германия). ННВ газов оценивали по объемным долям и теплотворной способности каждого компонента газа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Характеристика сырья и биоугля

В табл. 1 представлена характеристика сырья и биоугля, полученная в расчете на сухое состояние: элементный состав, содержание золы, расчетная ННВ и выход биоугля. Как указано в табл. 1, кофейная шелуха содержит значительное количество золы по сравнению с пергаментом (7.74 и 1.61 % соответственно). Содержание элементарного углерода в шелухе несколько меньше, чем в пергаменте (45.14 и 49.96 % соответственно). В полученном биоугле значительно увеличилось содержание углерода и снизилось процентное содержание водорода и кислорода по сравнению с исходным сырьем. Это подразумевает, что биоуголь становится все более углеродистым при высоких температурах, выделяя H и O. В то же время биоуголь, полученный из пергамент, содержал гораздо большее количество элементарного углерода по сравнению с биоуглем из шелухи (93.35 и 77.76 %). В результате теплотворная способность биоугля увеличилась на 49 и 57 % по сравнению с сырьем (с 18.19 до 27.19 МДж/кг для шелухи и с 20.16 до 31.77 МДж/кг для пергамент). Выход биоугля из шелухи и пергамент составил 28.92 и 26.20 % соответственно. Это означает, что этим способом будет получено 260-290 кг биоугля при обработке 1 т шелухи или пергамент. Полученный биоуголь может быть использован в зоне газификации в процессе двухступенчатой термохимической конверсии.

3.2. Характеристика синтез-газа

В табл. 2 приведен анализ компонентного состава газа, объемный выход, выраженный в м³ на 1 кг исходного сырья, расчетный ННВ и энергетический выход, который был рассчитан как отношение ННВ

Таблица 1. Характеристика сырья и биоугля

Материал	Элементный состав, мас. %					Зольность, мас. %	ННВ, МДж/кг	Выход биоугля, %
	С	Н	N	S	О			
СН	45.14	5.73	1.51	0.20	39.68	7.74	18.19	-
СН 1000	77.76	0.63	0.90	0.32	0.00	20.39	27.19	28.92
СР	49.96	6.19	0.35	0.03	41.85	1.61	20.16	-
СР 1000	93.35	0.30	0.57	0.04	2.40	3.34	31.77	26.20

Примечания:

- СН – кофейная шелуха, СН 1000 – биоуголь из кофейной шелухи.
- СР – кофейный пергамент, СР 1000 – биоуголь из кофейного пергамента.
- ННВ – высшая теплота сгорания, МДж/кг.
- Элементный состав и зольность представлены в пересчете на сухое состояние.

Таблица 2. Характеристика газовой смеси

Исходный материал	Содержание газов, об. %					Выход газа, м ³ /кг	ННВ, МДж/м ³	Энергетический выход, %
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂			
СН	1.08	47.39	49.95	0.52	1.06	1.35	11.71	86.9
СР	1.39	48.26	48.40	0.88	1.07	1.34	11.76	78.2

Примечания:

- СН – кофейная шелуха, СР – кофейный пергамент.
- ННВ – высшая теплота сгорания, МДж/м³.
- Теплота сгорания была рассчитана для температуры 20 °С.

синтез-газа, полученного из 1 кг сырья, к ННВ сырья. Газообразная смесь, полученная этим способом, состояла из водорода и оксида углерода в количестве 96-97 %. Объемный выход синтез-газа, полученного термической конверсией двух материалов, оказался примерно одинаковым (1.35 для шелухи и 1.34 м³/кг для пергамента). ННВ полученного синтез-газа также близок по значению (11.71 и 11.76 МДж/м³ соответственно). Энергетический выход немного отличался из-за разницы в ННВ исходного сырья (86.9 и 78.2 % соответственно).

Рис. 2 иллюстрирует выход газа в зависимости от температуры в зоне пиролиза. На рис. 2 также показана скорость газообразования как первая производная от функции выхода газа. Наблюдается, что термическая деградация кофейной шелухи происходила в основном при температурах от 140 до 600 °С, а кофейного пергамента при температурах от 200 до 600 °С. При этом пик газообразования пришелся на 280 °С для шелухи и на 310 °С для пергамента.

В работе [6], в которой представлены результаты исследований медленного пиролиза брикетов из кофейной шелухи, указано, что основная потеря массы происходит в интервале температур 130-430 °С. А максимальная скорость процесса разложения наблюдается между 277 и 292 °С, что хорошо согласуется с полученными данными по кофейной шелухе. Потеря массы сырья при пиролизе связана с выходом летучих веществ, следовательно, напрямую влияет на скорость газообразования на второй стадии процесса.

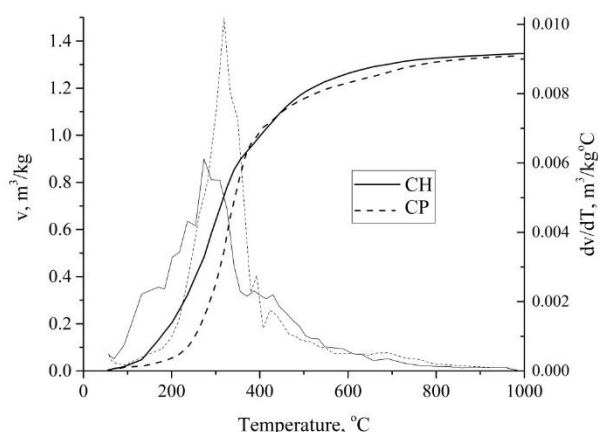


Рис. 2. Зависимость выхода газа v и скорости газообразования dv/dT от температуры в зоне пиролиза: СН – шелуха, СР – пергамент.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухстадийная термическая конверсия кофейной шелухи и пергамента позволяет получать более 1.34 м³ синтез-газа из 1 кг сухой массы сырья. Полученный газ с теплотворной способностью около 11.7 МДж/м³ на 96-97 % состоит из смеси водорода и оксида углерода. Следует иметь в виду, что сырье было высушено перед экспериментом, поскольку повышенная влажность может снизить энергетический выход. Полученный синтез-газ может быть использован как для выработки электроэнергии, так и для производства жидких химикатов, главным образом для топливных целей. При этом география распространения предложенного метода для утилизации от-

ходов производства кофейных зерен будет ограничена тропическим и субтропическим климатом произрастания кофейных деревьев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00835.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

СН – кофейная шелуха;
СР – кофейный пергамент;
СН 1000 – биоуголь, полученный из кофейной шелухи;
СР 1000 – биоуголь, полученный из кофейного пергамента;
Ar – аргон;
ННВ — высшая теплота сгорания, МДж/кг или МДж/м³;
 ν — выход газа, м³/кг;
 dv/dT – скорость газообразования, м³/кг°С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Oliveira F.C., Srinivas K., Helms G.L. and etc.** Biore-sour. Technol. 2018. V. 257. P. 172–180.
2. **Dal-Bó V., Lira T., Arrieche L. and Baceiros M.** Renewa-ble Energy. 2019. V. 142. P. 195–206.
3. **Coffee** in health and disease prevention / L.S. Oliveira, A.S. Franca. Cambridge: Academic Press, 2015. 1080 p.
4. **Melo Pereira G.V., Carvalho Neto D.P., Magalhães Jr A.I. and etc.** Food Chem. 2019. V. 272. P. 441–452.
5. **Kosov V.V., Kosov V.F., Sinelshchikov V.A., and Zaichenko V.M.** The two-stage technology of biomass conversion into synthesis // Energy Book. Series 1. “Mate-rials and processes for energy: communicating current re-search and technological developments”. 2013. P. 393–398.
6. **Setter C., Silva F.T.M., Assis M.R. and etc.** Fuel. 2020. V. 261.

Д.М. Ильин, Т.А. Шестопалова, А.Г. Васьков

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

АННОТАЦИЯ

В статье поднимается проблема систем управления ветроэнергетических установок с асинхронным генератором двойного питания (ВЭУ с АГДП), в нормальных и аварийных режимах. ВЭУ с АГДП имеют преимущество в возможности работы с переменной скоростью вращения, поэтому изучение возможностей их стабильной работы важно. Недостатком является неустойчивость при коротких замыканиях в сети. Статья предлагает использовать методы машинного обучения для управления ВЭУ. При помощи математической модели ВЭУ, моделируются режимы работы. Модель имеет входные параметры — коэффициенты управляющих контроллеров, параметры системы защиты. Настройку параметров предлагается производить группой алгоритмов «обучение с подкреплением», обеспечивающих взаимодействие со средой и решающих задачу оптимизации входных параметров в зависимости от составленной функции награды.

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье поднимается проблема систем управления ветроэнергетических установок с асинхронным генератором двойного питания (ВЭУ с АГДП), в нормальных и аварийных режимах. Поскольку такой тип ВЭУ распространён сейчас на рынке, и они имеют сильное преимущество в возможности работы с переменной скоростью вращения, изучение возможностей стабильной работы таких ВЭУ очень важно. Однако, сильным недостатком ВЭУ с АГДП является их неустойчивость при коротких замыканиях в сети. Данная статья предлагает использовать методы машинного обучения для управления ВЭУ во время аварийных режимов, с целью обеспечения устойчивой работы. Для решения задачи построена математическая модель ВЭУ, для моделирования различных режимов работы ВЭУ и имеющая в качестве входных настраиваемых параметров — коэффициенты управляющих контроллеров и параметры системы защиты, такие как значение шунтирующего сопротивления и интервал времени его ввода. Настройку параметров предлагается производить группой алгоритмов, называемой «обучение с подкреплением», обеспечивающих взаимодействие со средой и решающих задачу оптимизации входных параметров.

1. ПРОБЛЕМАТИКА РАБОТЫ ВЭУ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Согласно отчётам о развитии возобновляемой энергетике в мире [1], только за 2018 год было введено 51 ГВт новой мощности ветроэнергетических установок, а общая мощность ВЭУ составила 591 ГВт. При этом наблюдается экспоненциальный рост вводимых мощностей, и рост мощности вводимых ветропарков и единичных мощностей ВЭУ. К современным ветропаркам предъявляются требования по устойчивости из сетевых стандартов [2]. В разных странах эти требования различаются, но в общем случае существует перечень требований, в частности регламентирующий условия и порядок отключения ВЭУ в случае аварии в сети. При снижении напряжения в точке подключения ВЭУ до определённого уровня, ВЭУ должна оставаться подключённой к сети и иметь возможность выдавать всю доступную реактивную мощность (рис. 1).

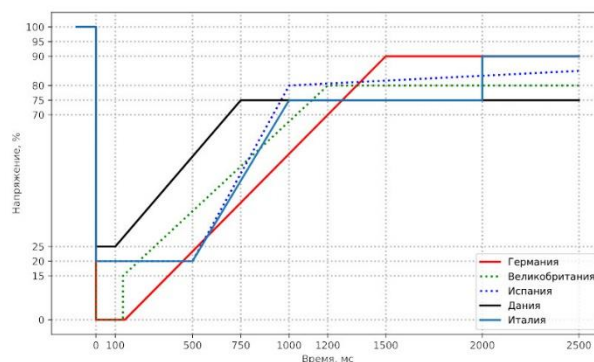


Рис. 1. Требования, предъявляемые к ВЭУ для поддержки энергосистемы.

В изолированных системах к ВЭУ предъявляются особые требования, так как в случаях аварий они должны быть способны максимально поддерживать сеть. Под поддержкой сети подразумевается способность выдавать необходимое количество активной и реактивной мощности за определённое время. ВЭУ должна иметь систему регулирования скорости вращения, генератор поддерживающий переменную скорость вращения и соответствующую систему управления.

Этим требованиям отвечает ВЭУ с АГДП, преобразователь мощности находится в цепи ротора, и может быть рассчитан только на 30% номинальной мощности ВЭУ. Это удешевляет общую стоимость ВЭУ, и позволяет использования в ВЭУ с большими единичными мощностями. Недостатком такого решения является более сложная система управления, нежели в случае с синхронным генератором. На данный момент исследовано множество подходов для управления ВЭУ с АГДП [3, 4, 5, 6]. Другим недостатком является сложность системы защиты такой ВЭУ.

Исследование систем защиты было произведено ранее [7]. Существуют методы, базирующиеся на различной топологии подключения шунтирующих резисторов в цепи статора и ротора АГДП, для рассеяния избыточной мощности, которая поступает к ВЭУ из-за снижения напряжения в точке подключения. Другие методы основываются на настройке стратегии управления преобразователями мощности ВЭУ с АГДП. В данной статье описан подход с использованием машинного обучения, для выявления наилучшей стратегии управления ВЭУ с АГДП в аварийных режимах.

2. РАБОТА ВЭУ С АГДП ВО ВРЕМЯ АВАРИЙ

АГДП представляет собой асинхронный генератор (АГ) с фазным ротором с контактными кольцами на роторе, где статор напрямую подключён в сеть, а ротор через встречный частичный преобразователь мощности. Напряжение на статоре определяется сетью и напряжение на роторе так же зависит от сети и передаётся через преобразователь мощности. Преобразователь состоит из двух типовых преобразователей напряжения (преобразователь на стороне ротора ПСР и преобразователь на стороне сети ПСС) и шины постоянного тока. ПСС обменивается только активной мощностью с сетью, и таким образом передача реактивной мощности от АГДП осуществляется только через статор [8]. Поведение генератора определяется этими преобразователями и их регуляторами как в нормальном, так и в аварийном режимах. Используются два уровня управления ВЭУ с разным временем быстрогодействия: уровень управления ВЭУ, и уровень управления генератором.

Аварии в сети воздействуют как на механическую, так и на электрическую часть ВЭУ. В течении аварии, напряжения и мощность в точке подключения ВЭУ падают, поэтому и падает мощность, выдаваемая ВЭУ. Это приводит к разгону ветроколеса и генератора. Избежать разгона помогает регулятор скорости при помощи регулирования угла лопастей.

Без системы защиты в АГДП могут возникнуть большие токи в статоре при колебаниях в сети, поскольку статор напрямую подключён к сети. Из-за электромагнитной связи между статором и ротором все возмущения в статоре передаются в ротор. Большое напряжение наводится в обмотках ротора,

что приводит к большим токам в роторе [8]. Так как напряжение сети падает во время аварии, ПСС не может передавать энергию от ПСР в сеть и таким образом дополнительная энергия идёт на заряд конденсаторов шины постоянного тока (DC) и напряжение на DC шине быстро растёт.

Простейший метод защиты АГДП – закоротить цепь ротора через шунтирующее сопротивление (crowbar). Если система защиты фиксирует превышение допустимого тока в цепи ротора, подается сигнал на ключи, замыкающие обмотки ротора на шунтирующий резистор. При этом блокируется всякое действие контроллеров ПСР и АГДП ведёт себя как обычный асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГКР), с увеличенным сопротивлением ротора. Независимое управление активной и реактивной мощностями при этом недоступно. Поскольку ПСС не связан напрямую с обмотками генератора, он не отключается системой защиты.

Увеличенное сопротивление crowbar улучшает моментную характеристику и снижает потребление реактивной мощности генератора на определённой скорости [9]. Путём добавления внешнего сопротивления (сопротивление crowbar) в цепь ротора во время аварий, момент выпадения из синхронизма АГКР смещается в область более высокой скорости, и динамическая стабильность ВЭУ улучшается [10].

В работе [9] показывается, что недостаточная или избыточная настройка ПИ регулятора может привести к автоколебательным процессам в редукторе и вызвать срабатывание защиты против механических колебаний. Система регулирования лопастей не способна гасить крутящие колебания из-за её низкого быстрогодействия [11].

3. КОНЦЕПЦИЯ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Используя традиционные методы для настройки систем управления, можно достичь желаемого результата устойчивой работы ВЭУ. Классическая система управления в этом случае будет иметь следующие функции: сбор данных и сигналов с датчиков, оценка состояния системы, управление контроллерами на разных уровнях системы. Трудностью в такой системе является процесс настройки контроллеров.

В нашем случае объектом управления является модель ВЭУ, в составе системы управления, которой есть контроллеры преобразователя мощности генератора. При динамической настройке параметров, в зависимости от текущего режима, возможно оптимизировать работу ВЭУ. Другими важными параметрами, влияющими на состояние ВЭУ в аварийных режимах являются параметры срабатывания системы защиты, а именно: значение шунтирующего сопротивления в цепи ротора, продолжительность включения сопротивления и значение уставок по выдаче реактивной мощности в послеаварийном режиме.

Методы машинного обучения могут решить поставленную задачу, при правильной постановке задачи, выборе правильного алгоритма и способа его тренировки, и точной настройке гиперпараметров. Группа алгоритмов машинного обучения, позволяющих взаимодействие со средой называется обучением с подкреплением (ОП).

В алгоритмах обучения с подкреплением используется следующая терминология:

Среда (ϵ) — объект управления, с которым взаимодействует алгоритм ОП (агент). В рамках нашей задачи, средой является математическая модель ВЭУ и описывающие её переменные.

Агент — алгоритм ОП, воздействующий на среду при помощи определенных возможных действий и изменяющий состояние среды.

Действия агента (a) — изменяемые параметры и сигналы, генерируемые агентом и воспринимаемые средой. В рамках задачи — это изменяемые коэффициенты ПИ контроллеров модели ВЭУ с АГДП, и параметры системы защиты. Принимаемые действия являются непрерывными величинами (continuous action space).

Состояние среды (s) — перечень переменных, описывающих состояние среды. Эти переменные могут изменяться в ответ на принятое действие от агента (увеличение уставки по мощности), либо вне зависимости от действий агента (изменение скорости ветра). В нашей задаче это электрические параметры модели ВЭУ с АГДП: токи и напряжения в точке подключения ВЭУ, частота вращения ВЭУ и значение момента.

Награда (r) — значение функции, характеризующей оценку состояния среды. В нашем случае это может быть амплитуда, частота и продолжительность колебаний токов и напряжений. Определение награды является базовой задачей разработки алгоритма ОП.

Значимость (v) — значение функции, характеризующей оценку состояния среды на определенном промежутке времени в будущем.

Политика (π) — набор правил, которыми руководствуется агент, для выбора возможного действия в каждый момент времени. Политика описывает взаимосвязь между состоянием среды и действиями агента.

Алгоритм тренировки агента — алгоритм для изменения политики, при изменяющемся состоянии среды, работающий с целью получения максимальной награды и/или значимости (в зависимости от типа алгоритма).

Взаимодействие агента со средой ϵ осуществляется путём моделирования математической модели ВЭУ с АГДП в Simulink, на протяжении конечного числа дискретных шагов времени. На каждом шаге t , агент получает информацию о состоянии среды ϵ и выбирает действие a_t из перечня возможных действий A согласно политике π . Политика π определяет соответствие между состояниями s_t и действиями a_t . В ответ, агент получает новое состояние среды s_{t+1} и

получает скалярное значение награды r_t . Процесс продолжается, до тех пор, пока агент не достигает конечного состояния — окончание процесса моделирования в Simulink. На каждом шаге моделирования модели ВЭУ, агент может принять определённое действие - изменить контролируемые параметры. Это действие влияет на среду - модель ВЭУ, и изменяет ее состояние - режим работы ВЭУ, что производит определённую награду за это действие. Далее состояние среды и значение награды за принятое действие передаются обратно агенту, и основываясь на этой информации, агент может принять решение, какое действие необходимо принять в будущем на следующем шаге.

Внутри агента присутствует алгоритм, который приводит в соответствие наблюдаемое состояние среды и действие, которое необходимо совершить в этом случае. Такое соответствие часто является сложной нелинейной зависимостью между наблюдаемым состоянием среды и принятым агентом действием. Для определения этой нелинейной зависимости в ОП используются нейронные сети. Внутри агента необходимо использовать алгоритм агента. Этот алгоритм выполняется внутри агента и предназначен для изменения политики, в зависимости от принятого действия, состояния среды, и значения полученной награды за это действие (рис. 2).

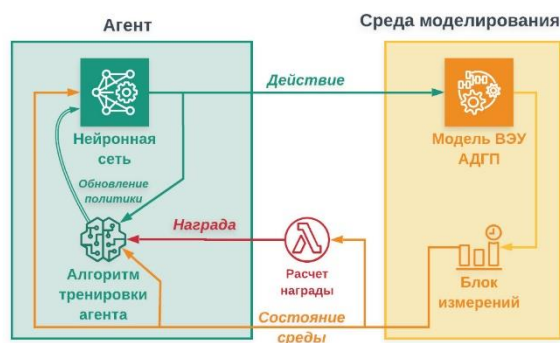


Рис. 2. Принципиальная схема взаимодействия агента со средой.

Согласно общей концепции ОП, целью агента является максимизация награды/значимости (в зависимости от выбранного алгоритма), путём поиска наилучшей последовательности действий в среде.

4. СОЗДАНИЕ АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Для реализации алгоритмов машинного обучения в программной среде Matlab Simulink была создана математическая модель ВЭУ с АГДП, имеющая следующие основные блоки: асинхронный генератор с фазным ротором; аэродинамическая модель ветроколеса; преобразователи мощности для питания обмоток ротора переменным током с изменяющейся частотой; система управления преобразователями мощности.

В созданной модели ВЭУ с АГДП, электрическое регулирование мощности ВЭУ возможно при

помощи системы управления преобразователем мощности. Трёхфазные токи со стороны сети преобразуются из трёхфазной системы координат в двухфазную систему координат d, q . Это позволяет развязать управление мощностью и отдельно регулировать значения тока i_d и i_q . Управляя токами i_d и i_q двух преобразователей (ПСС и ПСР) возможно производить независимое регулирование активной и реактивной мощности, а также контролировать напряжение вставки DC.

В момент пониженного напряжения в точке подключения ВЭУ, но после отключения системы защиты, на вход ПСР подаётся уставка по току i_d , для выдачи реактивной мощности через статор. Эта уставка может быть настроена алгоритмом машинного обучения для обеспечения наилучшей устойчивости.

Модель агента также выполняется в среде Matlab Simulink, с использованием пакета Reinforcement Learning.

Агент RL, как было показано на рисунке 2 получает на вход измерения состояния среды, значение награды и набор флагов, обозначающих конец процесса обучения — рисунок 3.

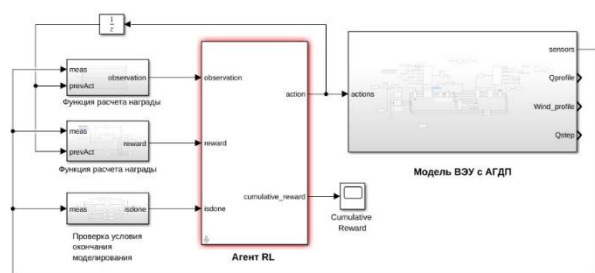


Рис. 3. Пример построения модели ВЭУ и агента в Simulink.

Существует несколько алгоритмов ОП, которые по-разному производят процесс тренировки нейронной сети внутри агента. Алгоритм ОП с использованием Q-функции [12] имеет таблицу соответствия всех возможных состояний системы и соответствующих им действий. Но такой подход имеет проблему экспоненциального роста числа данных, при большом количестве возможных состояний системы.

Однако, используя нейронные сети, возможно найти зависимость нелинейной функции измеряемых состояний системы изменяемых параметров контроллеров и системы защиты, что даёт преимущество использования нейронных сетей. Сама нейронная сеть также подлежит параметризации, при этом необходимо выбрать нужную архитектуру (количество и тип слоёв, количество нейронов в каждом слое, функции активации (нелинейные функции), после чего внутренние веса и отклонения нейронной сети (гиперпараметры нейронной сети) настраиваются уже алгоритмом ОП. Нейронная сеть внутри агента может аппроксимировать нелинейную взаимосвязь между состояниями системы (входные данные в нейронную сеть) и действиями (выходные данные из нейронной сети), после определённой подстройки

гиперпараметров. К нейронной сети предъявляются условия:

а) нейронная сеть должна быть достаточно сложной, чтобы аппроксимировать необходимую нелинейную функцию;

б) нейронная сеть не должна быть слишком сложной, иначе она будет требовать слишком много времени на вычисления.

В алгоритмах, базирующихся на значении значимости каждого действия a_t , используется вторая нейронная сеть, определяющая значимость каждого выбранного действия при каждом новом состоянии среды. Такая нейронная сеть называется «критиком», а нейронная сеть, которая определяет функцию зависимости действия от состояния среды — «актёр».

Задача актёра, как и ранее, определить необходимое действие, в зависимости от состояния среды. Задача критика — оценить это одно действие, которое выбрал актёр и дать ему оценку, рассчитав прогнозируемое значение значимости. Затем эта прогнозируемая величина значимости сравнивается с реальным значением награды, после применения действия к среде. Основываясь на разнице между прогнозируемой величиной значимости и фактическим значением награды, нейронная сеть критик подстраивает свои гиперпараметры и гиперпараметры нейронной сети актёра (рис. 4). Данный класс алгоритма будет применён в поставленной задаче, так как он позволяет работать с непрерывными значениями действий.

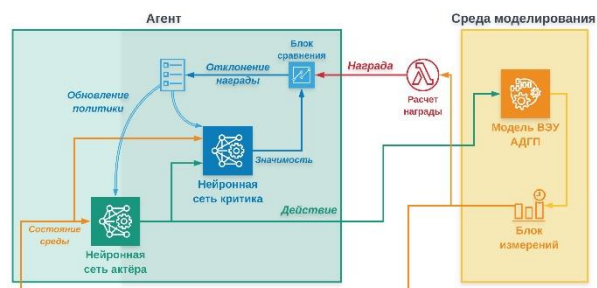


Рис. 4. Полная схема модели актёр-критик.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время, алгоритмы машинного обучения, и в частности нейронные сети являются серьёзным инструментом для решения сложных задач, в основе которых лежат множество изменяющихся во времени параметров с нелинейными зависимостями. Нейронные сети даже простой архитектуры имеют возможность аппроксимации нелинейных функций, с увеличением сложности функции, усложняется и архитектура нейронных сетей, что в свою очередь приводит к увеличению времени вычисления, так называемому времени тренировки нейронных сетей.

Поставленная в исследовании задача может быть решена при помощи нейронных сетей, поскольку десяток параметров с неизвестными зависимостями, которые сложно подобрать традиционными методами. Параметры режима сильно зависят от начальных условий, и могут сильно варьироваться от

рассчитанных теоретических значений. Для взаимодействия с динамически изменяющейся средой, необходимо использовать алгоритмы машинного обучения, которые могут изменять гиперпараметры нейронной сети в зависимости от изменяющейся среды. Примером таких алгоритмов является группа алгоритмов обучения с подкреплением, которые могут быть применены к данной задаче.

Выбранный алгоритм обучения с подкреплением типа «актёр — критик» обеспечивает возможность работы с непрерывными параметрами, передаваемыми как действия для среды. Недостатком такого подхода является сложность в его интерпретации. Однако, эта проблема может быть решена, за счёт анализа изменения коэффициентов усиления контроллеров и параметров системы защиты и сравнения результата с практическими результатами, полученными традиционными методами теории управления.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЭУ — ветроэнергетическая установка;
 АГДП — асинхронные генератор двойного питания;
 ОП — обучение с подкреплением;
 RL — Reinforcement Learning;
 ПСС — преобразователь со стороны сети;
 ПСР — преобразователь со стороны ротора;
 ε — среда;
 a — действия агента;
 s — состояние среды;
 r — награда;
 v — значимость;
 π — политика;
 t — момент времени;
 i_d — ток в оси d координат, о.е;
 i_q — ток в оси q координат, о.е.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Renewable Energy Policy Network** for the 21st Century 2019. Renewables 2019, Global status report. Paris, France: REN21.
2. **Sourkounis C., Tourou, P.** Grid Code Requirements for Wind Power Integration in Europe //Paper presented at the Power Options for the Eastern Mediterranean Region, 2012.
3. **Hansen A.D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F.** Control of variable pitch/variable speed wind turbine with doubly-fed induction generator // Wind Eng., 2004. - vol. 28 - №4. - c.411-432
4. **Hier S.** Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems - Chichester UK: John Wiley and Sons, 1998. - c.143
5. **Leonhard W.** Control of Electrical Drives - New York: Springer, 2001. - c.255
6. **Pena R., Clare J.C., Asher G.M.** Doubly-Fed Induction Generator Using Back-to-Back Converters and its Application to Variable Speed Wind-Energy Generation //IEEE Proceedings on Electronic Power Application, 1996. - №143. - c.231-241
7. **Ilyin D. M., Shestopalova T. A., Vaskov A. G.** Renewable Energy and Power Supply Challenges for Rural Regions: IGI Global, 2019. - c.267-288
8. **Hansen A.D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F.** Grid support of a wind farm with active stall wind turbines and AC grid connection //Wind Energy, 2006. - vol. 6 - c.341-359
9. **Akhmatov V.** Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part II: Power Systems Stability //Wind Engineering, 2002. - Vol. 26. - №3. - c.171-188
10. **Akhmatov V.** Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power //PhD thesis, 2003. -Orsted DTU
11. **Akhmatov V.,** Variable-speed wind turbines with doubly-fed induction generators. Part I //Wind Engineering, 2002. - №2. - c.99-103
12. **Watkins C.J.** Learning from Delayed Rewards //Ph.D. thesis, 1989. - Cambridge University

Ф.В. Молотов, А.Г. Васьков, Т.А. Шестопалова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

УПРАВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫМ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

АННОТАЦИЯ

Локальные энергетические комплексы характеризуются тем, что в них есть не так много источников энергии, как в объединенной энергетической системе. Но в них также требуется соблюдать стандарты по качеству и надёжности электроэнергии. Учитывая наличие в системе возобновляемых источников энергии, нестабильность выработки электроэнергии необходимо компенсировать с помощью гарантированных источников энергии или накопителей. В данной работе рассматриваются различные алгоритмы управления источниками электроэнергии с различной гарантированной мощностью и инерционностью регулирования. Предложенные алгоритмы опробованы на физико-математической модели локальной энергосистемы.

1. ВВЕДЕНИЕ

В России исторически сложилась ситуация, при которой существуют территории, электрически не подключены к объединенной энергетической сети по экономическим или технологическим соображениям. Такие системы называются автономными или локальными энергетическими сетями.

В настоящее время в таких регионах электроснабжение производится с помощью либо дизельных генераторов, установленных ещё в 20 веке и устаревших морально и технически, либо с помощью малых газотурбинных установок. В подавляющем большинстве это всё же дизельные генераторы, завоз дизельного топлива для которых производится либо автомобильным транспортом, либо, в некоторых случаях, морскими судами. Доставка дизельного топлива очень дорогая, на 2020 год стоимость дизельного топлива составляет более 60 тысяч рублей за тонну дизельного топлива.

В связи с высокой стоимостью топлива в некоторых удалённых населённых пунктах были возведены солнечные и ветровые электрические станции, снабжённые автоматизированными системами управления (АСУ). Но АСУ не были доведены до постоянной и надёжной эксплуатации по ряду причин, которые мы рассмотрим в следующем разделе.

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕКСТА ДОКЛАДА

Всё оборудование, поставляемое на вновь проектируемые объекты, поддерживает современные протоколы передачи данных: МЭК-104, МЭК-61850, MODBUS. Однако, старое оборудование не обладает

такими возможностями и зачастую управляется вручную на объекте. Даже на новом оборудовании могут различаться протоколы и интерфейсы передачи данных, что может вызвать серьёзные проблемы в автоматизации таких энергосетей. В связи с этим лучше проектировать такие системы комплексно, оборудование дизельно-генераторной установки должно покрывать все потребности приемников при отключённых источниках ВИЭ. Дизельный генератор должен работать в диапазоне от 30 до 75 % своей номинальной мощности, в противном случае произойдёт его ускоренный износ.

Ещё одной действительно серьёзной проблемой в комплексах с ВИЭ является персонал, обслуживающий его. Из-за недостаточной автоматизации техник должен постоянно следить за работой ветровой или солнечной электрической станции, периодически производя различные переключения и операции. К сожалению, на местах обычно в качестве техников работают пожилые люди, которые могут недобросовестно исполнять свои должностные обязанности и просто отключают ВЭУ (Ветроэнергетическую установку) или СЭУ (Солнечноэнергетическую установку), так как им проще управлять старым дизельным генератором. Для этого необходимо обеспечить невозможность несогласованного проникновения людей в рабочий процесс.

Для полного согласования работы всех генераторов, управляемой нагрузки и потребителей необходимо обеспечить для всех них единый верхний уровень автоматизации. Средний и нижний уровень остаётся на каждом из источников электроэнергии.

Обеспечение единого верхнего уровня позволит уменьшить потери и практически свести на нет сбои в работе. Необходимо стремиться к тому, чтобы сводить данные по всем таким удалённым посёлкам и городам в один ЦУС (Центр управления сетями). ЦУС может иметь полномочия принимать и обрабатывать сигналы и измерения, а также управлять сетью при возникновении внештатных ситуаций. Таким образом можно реализовать так называемую гибридную систему управления комплексами в различных регионах, при этом снизив человеческий фактор до минимума.

3. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС – ФИЗИКО – МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ

При разработке алгоритмов управления энергосистемами необходимо проверять и отрабатывать их на модели энергосети, которая позволяет смоделировать различные режимы работы. Модель содержит в себе следующие блоки:

- Модель ветроэнергетической станции;
- Модель ГАЭС;
- Модель солнечной станции;
- Модель потребителя;
- Модель ДГУ (Дизельной электростанции);
- Модель распределительной подстанции.

Данные с описанных выше модулей передаются в SCADA через интерфейсы Ethernet, USB, RS-485 по протоколу MODBUS RTU. Все модели подключены в одну систему с помощью распределительной подстанции и работают синхронно. Распределительная подстанция так же имеет подключение к ОЭС, однако по работе алгоритма это подключение не используется, так как в этом нет необходимости. Схема электрического соединения моделей представлена на Рисунке 1:

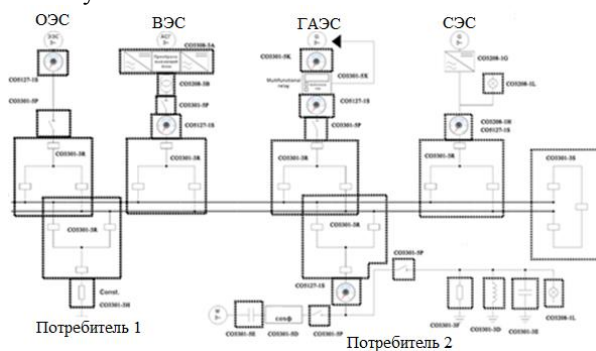


Рис. 1. Электрическая схема соединения моделей источников.

4. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Из-за постоянного изменения скоростей ветра ВЭУ имеют практически нулевую гарантированную мощность, поэтому в системе должны быть либо накопители энергии, либо гарантированные источники.

В данном комплексе ВЭС является сетевой, а не автономной. Необходимо строго выдерживать требования по частоте и напряжению, выходящему с ветрогенератора. Частота электрического тока, выдаваемого в сеть, регулируется с помощью вставки постоянного тока в машине двойного питания. Диапазон частоты вращения генератора, в котором удаётся корректировать частоту электрического тока до значений промышленной частоты (50 Гц) лежит от 1000 до 1800 об/мин. Но нужно иметь в виду, что в надсинхронном режиме синхронизации может не произойти, несмотря на работу регулирующих устройств.

Регулировка выдаваемой мощности ветрогенератора может производиться разными путями:

- Регулирование угла поворота лопастей;

- Регулирование полосы пропускания вставки постоянного тока;
- Изменение возбуждения генератора.

Рассмотрим второй из предложенных способов. Существует такой параметр, как «Derating», его величина может изменяться в пределах (0...100) %, где 0% обозначает минимальное сопротивление вставки постоянного тока, а 100% полное блокирование выдачи мощности.

При достижении данным параметром величины в 100% частота вращения сильно проседает, вплоть до выхода из синхронизации с сетью. При выходе из синхронизации показатель «Derating» обнуляется и генератор прекращает тормозиться. Учитывая, что синхронизация утрачена, генератор может быстро разогнаться. В случаях, когда за время разгона генератор не успевает синхронизироваться с сетью, механическая частота вращения может превысить верхнюю границу диапазона синхронизации и может произойти разгон ротора генератора выше паспортных параметров.

Существуют различные подходы к регулированию параметров ветрогенератора (а также и управляемого потребителя):

- Итерационный метод;
- Метод зависимостей;
- Метод прогнозной оценки на основе метеоданных;
- Метод регулировки на опережение по данным нагрузки.

Рассмотрим самый простой метод – итерационный. Его блок-схема представлена на Рисунке 2:

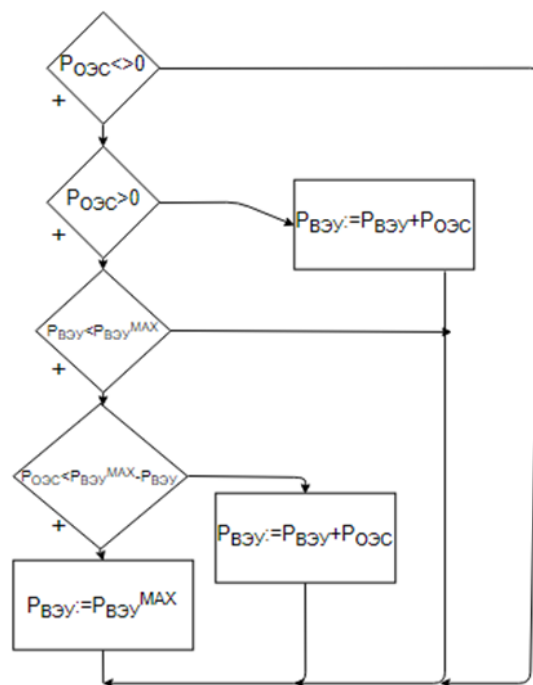


Рис. 2. Итерационный алгоритм ВЭУ.

При управлении ветрогенератором необходимо учитывать также и порывы ветра, чтобы алгоритм на них не реагировал и имел свободный ход. Изменение мощности ВЭС происходит с некоторой инерцией,

что также необходимо учесть, чтобы избежать проблем с длительными колебательными процессами. Улучшенную экспериментальную зависимость можно рассмотреть на Рисунке 3:

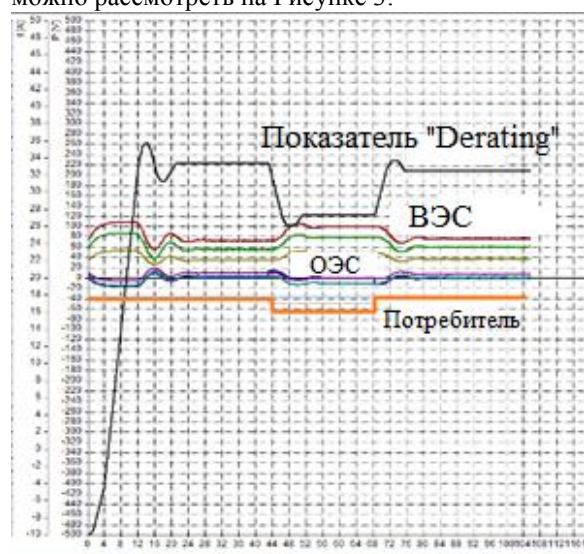


Рис. 3. Зависимость мощности ВЭУ и мощности на потребителе («прогрессивный» алгоритм).

Использование данного алгоритма позволяет управлять WPP многих типов вне зависимости от модели, расположения и потребностей. Он обладает рядом недостатков, например, колебания при изменениях требуемой мощности. В данном случае это происходит по нескольким причинам:

1. Дискретность измерений счётчиками слишком большая, из-за этого происходит отставание реальных значений;
2. Неточность и величина уставок. Из-за несовершенства оборудования происходит большой свободный ход. Это возможно устранить при детальной регулировке под конкретный агрегат, что позволит обеспечить оперативную регулировку параметров.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование интеллектуальных алгоритмов управления локальными сетями позволит экономить большое количество ископаемых ресурсов, но для этого нужно современное оборудование и квалифицированный персонал. Такие системы являются безопасными и эффективными, что позволяет располагать их на многих удалённых территориях по всему миру. При правильном подходе возможно отказаться от гарантированных источников и работать с накопителями энергии, но в таком случае меняется экономическая модель и требуется дополнительное обоснование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **V.A. Gusarov, D.S. Strebkov, V.V. Kharchenko** Power supply of rural territories with the help of micro networks based on renewable energy sources. Moscow, All-Russian Institute for the Electrification of Agriculture (VIESH).
2. **SINA PARHIZI** , (Student Member, IEEE), **HOSSEIN LOTFI**, (Student Member, IEEE), **AMIN KHODAEI** , (Senior Member, IEEE), **AND SHAY BAHRAMIRAD**, (Senior Member, IEEE) “State of the Art in Research on Microgrids: A Review”, IEEE Access (Volume: 3), 2015, pp. 890 – 925.
3. **S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossley** – Microgrids and Active Distribution Networks – The institution of Engineering and Technology 2009.
4. **Pratik Kalkal; Vijay Kumar Garg** Transition from conventional to modern grids: Modern grid include microgrid and smartgrid. 2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPC) Pages: 223 – 228.
5. **Nikolay Galkin; Valeriy Vyatkin** SmartGrid technologies for flexible production: Initial explorations and laboratory case study. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA) Pages: 963 – 968.

А.И. Сажнёв, С.Е. Смирнов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ДИРИЖАБЛЯ

АННОТАЦИЯ

В данной работе был сконструирован и испытан макет силовой установки для беспилотного дирижабля. Макет предназначен для обеспечения электропитанием целевой нагрузки номинальной мощностью не более 500 Вт, пиковой мощностью не более 1000 Вт и суточным энергопотреблением не более 2600 Вт·ч (из них в темное время суток – не более 1300 Вт·ч) при дневной суммарной величине солнечной радиации не менее 5,51 кВт·ч/м² (приведено среднесуточное значение для июля в Московском регионе).

Испытание макета, которое заключается в проверке характеристик отдельных элементов макета в условиях наземной эксплуатации, показало целесообразность использования дирижаблей в сферах услуг.

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия открытия в области химических источников тока, возобновляемой энергетики и композитных материалов, значительно продвинулись вперед.

Сферы применения вторичных химических источников тока становятся всё обширнее, одними из которых стали автомобилестроение и вертолётостроение. В данных сферах аккумуляторы используются в качестве источника питания. Особенно можно выделить автомобили компании Tesla, которые зарекомендовали себя как надёжные, экономные, а главное экологически чистые. [1].

Развитие композитных материалов обязано ракетостроению, особенно ракетносителям для полётов в космос. Главной задачей ракетостроителей было облегчение веса ракеты без потери прочности корпуса. Композитные материалы являются сочетанием разнородных веществ, приводящих к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Композитные материалы превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче.

Возобновляемые источники энергии получили активное развитие в мире после событий произошедших на атомной электростанции Фукусима-1. В результате аварии доля возобновляемых источников энергии увеличилась, так как является более без-

опасной и экологически чистой. В мире стали активнее строить солнечные и ветровые электростанции, что подтолкнуло развитие данных отраслей. [2].

Данное развитие позволило обратить внимание на возможность возвращение дирижаблей. Дирижабли, в отличие от самолётов, всегда обладают положительной летучестью и могут парить в воздухе сколь угодно долго. Заменяв взрывоопасный водород нейтральным гелием, используя для создания обшивки современные композитные материалы, можно увеличить срок эксплуатации дирижабля до нескольких десятков лет. Площадь купола дирижабля измеряется сотнями квадратных метров и по большей части абсолютно свободна. Это идеальное место для того, чтобы разместить комплекс солнечных батарей. Вырабатываемой ими энергии будет достаточно для того, чтобы приводить в движение электромоторы. В качестве накопителя энергии лучше всего подойдут литиевые аккумуляторы, использование которых значительно снизит общие затраты и увеличит ресурс.

Дирижабли можно использовать в сфере грузоперевозок, что значительно ускорит доставку товаров по сравнению с грузовыми автомобилями, и удешевит по сравнению с самолётами.

2. РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

2.1. Обоснование расположения солнечной батареи

Форма оболочки беспилотного дирижабля для расчетов принимается за цилиндр, вертикальное сечение которого, соответственно, представляется в виде окружности (используется левая прямоугольная система координат, положительное направление оси ординат которой соответствует направлению от кормовой части к носовой). Ось абсцисс оболочки ориентирована параллельно земле, угол тангажа и крена составляет 0°. Курсовой угол – произвольный, но для упрощения вычислений считается неизменным в течение суток (0° соответствует направлению на север, угловая мера нарастает по часовой стрелке).

Солнце представляется как бесконечно удаленный точечный источник света, таким образом, его лучи направлены параллельно и постоянно облучают дугу окружности равную 180° (рисунок 1).

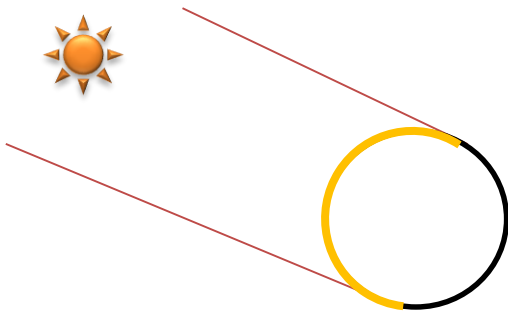


Рис. 1

В различных базах данных присутствуют следующие данные по инсоляции (среднесуточной либо среднемесячной) с учетом региона (учитываются географическая широта, облачность и загрязненность атмосферы пылью и газами) и времени года:

- на горизонтальную поверхность (азимутальной ориентации не имеет);
- на вертикальную поверхность, ориентированную на юг;
- на вертикальную поверхность, ориентированную на различные стороны света (только для безоблачного неба – СНиП 23-01-99 (далее по тексту – СНиП));
- на наклонную поверхность, ориентированную на юг (в различных вариантах: угол наклона α (рисунок 2) равен географической широте места, широте места $\pm 15^\circ$);

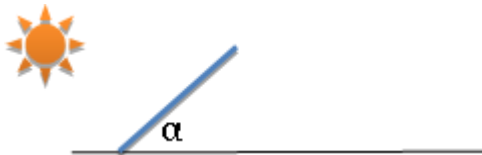


Рис. 2

- на оптимально ориентированную наклонную поверхность (по азимуту ориентация на юг) (угол наклона α меняется ежемесячно) – в базах НАСА;
- на следящую за солнцем поверхность (т.е. панель в течение суток по углу наклона и азимуту поворачивается за солнцем).

Сложность задачи заключается в непостоянстве ориентации дирижабля по азимуту в течение дня, в кривизне поверхности и отсутствии необходимого полного набора данных по инсоляции (различных азимутальных ориентаций панели и различных углов наклона), а также в том, что дирижабль функционирует в большом диапазоне географических широт.

Поэтому при моделировании используются различные приближения, допущения и аппроксимации. [3].

Поскольку беспилотный дирижабль функционирует в широком диапазоне высот, то моделирование будет проводиться по наихудшему варианту – для значений инсоляции на уровне земной поверхности. Кроме того, наиболее полно в базах данных представлены сведения именно по величинам инсоляции на уровне земной поверхности. Изменение инсоляции в атмосфере по высоте, особенно в различных регионах, практически не исследовано.

2.2. Выбор аккумуляторной батареи

Исследуются два высокоэнергоемких аккумулятора LG INR18650MJ1 и Panasonic NCR18650B-1.

Для оценки ёмкости аккумуляторов проводились зарядно-разрядные испытания.

Вторичные источники тока тестировались при температуре 25°C . Заряд проводился методом CC-CV (первая половина заряда проводится постоянным током, во второй поддерживается постоянное напряжение, при этом ток постоянно снижается до нуля, в данном эксперименте до 10 мА). Ток заряда 1,5 А. Разряжаем аккумуляторы постоянным током

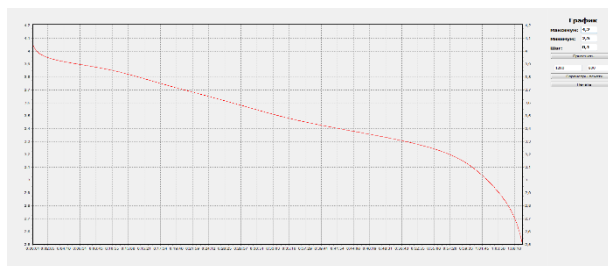


Рис. 3 Разрядная характеристика аккумулятора INR18650MJ1. (метод CC). Ток разряда 3А.

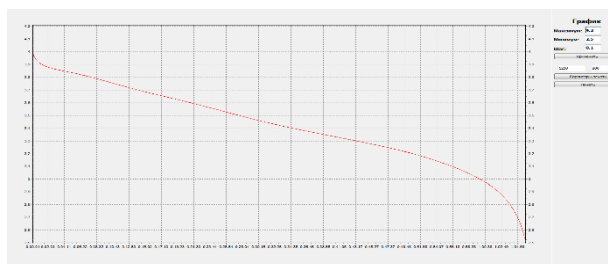


Рис. 4. Разрядная характеристика аккумулятора NCR18650B-1 Ток разряда 3А.

Таблица 1. Параметры аккумуляторов

	INR18650MJ1	NCR18650B-1
Ёмкость на заряде, Ач	3.3854	3.3570
Время заряда, с	16835	18037
Ёмкость на разряде, Ач	3.3650	3.3050
Время разряда, с	4039	3966
Энергия, Втч	11.778	11.301

На основе полученных данных делаем вывод, что аккумулятор фирмы LG обладает большей ёмкостью, чем аккумулятор фирмы Panasonic.[4-5].

Работа аккумуляторов при различных температурах окружающей среды является важным пунктом в исследовании.

Высота барражирования беспилотного дирижабля находится в диапазоне от 15 до 25 км. На таких высотах температура окружающей среды опускается ниже -20°C .

В документациях на оба аккумулятора указана в процентах разрядная ёмкость при разных температурных режимах. Аккумулятор INR18650MJ1 обладает 70% разрядной ёмкости при температуре окружающей среды -20°C , NCR18650B-1- 80%, что значительно лучше, чем у LG.

Масса аккумулятора является одним из критериев сравнения. Масса вторичного источника тока фирмы LG составляет 50 г, фирмы Panasonic 48 г, что меньше первого на 2 г. Panasonic достигли данного показателя за счёт утончения стенок аккумулятора, поэтому «химия» не пострадала.

Обобщение данных полученных в ходе испытаний.

Аккумулятор LGINR18650MJ1 имеет ёмкость больше чем у PanasonicNCR18650B-1 на 60мАч. От PanasonicNCR18650B-1, при температуре -20°C , в ходе разряда снимается 80% ёмкости, от LGINR18650MJ1 70%. На основании этого можно сделать вывод: так как аккумуляторная батарея будет использоваться при температуре окружающей среды -20°C , то аккумуляторная батарея на основе аккумуляторов PanasonicNCR18650B-1 будет иметь большую разрядную ёмкость, чем на основе LGINR18650MJ1

3. ИСПЫТАНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Макет предназначен для обеспечения электропитанием целевой нагрузки номинальной мощностью не более 500 Вт, пиковой мощностью не более 1000 Вт и суточным энергопотреблением не более 2600 Вт·ч (из них в темное время суток – не более 1300 Вт·ч) при дневной суммарной величине солнечной радиации не менее 5,51 кВт·ч/м² (приведено среднесуточное значение для июля в Московском регионе).



Рис. 5. Испытательная силовая установка.

Испытание макета заключается в проверке характеристик отдельных элементов макета в условиях наземной эксплуатации.

Испытания макета проводились на крыше двухэтажного здания.

Оборудование в составе макета:

- - солнечная батарея (СБ);
- - аккумуляторная батарея (АКБ);
- - программно-управляемый зарядный преобразователь (ПУЗП);
- - балансирующее устройство батареи (БУБ);
- - термоконтейнер с системой термостатирования;
- - полезная нагрузка (вентилятор) и макет оболочки.

В состав оборудования для проведения испытаний макета входят:

- стенд контроля блока аккумуляторов на саморазряд и герметичность;
- имитатор солнечной батареи (источник питания АКПП);
- мобильный терминал (ноутбук с установленным специальным программным обеспечением);
- электронная нагрузка Актаком АТН-8180;
- мультиметр Fluke-177;
- пиргелиометр (или актинометр), пиранометр (допускается использование вместо перечисленных приборов люксметра);
- термометр уличный;
- часы.

Перечень параметров, подлежащих регистрации при проведении испытаний:

- -электрическое напряжение ЛИАБ;

- -электрический ток ЛИАБ;
- -электрическая ёмкость ЛИАБ;
- -уровень заряда ЛИАБ(глубина разряда);
- -время заряда ЛИАБ;
- -время разряда ЛИАБ;
- -температура ЛИАБ;
- -напряжение групп параллельно включённых аккумуляторных элементов;
- -электрический ток параллельно включённых групп аккумуляторных элементов;
- -температура в термоконтейнере;
- -электрическое напряжение СБ;
- -электрический ток СБ;
- -ток короткого замыкания СБ;
- -напряжение холостого хода СБ;
- -электрический ток потребления в цепи полезной нагрузке.

Имитация суточного цикла разряда/заряда аккумуляторных батарей при питании от СБ и работе на полезную нагрузку. АКБ, БУБ и ПУЗП помещаются в термоконтейнер. Питание термоконтейнера осуществляется от макета СЭО. Эксперимент проводится на открытом воздухе. Фиксируется температура окружающей среды, актинометрические данные (величина прямой и рассеянной солнечной радиации, величина энергетической освещенности), продолжительность светового дня (когда энергетическая освещенность превышает минимальное рабочее значение). Эксперимент начинается, когда уровень энергетической освещенности позволит СБ обеспечивать питанием полезную нагрузку. АКБ на момент начал эксперимента разряжены до максимально допустимой величины. В ходе эксперимента постоянно фиксируется вся совокупность телеметрической информации о работе СБ, АКБ, полезной нагрузки и системы термостабилизации. Эксперимент продолжается в течение суток. Результаты считаются успешными, если к началу светового дня следующих суток (когда уровень энергетической освещенности вновь станет достаточным для питания полезной нагрузки от СБ) степень разряженности АКБ не достигнет предельно допустимого значения. Эксперимент служит для верификации математической модели система энергообеспечения (СЭО) и уточнения параметров узлов, входящих в состав макета

Испытания макета должны проводиться с использованием испытательного стенда на основании получаемой телеметрической информации при отключенной СБ и обеспечении электропитания имитатором СБ в закрытом помещении при следующих климатических условиях:

- температуре окружающей среды в диапазоне от 15 до 25 °С;
- относительной влажности в диапазоне от 45 до 90 %;
- атмосферном давлении в диапазоне от 86 до 106 кПа (от 645 до 795 мм рт. ст.).

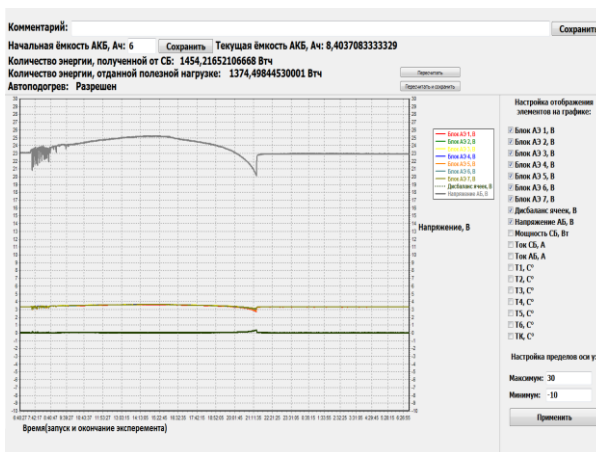


Рис. 6. Показания напряжения: напряжение на блоках 1-7, дисбаланс ячеек, напряжение аккумуляторной батареи.

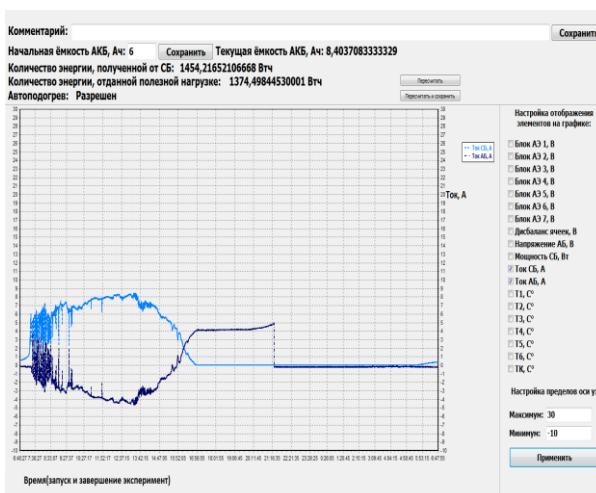


Рис. 7. Показания тока: ток аккумуляторной батареи, ток солнечной батареи.

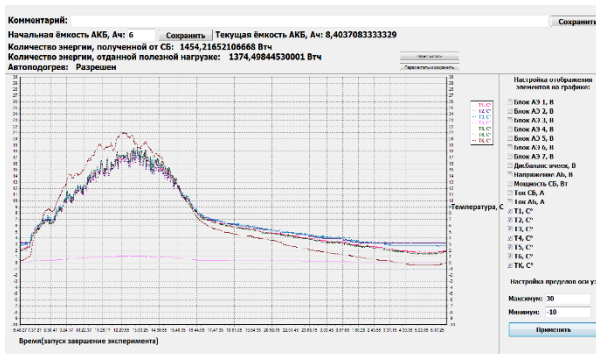


Рис. 8. Показания температуры: температура на 1 аккумуляторном блоке, температура на 2 аккумуляторном блоке, температура на 3 аккумуляторном блоке, температура на 4 аккумуляторном блоке, температура на 5 аккумуляторном блоке, температура на 6 аккумуляторном блоке, температура на 7 аккумуляторном блоке.

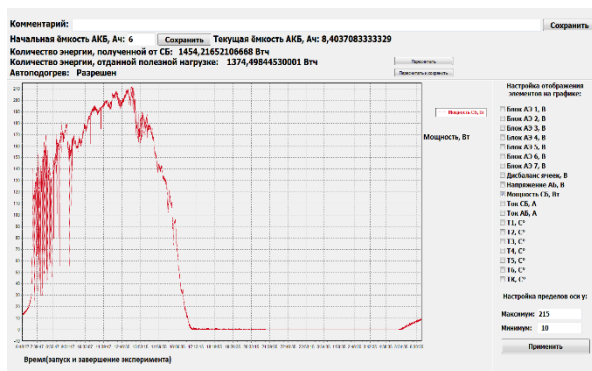


Рис. 9. Показания мощности солнечной батареи.

Измерение напряжения на выходе ЛИАБ» показал следующие результаты:

- -полная доступная емкость ЛИАБ составила 65 А·ч;
- -изменение напряжения холостого хода в зависимости от степени разряженности составило 8,88 В (от 29,32 до 20,44 В);
- -изменение напряжения под нагрузкой в зависимости от степени разряженности составило 10,85 В (от 28,35 до 17,50 В).
- -количество энергии, полученной ЛИАБ от имитатора СБ: 1454 Вт·ч;
- -продолжительность эксперимента: 24 часа 33 минуты;
- -температура ЛИАБ не превысила допустимого предела, максимальное значение составило 21.2°С;
- -дисбаланс напряжений на блоках аккумуляторных элементах составил 0,05 В, что соответствует допустимому уровню.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность данной работы заключается в том что дирижабль является более безопасным, экологически чистым и экономически выгодным средством, как передвижения, так и грузоперевозок. Для обоснования расположения солнечной батареи мы взяли

значения инсоляции на уровне земной поверхности. Нами был выбран аккумулятор NCR18650B-1 так как при отрицательной температуре окружающей среды отдаёт на 10% больше ёмкости, чем INR18650MJ1, а так же является более лёгким.

В результате проведенных испытаний, когда контролировались : ёмкость АКБ, изменение холостого хода в зависимости от степени разреженности, количество энергии полученной от СБ, можно сделать вывод, что данная силовая установка способна функционировать сутки в автономном режиме. А это, в свою очередь, показывает целесообразность использования дирижаблей в сферах услуг.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- СНиП- Строительные нормы и правила
 АКБ— аккумуляторная батарея;
 ЛИАБ — литий-ионная аккумуляторная батарея;
 СБ— солнечная батарея
 СЭО -система энергообеспечения
 ПУЗП - программно-управляемый зарядный преобразователь ;
 БУБ -балансировочное устройство батареи ;
 СНИП-Строительные НОРМЫ И ПРАВИЛА

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортон В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2011, 168 с.
2. Григорьева А.В., Кулова Т.Л., Скундин А.М., Гудилин Е.А., Гаршев А.В., Третьяков Ю.Д. // Альтернативная энергетика и экология. 2008. № 8. С. 86.
3. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Анализ эффективности использования автономных фотоэлектрических систем наружного освещения в климатических условиях Москвы и юга России // Теплоэнергетика. 2012 №11. С.19-25
4. Xiao T., Tang Y., Jia Z., Feng S. // Electrochim. Acta.2009. V. 54. P. 2396.
5. Huang X.H., Tu J.P., Xia X.H., Wang X.L., Xiang J.Y.,Zhang L., Zhou Y. // J. Power Sources. 2009. V. 188.

А.А. Сысоев

Кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии
Национальный исследовательский институт «МЭИ», Москва, Россия

УЧЕБНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПЛАНИРОВАНИЮ РЕЖИМА РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлен учебно-программный комплекс (далее – комплекс), реализующий возможность планирования долгосрочного режима работы ГЭС с учетом требований водопользователей. Комплекс разработан на высокоуровневом языке программирования Python на основе актуальных требований, указанных в правилах использования водных ресурсов Воткинского водохранилища. Комплекс планируется использовать в курсе лабораторных работ по планированию режима работы ГЭС, и для проверки курсовых работ

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОБУЧЕНИЮ

В современных условиях особое значение в техническом образовании приобрело обучение инновационной деятельности и умению работать в команде. В интерактивных технологиях претерпевают изменение роли обучающего и обучаемых, также меняется роль информации: информация становится не целью процесса образования, а средством для освоения действий и операций [1]. Практическая научно-исследовательская деятельность студентов позволяет обеспечить выполнение трёх важных требований к современному процессу обучения:

1. Обеспечение пространства самостоятельного и свободного действия.
2. Работа в команде, в условиях, близких к реальным.
3. Пройти самостоятельный путь от получения знаний к их применению и развитию способностей.

В условиях ВУЗа проблемные ситуации возникают при условиях, если студенты:

- не знают, как решить поставленную задачу, объяснить явления, факты, не могут дать ответ на проблемный вопрос;
- видят противоречие между достигнутым на практике результатом выполнения задания и отсутствием знаний для теоретического обоснования того результата;
- сталкиваются с использованием полученных ранее знаний в иных условиях.

Внедрение компьютерных технологий в учебный процесс, а также насыщение ВУЗов компьютерной

техникой, значительно ослабило интерес к техническим средствам других видов.

Профессиональный стандарт 20.007 «Работник по планированию режимов гидроэлектростанций/гидроаккумулирующих электростанций» формулирует основную цель вида профессиональной деятельности следующим образом: планирование водно-энергетических, электроэнергетических и гидрологических режимов работы гидроэнергетических объектов, обеспечивающее надежную, бесперебойную и безаварийную работу оборудования и производство электроэнергии.

Данная работа посвящена решению некоторых проблем обучения студентов по проведению расчетов водно-энергетического режима работы ГЭС, включающей в себя следующие знания, умения и навыки:

- Расчет оптимального водно-энергетического режима станции/каскада станций;
- Выполнять расчеты водохозяйственных и водно-энергетических режимов гидроэнергетических установок с водохранилищами разного вида регулирования речного стока;
- Осуществлять проверку правильности выполненных расчетов, достоверность итоговых и промежуточных результатов, обеспечивать в случае необходимости выполнение повторных (проверочных) расчетов;
- Проводить расчёты в соответствии с действующими требованиями НТД, предъявляемыми к результатам расчётов;
- Использовать в работе нормативную и техническую документацию.

В работе предлагается решение проблемы отработки студентами практических навыков выполнения планирования водно-энергетического режима работы ГЭС в соответствии с действующими требованиями НТД с помощью программного комплекса, реализованного на языке программирования Python с помощью библиотеки PyQt5.

Программный комплекс создан для решения задач проектирования долгосрочного и среднесрочного режима работы Воткинской ГЭС. В программе наглядно представлен процесс планирования режима

работы ГЭС с учётом требований по эксплуатации гидротехнического сооружения и требования водопользователей и водопотребителей Воткинского гидроузла [2].

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ДОЛГОСРОЧНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГЭС

Реализуемый комплекс предназначен для расчёта долгосрочного режима работы гидроэлектростанции. В качестве рассматриваемой ГЭС была взята Воткинская ГЭС. Станция была выбрана из-за полноты технической информации и отсутствия ограничений по расчёту, которые трудно было бы реализовать. Рассмотрим методику планирования долгосрочного режима работы ГЭС, используемую в данной работе.

Для планирования долгосрочного режима работы в качестве основного документа используются правила использования водных ресурсов водохранилища. На долгосрочный режим работы гидроэлектростанции накладываются ограничения, связанные с требованиями, выдвигаемыми водопользователями в качестве примера ниже приведены ограничения, установленные Федеральным агентством водных ресурсов для Воткинской ГЭС [6]:

- С 10.04.2019 до 10.06.2019 по требованиям рыбного хозяйства необходимо обеспечивать плавное повышение уровня водохранилища, а затем стабильность уровня воды в водохранилище;
- С 01.12.2019 до 28.02.2020 по требованиям рыбного хозяйства, по возможности, производить сработку водохранилища плавно;
- С 01.04.2019 сработка водохранилища запрещена по требованиям рыбного хозяйства;
- До 31.03.2019 и после 11.11.2019 сбросы через водосливную плотину запрещены;
- С 01.04.2019 до 10.11.2019 при условии достижения отметки НПУ возможно открывать затворы на водосливной плотине и совершать холостые сбросы;
- На 21.04.2019 отметка гидроузла не должна превышать уровень принудительной предполоводной сработки $VУПС=85$ м;
- С 01.05.2019 до 10.11.2019 – в период навигации минимальная отметка на период навигации составляет 86 м, в течение всего периода навигации она не должна быть ниже $VМНУ=87$ м;
- Максимальная суточная амплитуда колебаний уровня воды в нижнем бьефе гидроузла в летний период не должна превышать 3,5 м, а в зимний период 5,0 м;
- Максимальный напор составляет 23 м;
- Минимальный напор составляет 12,25 м;
- С 01.05.2019 до 10.11.2019 – в период навигации минимальный расход в нижний бьеф должен быть не ниже $Q_{баз} = 1300 \text{ м}^3/\text{с}$;
- Санитарный расход в нижний бьеф составляет $Q_{сан} = 400 \text{ м}^3/\text{с}$.

С учётом этих ограничений необходимо определить режим работы гидроэлектростанции на последу-

ющий год. Получив режим работы, можно будет сказать сколько электроэнергии вырабатывает гидроэлектростанция за год, определить зону работы станции в годовом графике нагрузки, составить график ремонтов и оценить прибыль, которую может получить станция за последующий год.

В данной работе рассматривается водохозяйственный год, который начинается 11.04.2019 и заканчивается 10.04.2020. Водохозяйственный год разбит на 20 расчётных периодов с продолжительностью от 10 до 31 дней, год разбит в соответствии с правилами использования водных ресурсов [6].

В качестве исходной информации для проведения расчёта потребуется:

- Расход приточности для каждого расчётного периода: $Q_{пр}(t), \text{м}^3/\text{с}$;
- Кривые связи верхнего и нижнего бьефов: $Z_{вб}(V_{вдхр}), \text{м}$; $Z_{нб}(Q_{нб}), \text{м}$;
- Потери напора на водоподводящих сооружениях: $\Delta h, \text{м}$;
- Потери расхода в верхнем бьефе: $\Delta Q, \text{м}^3/\text{с}$;
- Эксплуатационные характеристики гидроагрегатов;
- Отметка на начало расчёта, определяется заданием на расчёт: $Z_{вб}, \text{м}$;
- Диспетчерский график водохранилища;

По имеющейся исходной информации и заданной исходной отметке на начало расчётного периода, определяются зона работы в поле диспетчерского графика и средний расход этой зоны, далее, по представленному алгоритму, определяется отметка верхнего бьефа на конец расчётного периода. Представленный алгоритм соответствует порядку расчёта, представленному в [7].

Полученная отметка верхнего бьефа наносится на диспетчерский график, если конечная отметка не выходит за границы рабочей зоны и не нарушены ограничения, накладываемые другими водопользователями, то данный сбросной расход в нижний бьеф принимается в качестве основного для данного расчётного интервала, полученная отметка верхнего бьефа становится начальной отметкой для следующего расчётного периода.

Если полученная отметка на конец расчётного периода выходит за границы зоны, то необходимо скорректировать сбросной расход, чтобы конечная отметка попала на границу зон диспетчерского графика, для этого в качестве конечной отметки расчётного периода задаётся отметка верхнего бьефа на границе зон диспетчерского графика и по формулам, указанным выше получить сбросной расход в нижний бьеф. При попадании конечной отметки на границу зон диспетчерского графика, средний сбросной расход может быть задан в пределах от минимального расхода вышележащей зоны до максимального расхода вышележащей зоны. Пересечение зоны диспетчерского графика в течение расчётного интервала не допускается.

ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ И ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Основные функции, используемые в программном комплексе:

- «Получение исходных данных» – функция обрабатывает значения расхода и отметок, в зависимости от варианта расчёта;
- «Создание графической сцены» – функция отвечает за нанесение графических изображений на область построения графика. К графическим изображениям относятся: координатная сетка, диспетчерский график, режим работы ГЭС, зоны диспетчерского графика;
- «Расчёт режима работы» – основная функция программы, отвечающая за обработку входных данных, получение расчётных величин, взаимодействие с функциями по нанесению режима работы ГЭС на графическую сцену и внесения полученных результатов в расчётную таблицу;
- «Соответствие ограничениям» – функция отвечает за вывод в текстовое поле информации о несоответствии накладываемым ограничениям или пересечении диспетчерского графика;
- «Экспорт результатов» – функция отвечает за создание отдельного файла Microsoft Excel и наполнения его результатами проведённого расчёта: расчётные параметры и получаемый режим ГЭС;
- «Учёт ограничений» – функция отвечает за корректировку накладываемых ограничений при проведении расчёта;
- «Корректировка внешнего вида программного комплекса» – функция отвечает за перемещение элементов программы при смене размера окна.

Внешний вид окна комплекса представлен на рисунке 1

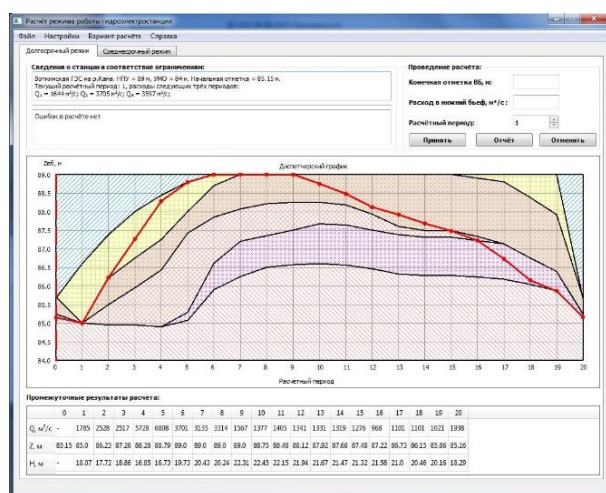


Рис. 1 Внешний вид окна программного комплекса с нанесённым режимом (красная линия).

Подразумевается следующий порядок работы с созданным комплексом:

- Пользователь выбирает вариант расчёта, во вкладке «Вариант расчёта»;

- Пользователь вводит интересующее значение на конец расчётного периода: конечную отметку верхнего бьефа или средний расход в нижний бьеф;
 - При вводе среднего расхода в нижний бьеф, проводимый расчёт будет полностью соответствовать алгоритму, описанному в п. 3;
 - При вводе конечной отметки алгоритм расчёта изменяется: по конечной отметке находится конечный объём, затем рассчитывается изменение объёма и вычисляется сбросной расход. Алгоритм соответствует порядку расчёта, описанному в [7].
- По результатам расчёта, вне зависимости от введённого значения, в промежуточную таблицу с результатами расчёта заносятся следующие значения:
 - Средний расход нижнего бьефа в расчётном периоде – $Q_{нб}$;
 - Конечная отметка в расчётном периоде – $Z_{вб}^к$;
 - Средний напор в расчётном периоде – \bar{H} .
- На форму «Соответствие ограничениям» выводится информация по несоответствию контрольных параметров ГЭС заданным ограничениям в расчётном периоде с указанием периода, в котором было это нарушение. В программе были добавлены следующие ограничения:
 - С 1 по 20-ый расчётный периоды отметка верхнего бьефа не может принимать значения выше 89 м, отметка НПУ;
 - С 1 по 20-ый расчётный периоды отметка верхнего бьефа не может принимать значения ниже 84 м, отметка УМО;
 - С 1 по 20-ый расчётный периоды значения среднего напора не могут принимать значения выше 23 м, максимальный напор;
 - С 1 по 20-ый расчётный периоды значения среднего напора не могут принимать значения ниже 12.25 м, минимальный напор;
 - С 1 по 2-ой и с 14 по 20-ый расчётный периоды значения среднего расхода не могут быть ниже 400 м³/с, санитарный расход;
 - С 3 по 13-ый расчётный периоды значения среднего расхода не могут быть ниже 1300 м³/с, навигационный расход;
 - В 1-м расчётном периоде отметка верхнего бьефа не может быть ниже 85 м, уровень предполоводной сработки;
 - В 2-м расчётном периоде отметка верхнего бьефа не может быть ниже 86 м, преднавигационный уровень;
 - С 3 по 13-ый расчётный периоды отметка верхнего бьефа не может быть ниже 87 м, навигационный уровень;
 - С 1 по 6-ый расчётный периоды значения среднего расхода не могут быть ниже 7000 м³/с, запрет на холостые сбросы.
- В поле «Соответствие ограничениям» выводятся нарушения о несоответствии расхода диспетчерской зоны, согласно алгоритму, описанному в п 4;

- Если контрольные параметры ГЭС будут удовлетворять всем ограничениям, то в поле «Соответствие ограничениям» выводится текст: «Ошибок в расчёте нет»;
- Переход к следующему расчётному периоду производится автоматически, соблюдение всех ограничений не требуется.

В программе предусмотрена возможность проведения среднесрочного режима расчёта, внешний вид комплекса при таком расчёте представлен на рисунке 2.

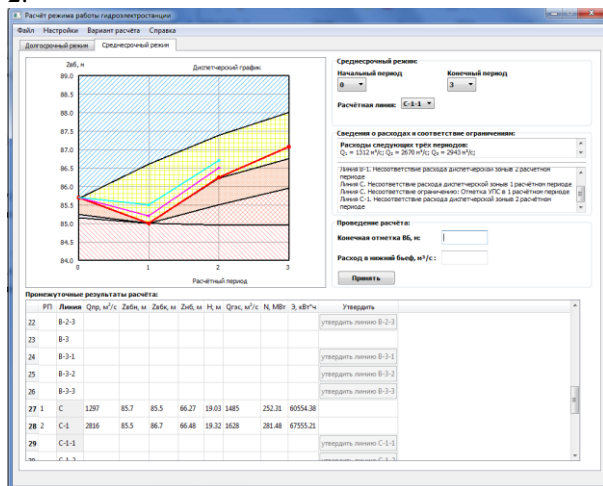


Рис. 2. Внешний вид программного комплекса с нанесённым среднесрочным режимом расчёта.

Под среднесрочным режимом подразумевается режим расчёта, длительностью в три расчётных периода. Данный режим необходим для проведения уточняющих расчётов. При проведении среднесрочного режима работы, алгоритм работы программы будет аналогичен описанному выше, за исключением некоторых особенностей:

- Перед началом расчёта необходимо уточнить интересующий начальный период работы;
- При проведении расчёта имеется возможность выбора расчётной линии: А, В, С. Каждая линия в каждый расчётный период может быть разбита на 3 дополнительные линии, позволяя провести 27 уникальных расчётов, интересующих трёх расчётных периодов. Каждая линия имеет своё название, пример расшифровки названия линии А-2-3: Линия А в первом расчётном периоде, 2-я линия во втором расчётном периоде, 3-я линия в третьем расчётном периоде;
- При выборе интересующей линии алгоритм проведения расчёта будет аналогичен алгоритму для долгосрочного режима, описанному выше;
- После проведения расчёта, появляется возможность переноса полученного результата на долгосрочный режим расчёта. Для этого необходимо нажать на кнопку «Утвердить линию X-X-X». Режим выбранной линии будет пересчитан в долгосрочном режиме расчёта.

ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для анализа режима введена возможность сохранения получаемых результатов. Получаемые результаты можно сохранить как отдельный файл Microsoft

Excel с расширением .xlsx. Для активации данной функции необходимо нажать на кнопку «Отчёт», затем необходимо задать имя файла и его местоположение.

В сохранённой книге будет представлена таблица с параметрами:

- Номер расчётного периода;
- Продолжительность расчётного периода в днях;
- Средний расход приточности за расчётный период, м³/с;
- Отметка верхнего бьефа на начало расчётного периода, м;
- Отметка верхнего бьефа на конец расчётного периода, м;
- Средняя отметка нижнего бьефа, м;
- Средний напор за расчётный период, м;
- Величина среднего сбросного расхода за расчётный период, м³/с;
- Средняя мощность за расчётный период, МВт;
- Средняя выработка за расчётный период, млн. кВт.ч.

Справа от таблицы будет представлена картинка полученного режима работы гидроэлектростанции за посчитанные расчётные периоды в формате PNG. Данные, вносимые в выходную форму, могут быть в дальнейшем использованы для проведения расчётов или других целей, выходящих за рамки данной работы.

Расчётные значения, полученные в результате уточняющего среднесрочного расчёта, не сохраняются.

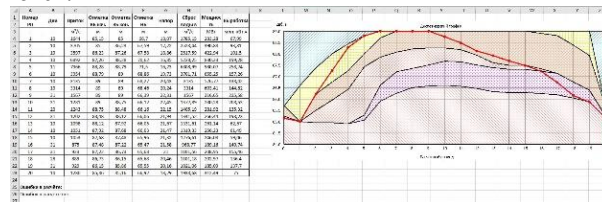


Рис. 3 Вид выходной отчётной формы.

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

К программным особенностям созданного комплекса можно отнести следующие факторы:

- Слабая зависимость комплекса от реализованной станции;
- Комплекс реализован с помощью современных программных средств: высокоуровневого языка программирования Python и библиотеки PyQt5, что даёт большой потенциал для доработки и поддержки;
- Отсутствие необходимости предварительной установки комплекса на персональный компьютер;
- Возможность продолжения работы с комплексом при его закрытии, результаты расчёта заносятся в отдельный файл с расширением .tmp.
- К методологическим особенностям созданного комплекса можно отнести следующие факторы:
- Возможность проведения 27 уникальных уточняющих среднесрочных расчётов с последующей возможностью переноса результата на долгосрочный расчётный режим;

- Возможность нескольких вариантов корректировки полученных результатов: сменой расчётного периода и вводом новых значений, отменой полученных ранее результатов и вводом новых значений, корректировка полученных значений напрямую из таблицы промежуточных результатов расчёта;
- Возможность быстрого подбора режима работы гидроэлектростанции без необходимости написания алгоритма, что позволяет обучаемому понять, как различные входные данные влияют на конечный режим работы гидроэлектростанции;
- Возможность проведения расчётов без учёта одного или нескольких требований, указанных в п. 3;
- Необходимость изучения нормативно-технической документации для корректной работы с комплексом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При отработке практических навыков выполнения планирования водно-энергетического режима работы ГЭС/ГАЭС, студенты очень много времени тратят на выстраивания однотипного алгоритма планирования режима работы ГЭС/ГАЭС. Ради экономии времени, некоторые характеристики снимаются упрощённо, принимаются допущения, упрощающие расчёт. Зачастую написанный алгоритм хорошо работает лишь при определённых начальных условиях, которые показывают лишь часть возможных режимов работы станции.

Для сокращения времени на подготовку к решению поставленной задачи, в том числе снятие сложных характеристик бьефов и эксплуатационных характеристик оборудования, был разработан данный учебный комплекс. Учебный комплекс был реализован в среде программирования VBA как приложение Microsoft Excel.

Учебный комплекс позволяет быстро проводить планирование долгосрочного режима работы ГЭС с учётом требований водопользователей и водопотребителей Воткинского водохранилища с нанесением полученного режима работы на диспетчерский график водохранилища. Данный комплекс предназначен для отработки практических навыков выполнения планирования водно-энергетического режима работы ГЭС/ГАЭС, с его помощью можно быстро проверить полученный ранее долгосрочный режим работы станции на предмет нарушения требований водопользователей или зон диспетчерского графика.

Так же студент сможет быстро сделать иной режим работы станции и сравнить его с режимом, полученным ранее.

Так как данный комплекс разработан на примере действующего документа, то имея опыт работы в таком комплексе и понимая особенности планирования режимов реальных станций, студенту будет проще при работе с программными комплексами, которые используются для планирования режимов ГЭС/ГАЭС.

В перспективе данный программный комплекс планируется развивать до полноценной программы, позволяющей рассчитать долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные режимы работы не только Воткинского гидроузла, но других гидроэлектростанций России для заданной обеспеченности притока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Минобрнауки России от 21.11.2014 г. N 1500 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 13.04.02 электроэнергетика и электротехника (уровень магистратуры)".
2. Приказ Минобрнауки России от 03.09.2015 N 955 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (уровень бакалавриата)".
3. **Фишер Н.В.** Инновационные технологии в профессиональном образовании // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 3: Педагогика и психология . 2010. №1. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-tehnologii-v-professionalnom-obrazovanii> (дата обращения: 04.12.2015).
4. Водно-энергетические и водохозяйственные расчёты. Учебное пособие по курсу «Теоретические основы энергетики и возобновляемых источников энергии» под редакцией В.И. Виссарионова. Издательство МЭИ, Москва, 2001
5. Высокоуровневый язык программирования Python: (www.python.org);
6. Приказ Федерального агентства водных ресурсов от 07.11.2015 N 225 "Об утверждении Правил использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р.Кама"
7. **Виссарионов В.И.** «Водно-энергетические и водохозяйственные расчёты. Учебное пособие по курсу «Теоретические основы энергетики и возобновляемых источников энергии». Издательство МЭИ, Москва, 2001. – 56 с

Р.П. Шевердиев

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ГИБРИДНЫЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС ГАРАНТИРОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлены математические модели режимов работы установок в составе гибридного энергокомплекса, учитывающие ресурсные, технические и технологические особенности их функционирования в децентрализованных системах энергоснабжения. На основе предложенной модели разработана 3Д модель гибридного энергокомплекса, позволяющая исследовать его рабочие режимы в реальных условиях эксплуатации. Предложенные методики могут применяться при решении проектных задач по обоснованию параметров систем децентрализованного энергоснабжения потребителей в изолированных и труднодоступных энергорайонах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Существующие оценки использования энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в единой энергетической системе России, за исключением крупных ГЭС, показывают их малую конкурентоспособность по сравнению с крупными электростанциями на ископаемых видах энергоресурсов. С одной стороны, это связано с малой мощностью и высокой стоимостью производимой электроэнергии на наиболее распространенных солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанциях по сравнению с крупными электростанциями, работающими в ЕЭС России. С другой стороны, включение СЭС и ВЭС в ЕЭС России связано с необходимостью обеспечения гарантии энергоснабжения, несмотря на нестабильность прихода первичного ресурса этих станций.

Использование ВИЭ в системах распределенной генерации, прежде всего в изолированных и удаленных энергорайонах, которые составляют примерно 2/3 территории страны, привлекательно из-за высокой себестоимости (в некоторых случаях до 80 руб/кВт·ч) энергии, вырабатываемой 900 дизельными электростанциями (ДЭС) с общей выработкой 2.54 млрд. кВт·ч в год, определяющейся высокой стоимостью доставки в эти районы топлива; высокого удельного расхода топлива (до 850 г/кВт·ч) на ДЭС; значительного ущерба окружающей среде выбросами продуктов сгорания дизельного топлива и засорения ее использованной тарой от дизтоплива [1].

Международный и российский опыт решения проблем энергоснабжения изолированных энергорайонов показывает, что применение установок на основе ВИЭ в них является эффективным способом как с экономической, так и с экологической точек зрения [2–4]. Такой способ энергоснабжения позволяет сократить потребление дорогого органического топлива, увеличить надежность системы энергоснабжения, снизить стоимость произведенной единицы электроэнергии, а также улучшить экологическую ситуацию в этих зонах.

2. ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ВИЭ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Основными недостатками ВИЭ являются малая плотность энергетического потока, и отсутствие гарантированной мощности некоторых установок ВИЭ, т.е. мощности, которая с гарантией 95 % и выше может быть доставлена потребителю [5]. Эти недостатки связаны с непостоянством во времени таких источников энергии, как солнечное излучение, ветер, сток малых рек, тепло окружающей среды.

Наиболее волатильными по выдаваемой мощности установками ВИЭ являются фотоэлектрические (ФЭУ) и ветроэнергетические установки (ВЭУ).

На рис. 1 приведены мгновенные значения солнечной радиации и мощности ФЭУ, снятые 14.07.2019 года в г. Новочебоксарск. Анализ рисунка показывает, что значение солнечной радиации стохастически изменяется по времени и в широком диапазоне даже на коротких интервалах времени. Изменчивость прихода солнечной радиации связана с ее зависимостью от климатических и географических условий и, соответственно, приводит к нестабильности вырабатываемой ФЭУ электрической энергии.

Нестабильность вырабатываемой ФЭУ электрической энергии связана с временной изменчивостью прихода солнечной радиации, рассеянностью, низкой плотностью и зависимостью от климатических и географических условий.



Рис. 1. Мгновенные значения солнечной радиации и мощности ФЭУ.

Самым непостоянным из всех ВИЭ видом энергии является ветер. Так как вырабатываемая ВЭУ мощность пропорциональна кубу скорости ветра, а скорость ветра стохастически изменяется во времени, то соответственно изменяется и мощность ВЭУ. Например, выходная мощности ВЭУ на острове Попова, как показывает анализ реальных данных, в течение часа может колебаться от 0 до 48 % установленной мощности ВЭУ. Это значит, что в изолированных энергосистемах ВЭУ не могут обеспечить бесперебойное - с надежностью 95 % и выше - энергоснабжение потребителя.

Одним из способов создания у энергоустановок на основе ВИЭ гарантированной мощности, является их включение в гибридные энергокомплексы (ГЭК) совместно с источниками мощности гарантированного энергоснабжения, например, ДЭС и (или) накопителями энергии.

3. СТРУКТУРА ГЭК

На рис. 2 представлена структурная схема предлагаемого ГЭК гарантированного энергоснабжения, которая состоит из разнотипных источников энергии, как традиционных, так и возобновляемых, и накопителей энергии: дизель-генераторная установка (ДГУ), ФЭУ, ВЭУ, гидроэнергетическая установка (ГЭУ), преобразователь энергии (ЭК), солнечная система теплоснабжения (ССТ), накопитель электрической энергии (НЭЭ), накопитель тепловой энергии (НТЭ) и потребители электрической (ПЭЭ) и тепловой энергии (ПТЭ).

Ключевыми компонентами в схеме ГЭК являются ДГУ, выступающая в роли гарантированного источника мощности, и системы аккумуляции электрической и тепловой энергии. Преобразователь энергии (ЭК) в схеме ГЭК выступает одновременно как преобразователь и регулятор мощности ГЭК.

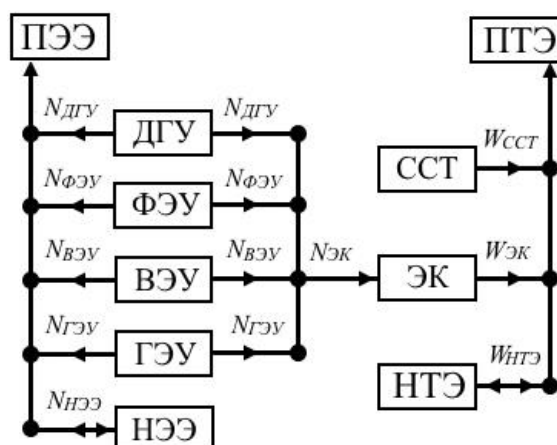


Рис. 2. Структурная схема ГЭК гарантированного энергоснабжения.

Задача определения оптимальной структуры ГЭК состоит в обосновании оптимального соотношения установленной мощности генерирующих установок с учетом реальных климатических условий эксплуатации, характеристик используемого оборудования, а также особенностей потребителя. Указанная задача требует решения вопросов согласования режимов работы разнородных источников энергии и потребителей энергии ГЭК в установившихся и переходных режимах.

4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК В СОСТАВЕ ГЭК

Предлагаемая схема ГЭК гарантированного энергоснабжения является изолированной, т.е., не имеет связи с внешними электрическими и тепловыми сетями (см. рис. 2). Поэтому баланс мощности ГЭК можно представить в виде суммы значений рабочей мощности источников электрической и тепловой энергии ГЭК в каждый момент времени и суммы мощности потребителей за вычетом потерь на передачу и преобразование энергии в виде следующей

системы уравнений.

Электрический баланс ГЭК в каждый момент

$$N_{ДГУ}(t) + N_{ФЭУ}(t) + N_{ВЭУ}(t) + N_{ГЭУ}(t) \pm N_{НЭЭ}(t) = N_{П}(t) + N_{ЭК}(t), \quad (1)$$

где $N_{П}(t)$ – потребляемая мощность в каждый момент времени.

Тепловой баланс ГЭК в каждый момент времени:

$$W_{ЭК}(t) + W_{ССТ}(t) \pm W_{НТЭ}(t) = W_{П}(t), \quad (2)$$

где $W_{П}(t)$ – тепловая нагрузка потребителя в каждый момент времени при условии:

$$k_{ЭК}(t) \cdot N_{ЭК}(t) + W_{ССТ}(t) \pm W_{НТЭ}(t) = W_{П}(t), \quad (4)$$

Рабочий режим установок в составе ГЭК в каждый момент времени определяется по следующим выражениям:

$$N_{ФЭУ}(t) = C_{FF} \cdot n_{ФЭУ} \cdot \eta_{conv} \cdot \ln(10^6 \cdot R(t)) / T_{ФЭУ}(t), \quad (5)$$

$$N_{ГЭУ}(t) = \begin{cases} 9.81 \cdot Q_{ГЭУ}(t) \cdot H \cdot \eta_{ГЭУ} \\ N_{П}(t) + N_{ЭК}(t) - N_{ФЭУ}(t) - N_{ВЭУ}(t) \end{cases}, \quad (6)$$

$$N_{ВЭУ}(t) = \begin{cases} N_{ном}^{ВЭУ} \cdot \frac{V(t) - V_{min}}{V_P - V_{min}} \rightarrow V_{min} \leq V(t) \leq V_P \\ N_{ном}^{ВЭУ} \rightarrow V_P \leq V(t) \leq V_{max} \\ 0 \rightarrow V(t) < V_{min} \cap V(t) > V_{max} \end{cases}, \quad (7)$$

$$N_{ДГУ}(t) = N_{П}(t) + N_{ЭК}(t) - N_{ФЭУ}(t) - N_{ВЭУ}(t) - N_{ГЭУ}(t) - (N_{ЭЭ}(t)), \quad (8)$$

$$W_{ССТ}(t) = R(t) \cdot S_{ССТ} \cdot \eta_{ССТ}, \quad (9)$$

где $n_{ФЭУ}$ – количество ФЭУ, шт; C_{FF} – постоянный коэффициент ФЭУ; η_{conv} – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности; $R(t)$ – величина солнечной радиации в каждый момент времени, кВт/м²; $T_{ФЭУ}(t)$ – температура ФЭУ в каждый момент времени, К[6,7]; $Q_{ГЭУ}(t)$ – расход воды, пропускаемый через ГЭУ, м³/с; H – напор ГЭУ, м; $\eta_{ГЭУ}$ – КПД ГЭУ; $N_{ном}^{ВЭУ}$ – номинальная мощность ВЭУ, кВт; $V(t)$ – скорость ветра в каждый момент времени, м/с; V_{min} – минимальная скорость ветра, при которой ВЭУ начинает работать, м/с; V_P – расчетная скорость ветра, м/с; V_{max} – максимальная скорость ветра, при которой ВЭУ остается в работе, м/с; $S_{ССТ}$ – полезная площадь ССТ, м²; $\eta_{ССТ}$ – КПД ССТ.

времени запишется в виде:

$$k_{ЭК}(t) \cdot N_{ЭК}(t) = W_{ЭК}(t), \quad (3)$$

где $N_{ЭК}(t)$, $W_{ЭК}(t)$ – электрическая и тепловая мощность ЭК в каждый момент времени, соответственно; $k_{ЭК}(t)$ – КПД ЭК.

С учетом (3) уравнение (2) можно записать в следующем виде:

Система уравнений (1) – (9) дополняется моделями электрической и тепловой систем аккумулирования, ограничениями на величины электрических и тепловых потоков, таких как предельные величины энергоисточников ГЭК, их динамические характеристики, а также инерционными звеньями, которые учитывают инерционные процессы в некоторых энергоисточниках. В модели также учитываются технические требования, предъявляемые установками на основе ВИЭ к эксплуатационным характеристикам накопителей энергии по объемам запасаемой энергии, режимам приема и выдачи мощности на разных временных интервалах, определенные ранее в работе [8].

Таким образом, математическая модель режимов работы ГЭК представляет собой совокупность взаимосвязанных моделей режимов работы отдельных генерирующих установок, учитывающих режимные ограничения и критерии оптимизации.

В качестве критериев оптимизации принят минимум мощности ДГУ в каждый момент времени, или минимум расхода дизельного топлива при соблюдении баланса мощности ГЭК:

$$\begin{cases} N_{ДГУ}(t) + N_{ФЭУ}(t) + N_{ВЭУ}(t) + N_{ГЭУ}(t) \pm N_{НЭЭ}(t) = N_{П}(t) + N_{ЭК}(t), \\ k_{ЭК}(t) \cdot N_{ЭК}(t) + W_{ССТ}(t) \pm W_{НТЭ}(t) = W_{П}(t), \\ N_{ДГУ}(t) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (10)$$

Расчеты проводятся для заданных интервалов времени: как секундных, так и более длительных.

5. 3Д МОДЕЛЬ ГЭК ГАРАНТИРОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

На основе предложенной математической модели разработана 3Д модель ГЭК (см. рис. 2), которая представляет собой площадку ограниченной терри-

тории, на которой поблизости друг от друга и от потребителя располагаются генерирующие установки в составе: ДГУ, ВЭУ, ФЭУ, ССТ, гибридный накопитель электроэнергии (литий-ионные аккумуляторные батареи, водородная система аккумулирования и батареи суперконденсаторов), а также тепловой аккумулятор. Приложение написано на С++ с использованием библиотек с открытой лицензией.

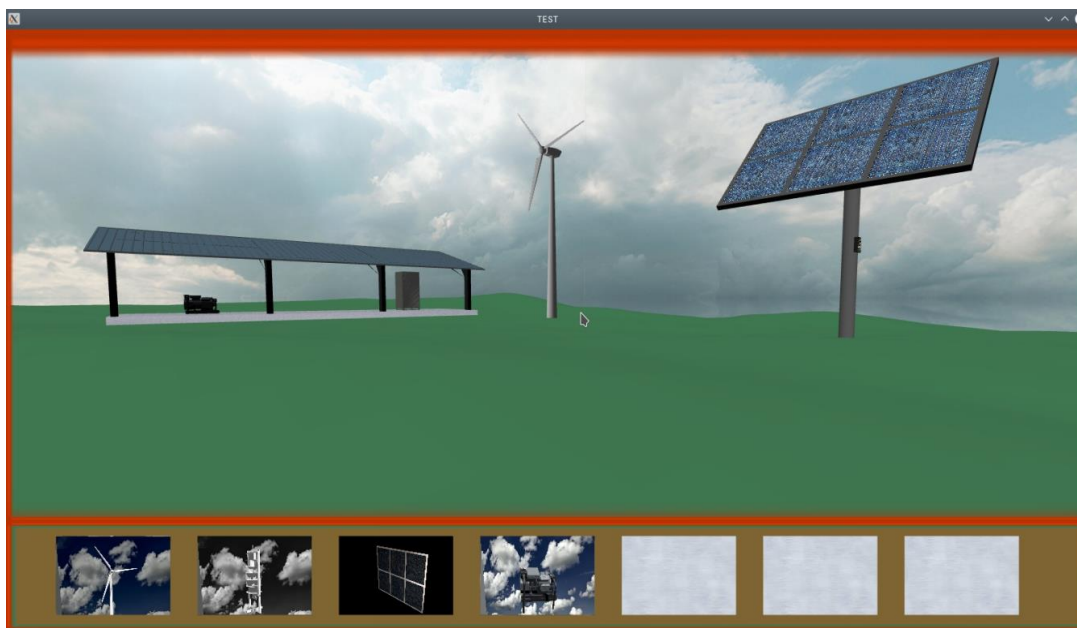


Рис. 2. Принтскрин приложения 3Д модели ГЭК.

В нижней части 3Д модели реализована библиотека моделей, постпредством которой можно изменять состав генерирующих установок ГЭК, а также выбирать для них турбины и генераторы различного типа и конструкции.

Разработанная оригинальная 3Д модель ГЭК позволяет исследовать его рабочие режимы в реальных условиях эксплуатации визуально, а также в графическом виде.

Исходными данными для моделирования являются графики потребления и данные по поступлению ресурсов ВИЭ в каждый момент времени. Задание параметров осуществляется в специальных окошках, которые появляются нажатием на соответствующий объект на модели.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель ГЭК гарантированного энергоснабжения с аккумулированием энергии, которая учитывает ресурсные, технические и технологические особенности функционирования разнотипных установок в его составе в децентрализованных системах энергоснабжения.

Предложены критерии определения оптимального соотношения установленных мощностей генерирующих установок ГЭК с учетом реальных климатических условий эксплуатации, характеристик используемого оборудования, а также особенностей потребителя.

На основе предложенных подходов разработана 3Д модель ГЭК для имитации его режимов работы при различных составе и условиях эксплуатации.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$N_{ДГУ}$ — электрическая мощность ДГУ, кВт;

$N_{ВЭУ}$ — электрическая мощность ВЭУ, кВт;

$N_{ФЭУ}$ — электрическая мощность ФЭУ, кВт;

$N_{ГЭУ}$ — электрическая мощность ГЭУ, кВт;

$N_{НЭЭ}$ — электрическая мощность НЭЭ, кВт;

$N_{ЭК}$ — электрическая мощность ЭК, кВт;

$W_{ССТ}$ — тепловая мощность ССТ, кВт;

$W_{НТЭ}$ — тепловая мощность НТЭ, кВт;

$W_{ЭК}$ — тепловая мощность ЭК, кВт;

$N_{П}$ — электрическая мощность потребителя, кВт;

$W_{П}$ — тепловая мощность потребителя, кВт;

R — значение солнечной радиации, Вт/м²;

P — экспериментальная мощность ФЭУ, Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Елистратов В.В.** Технологические и технико-экономические особенности энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий. – Материалы V Международной конференции «Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы». Том 1. Махачкала 2017 г. С. 42–47.
2. **Попель О.С., Тарасенко А.Б., Филиппов С.П.** Энергоустановки на основе топливных элементов: современное состояние и перспективы. Теплоэнергетика, 2018г., № 12, С. 5–23.
3. **Tyagunov M.** Distributed energy system's is future of the world's power industry // Proceeding of the 2nd International Conference on the Applications of Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems, Amman, Jordan, 6-7 December, 2017 (IT-DREPS 2017): University of Petra, P.113–117.
4. **Шевурдиев Р.П., Тягунов М.Г.** Гибридный энергокомплекс гарантированного энергоснабжения с водородным аккумулярованием энергии // Энергетика. Технологии будущего: II науч.-техн. конф. студентов М.: Издательство МЭИ, 2019. С. 19.
5. **Тягунов М.Г.** Особенности работы установок на основе возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах // Альтернативная энергетика в регионах России: Материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018», 2018, с. 40-44.
6. **Jones A.D.** A thermal model for photovoltaic systems [Text] / A.D.Jones, C.P.Underwood // SolarEnergy. – 2001. – Vol. 70. – No 4. – P. 349–359.
7. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. № 6. С. 38–51.
8. **Тягунов М.Г., Шевурдиев Р.П.** Особенности режимов гибридных энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для определения типа аккумуляторов энергии // Вестник МЭИ. 2020. № 4. [в печати].



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 7

*Экономические аспекты энергосбере-
жения*

МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПО ЭКОЛОГИИ

В РОССИЙСКИХ ТЭК (НА ПРИМЕРЕ ПАО «ИНТЕР РАО»)

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается проблематика внедрения принципов устойчивого развития, активно реализуемых в последние годы в развитых странах и принятых международными рейтинговыми агентствами, в сфере деятельности российских компаний топливно-энергетического комплекса (далее ТЭК). Также в работе анализируются потенциальные положительные эффекты результатов реализации программ энергосбережения в области экологии, экономики и социальной сферы компаний ТЭК.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мировое сообщество уже осознало необходимость заботы об окружающей среде. Одним из основных способов сохранения ресурсов и нанесения наименьшего урона природе является переход на использование возобновляемых источников энергии и энергосбережение в целом.

В Европе и США разработаны экологические стандарты, принят пакет нормативно-правовых документов или 'Legal Framework (Carbon Disclosure Project (CDP) [1], Task Force on Financial related Disclosure (TCFD) [2] и SASB) [3]', которые определяют тренды и требования для социально-ориентированных инвесторов, в свою очередь, транслируя их к российским компаниям. Глобальный рынок капитала и инвестиций определяет необходимость публичным акционерным компаниям соответствовать таким требованиям.

Целью данной статьи является представление обзора современного уровня соответствия российских ТЭК международным стандартам, освещение актуальных проблем в этой сфере и предложение возможного пути развития, основанного на реализующемся примере успеха ПАО «Интер РАО» в данной сфере.

2. ЧТО ТАКОЕ УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ?

2.1 Определение и цели

Определение устойчивого развития впервые появилось в докладе Комиссии ООН по окружающей среде и развитию, который был опубликован в 1987 году. Комиссию возглавляла Гру Харлем Брунтланн – политический и общественный деятель из

Норвегии, которая внесла существенный вклад в продвижение идеи устойчивого развития и в международное сотрудничество в целях его достижения. [4]

Одной из основных идей устойчивого развития является такое развитие человека, которое не будет идти вразрез и ущемлять интересы будущих поколений. Устойчивое развитие это развитие, учитывающее интересы и оптимальность использования ограниченных ресурсов и применение экологических — природо-, энерго-, и материало-сберегающих технологий. Это также стимул к инновациям и новым возможностям, создающим долгосрочную ценность для бизнеса и общества. Ответность по устойчивому развитию может помочь организациям измерять, понимать и развивать свои экономические, экологические, социальные и управленческие показатели, и более эффективно управлять динамикой развития.

2.2 Устойчивое развитие в РФ

В настоящее время базовым документом, определяющим политику Российской Федерации в области устойчивого развития, остается «Концепция перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» 1996 года. Дальнейшее развитие идеи устойчивого развития получило в проекте документа «Стратегия устойчивого развития Российской Федерации» [5], инициатором разработки которого явилось Правительство Российской Федерации.

На данный момент, Аналитический Центр При Правительстве Российской Федерации координирует работу по подготовке Добровольного национального обзора достижения целей устойчивого развития (ЦУР) в России [6] работа идет во взаимодействии с МИД России, Росстатом, другими заинтересованными федеральными органами исполнительной власти и организациями в рамках 17 тематических рабочих групп по каждой цели.

3. ESG РЕЙТИНГИ И РОССИЙСКИЕ ТЭК

3.1 ESG-факторы в современном мире

На корпоративном уровне цели и задачи в области устойчивого развития часто определяются термином – ESG факторы, то есть факторы в области

экологии, социальной ответственности и корпоративного управления (аббревиатура по первым буквам: E – environment, S – social, G – governance). Вопросы ESG приобретают все большее значение для инвесторов всего мира в условиях ужесточения законодательства, повышения стандартов отчетности и раскрытия информации, заключения Парижского соглашения по климату, а также растущей уверенности, что ESG способствует повышению возврата вложенных инвестиций. В настоящее время глобальный размер активов под управлением с фокусом на ESG на 2018г оценивается примерно в \$30,7 трлн [7].

3.2 Сфера анализа компаний на соответствие ESG-принципам

Существует ряд международных общепризнанных компаний, специализирующихся на анализе бизнес-структур с точки зрения уровня соответствия принципам ESG. Например, компания MSCI – глобальный провайдер различных аналитических инструментов (включая индексные показатели акций, облигаций и другие) разработала индекс MSCI ESG[8], предназначенный для поддержки общих подходов к инвестициям по стандартам ESG, и оказывающий поддержку институциональным инвесторам по более эффективному сопоставлению инвестиций в ESG. Данный индекс также управляет, измеряет и сообщает о мандатах ESG. Размер активов охватывает около 58 млрд долларов. Компания RobecoSAM[9], основанная в 1995 году, специализируется на инвестициях в области устойчивого развития. Компания предлагает услуги по управлению активами, расчету индексов, анализу последствий, оценке устойчивости и услуги по бенчмаркингу. Carbon Disclosure Project (CDP) запрашивает у компаний, городов, штатов и регионов данные об их экологических показателях. CDP трансформирует эти данные в подробный анализ критических экологических рисков, возможностей и воздействий. Инвесторы, бизнесмены и политики используют полученные данные и идеи для принятия более взвешенных решений и использования возможностей. Индексы FTSE4Good[10], предназначенные для измерения эффективности компаний, дают представление о компаниях, демонстрирующих сильную экологическую, социальную и управленческую практику (ESG). Размер активов составляет около 200 млрд долларов. Sustainalytics[11] – независимая компания по исследованию и анализу ESG, также поддерживающая инвесторов во всем мире в разработке и реализации ответственных инвестиционных стратегий.

3.3 Факторы роста значимости принципов ESG

Рост интереса к инвестированию, основываясь на принципах ESG, может трактоваться как некая производная того, как меняются рынки и общество, и

как адаптируются концепции оценки бизнеса к данным изменениям. Серьезная проблема для большинства корпораций состоит в том, чтобы адаптироваться к новой среде, которая благоприятствует более ‘умным’, чистым и более ‘здоровым’ продуктам и услугам, и оставить позади догмы индустриальной эры, когда загрязнение было бесплатным, труд был просто фактором стоимости и масштабы были доминирующей стратегией. Для инвесторов данные ESG приобретают все большее значение для выявления тех компаний, которые имеют прочные позиции и хорошие перспективы в будущем, и для выявления компаний, которые могут оказаться неэффективными. Сегодня инвестиции в ESG достигли такого уровня, когда они могут значительно ускорить трансформацию рынка в лучшую сторону. При условии, что политические и экономические решения будут основаны на принципах открытости и прозрачности, и не ухудшатся в дальнейшем, рыночные изменения будут иметь большой позитивный эффект в действительно глобальных масштабах.

3.4. Стандарты ESG в РФ

Интеграция стандартов ESG в российском обществе менее развита, чем в странах Европы, США. Тем не менее Российская Федерация стремится к повышению своего имиджа, как страны, заботящейся об окружающей среде, на международной арене. Примером тому служит повышение в международных ESG рейтингах ряда российских ТЭК. Данные сайта MSCI ESG приведены в таблице 1. (по шкале от AAA до CCC)

Стоит отметить, что между российской и зарубежной системами есть существенные различия в методологии оценки экологических показателей в сфере ТЭК. Примером тому является различие параметров оценки по выбросам парниковых газов (далее ПГ). Так, по GHG Protocol[12], валовый объем выбросов ПГ может отличаться от значения аналогичного показателя, рассчитанного по методике, утвержденной Приказом Минприроды России № 300[13] по двум причинам:

- во-первых, в расчете по методологии GHG применяются коэффициенты не только для диоксида углерода (CO₂), но и для других парниковых газов, таких, как метан (CH₄) и оксид азота (N₂O);
- во-вторых, в расчете по методологии GHG учитываются выбросы, в том числе, от передвижных источников, например, автотранспорта, спецтехники, судов и летательных аппаратов.

Несмотря на некоторые различия в методиках оценки ряд ведущих российских компаний в сфере ТЭК соответствует международным стандартам и требованиям и не отстает от зарубежных компаний по показателям энергоэффективности и энергосбережения.

Таблица 1 «Оценка от 01.05.2020 Российских ТЭК по международной анкете MSCI ESG»

Компания ТЭК	Оценка MSCI ESG (AAA -CCC)
ПАО «Интер РАО»	A
НК «Роснефть»	B
ПАО «Газпром»	BBB
ПАО «Лукойл»	BBB

В рамках данной статьи мы рассматриваем успешный пример ПАО «Интер РАО» и объясняем связь между высокими показателями энергосбережения и экологическими оценками международными рейтинговыми компаниями.

4. ПРОГРАММА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ (ПЭИПЭ) В ПАО «ИНТЕР РАО»

4.1 Цели программы

Группа «Интер РАО» в 2019 году выпустила Годовой отчет, в котором последовательно показала свои достижения в области энергосбережения и соответствия международным ESG факторам по целому ряду параметров.

В ПАО «Интер РАО» разработана программа, нацеленная на повышение эффективности управления в сфере энергосбережения и повышения

энергоэффективности (ПЭИПЭ) на 2019-2023 гг. – одна из целевых программ группы. С реализацией данной программы тесно связана Комиссия по энергоснабжению и повышению энергетической эффективности ПАО «Интер РАО» и дочерних обществ.

4.2 Доказательства эффективности программы

Программа уже доказала свою эффективность. Согласно годовому отчету компании, за 2019 год осуществление программы ПЭИПЭ способствовало экономии:

1. условного топлива – 46,877 тыс. т у. т.;
2. тепловой энергии – 39,002 тыс. Гкал;
3. электроэнергии – 3,699 млн кВт•ч;
4. воды – 19,69 млн м³.

(далее см. «Таблицу 2»)

Таблица 2 «Экономия энергоресурсов»

Виды сэкономленных энергоресурсов	Ед. изм.	2017	2018	2019	Изм. К 2018 г., %
Суммарное сокращение потребления топлива и энергоносителей, которого удалось добиться в качестве прямого результата инициатив по энергосбережению и повышению энергоэффективности					
Топливо	тыс. т у. т.	134,8	105,7	47,9	-56%
	ТДж	3 951	3 098	1 374	
Электроэнергия	Млн кВт•ч	14,2	15,1	3,7	-76%
	ТДж	51,0	54,2	13,3	
Тепло	тыс. Гкал	22,4	7,5	39,0	423%
	ТДж	93,9	31,2	163,2	
Вода	млн м ³	0,0	4,7	19,7	317%

Таблица 3 «Показатели энергоёмкости»

	Ед. изм.	2017	2018	2019	Изм. К 2018 г., %
Удельный расход топлива для выработки тепловой энергии	г у.т./кВт•ч	303,14	296,99	295,22	-0,6%
Удельный расход топлива для выработки электроэнергии	кг/Гкал	143,90	144,36	144,79	0,3%
КИТТ	%	48,35	49,49	49,5	0,0%
Удельный перерасход («перезжог») условного топлива	г / кВт•ч	1,75	1,935	1,5	-22,5%
Общие относительные потери тепловой энергии при передаче по тепловым сетям	%	17,05	18,61	18,31	-1,6%
Относительные затраты электроэнергии на передачу тепловой энергии по тепловой сети	кВт•ч / Гкал	6,51	6,125	6,49	6,0%

Стоит отметить, что показатели энергоёмкости, отраженные в «Таблице 3» и достигнутые благодаря Программе по энергосбережению (ПЭИПЭ) следующие:

- повышен коэффициент использования тепла топлива (КИТТ) до 49,54% на 0,06 п.

- снижен удельный перерасход топлива до 1,5 г/кВт•ч;
- снижен УРУТ электроэнергии на 0,31 г/кВт•ч до 295,22 г/кВт•ч;

5. ИНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ НА АТМОСФЕРУ

5.1 Изменение структуры топливного баланса

Одними из главных невозобновляемых источников энергии в деятельности ПАО «Интер РАО» являются природный газ и уголь. Известный факт, что угольная электрогенерация производит наибольший объем выбросов в атмосферу. Ввиду этого, Группа меняет структуру топливного баланса своих генерирующих активов в направлении увеличения использования природного газа. Об этом свидетельствуют следующие данные: в 2019 году по сравнению с 2018 г. доля угля в топливном балансе сократилась с 20,1% до 19,1%. Дополнительным фактором сокращения доли угля стала продажа в декабре 2019г. Экибастузской ГРЭС-2 с установленной мощностью 1 000 МВт

5.2 Модернизация оборудования

Еще один путь снижения негативного влияния на окружающую среду – модернизация генерирующих мощностей. Она позволяет существенно снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. Группа «Интер РАО» активно занимается повышением эффективности своих золоулавливающих установок. Модернизированные установки способны лучше улавливать твердые частицы. Также для предупреждения нанесения вреда окружающей среде на объектах генерации устанавливаются системы постоянного контроля выбросов.

5.3 Применение технологии когенерации

Еще одним эффективным инструментом по снижению негативного влияния ТЭК на окружающую среду является механизм когенерации. Когенерация – это процесс выработки как электрической, так и тепловой энергии на одном оборудовании, в следствие чего, потребитель получает и электрическую, и тепловую энергию при низких удельных расходах топлива. Одна из особенностей когенерации заключается в том, что при росте выработки тепловой энергии на установке, повышается ее КПД – это в свою очередь снижает расход топлива на выработку энергии и выбросы вредных веществ и парниковых газов в атмосферу. В следствие этого, такие объекты выгоднее всего устанавливать вблизи крупных городов, где высокий спрос на теплоэнергию.

Экономически оправданное увеличение доли конденсационных и теплофикационных ПГУ и ГТУ средней и большой мощности в структуре генерирующих мощностей газовой генерации (в т. ч. с применением российских газотурбинных двигателей) с показателями энергоэффективности (КПД или УРУТ) и экологической безопасности (удельные выбросы) на уровне лучших мировых аналогов.

Энергообъекты, работающие по когенерационному циклу, входящие в Группу ПАО Интер РАО, расположены в городах Уфе, Томске, Омске, Калининграде, Санкт-Петербурге, Сочи и других. В 2019 г. по теплофикационному циклу данными станциями было выработано 25% электроэнергии и 79% тепла.

ПАО «Интер РАО» по Анкете MSCI ESG по вопросам усовершенствования механизма выбросов углерода и снижения выбросов парниковых газов получили 8 из 10 баллов за счет исполнения компанией средне- и долгосрочных целей по снижению удельных выбросов парниковых газов с анализом мер и проектов, которые будут способствовать реализации этих целей. Такая высокая оценка была достигнута благодаря приверженности цели по снижению выбросов CO₂ на единицу генерируемой электроэнергии, CO₂(г)/кВт*ч., закрепленной в плане инновационного развития компании (ПИР) [15] на период 2020-2024гг.

6. ПАРИЖСКОЕ СОГЛАШЕНИЕ

В ноябре 2015 года в Париже прошла 21 конференция в рамках Конвенции ООН по климатическим изменениям. Цель конференции – подписание международного соглашения по снижению темпов глобального потепления.

В рамках подготовки Парижской конференции COP21, более 140 стран-участниц сделали свои заявления и обозначили свои национальные вклады в достижение глобальной экологической цели. Все заявленные проекты направлены на снижение выбросов парниковых газов и развитие национальных экономик. Россия объявила о намерении сократить выбросы парниковых газов до уровня 70-75% 1990 года. Обязательства нашей страны основаны, в первую очередь, на факторе масштабов землепользования и лесов.

21 сентября 2019 года Премьер-министр России Дмитрий Медведев подписал постановление правительства о принятии Парижского соглашения о климате [16]

Учет роли лесов в абсорбции углеродных выбросов и роли нелесных наземных экосистем, как глобальных резервуаров углерода, безусловно важен, с точки зрения включения новых национальных экологических обязательств в «Парижский протокол». Однако, по нашему мнению, при определении национального вклада нашей страны, обязательно необходимо оценить возможности снижения углеродных выбросов в результате реализации нескольких дополнительных направлений деятельности в рамках реализации «Энергетической стратегии России 2035»[17]:

- внедрение энергоэффективных технологий в промышленности и коммунальном хозяйстве;
- сокращение использования угольного топлива с одновременным развитием возобновляемой энергетики;
- сокращение выбросов метана при производстве нефти и природного газа.

7. РАЗВИТИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

По оценкам экспертов Ассоциации Номер Семь[18], интегральный эффект для экономики России от развития возобновляемой энергетики составит более 160 млрд. руб., из которых более 70 млрд.

руб. пойдут напрямую в бюджеты различных уровней и внебюджетные фонды в виде пошлин, налогов и страховых взносов. Дополнительная экспортная выручка составит более 60 млрд. руб., а затраты на экологию сократятся на 28 млрд. руб. В отрасли ВИЭ будет создано 25 000 рабочих мест, в смежных отраслях – более 100 000 рабочих мест.

Полученные результаты расчетов не показывают мультипликативный эффект, предполагающий влияние ВИЭ-отрасли на ВВП России через развитие таких отраслей, как металлургия, энергомашиностроение, электротехника, силовая электроника, транспорт, телекоммуникации, информационные технологии, новые строительные и конструкционные материалы и др.

Консенсус-прогноз развития мирового энергетического сектора до 2050 года от различных организаций и компаний говорит о том, что более 50% энергетического сектора будет состоять из источников энергии с нулевым выбросом углекислого газа (CO₂). На долю ВИЭ придется более половины новых генерирующих мощностей, которые будут введены в эксплуатацию в ближайшие 25 лет. Инвестиции в мировую возобновляемую энергетику составят около 70% от инвестиций в энергетический сектор в размере около 15 трлн. долларов.

Авторы прогнозов указывают, что основным драйвером стремительного роста в использовании ВИЭ станет именно экономический, а не политический аспект. К 2050 году капитальная стоимость ветроэнергетических проектов сократится в среднем на 35%, а солнечных на 50%, благодаря новым технологиям, накопленному опыту и финансированию. С увеличением доли ВИЭ потребуются решать ряд технических вопросов, таких как, создание дополнительных балансирующих мощностей для удовлетворения пиковых нагрузок, создание систем аккумулирования энергии, управления спросом и энергопотреблением.

Развитие возобновляемой энергетики в России идет «малыми шагами» по сравнению с ведущими экономиками мира. В реестре НП «Совет рынка» квалифицированных ВИЭ значится 126 объектов общей мощностью около 1860 МВт. За последние годы Правительством РФ принята полноценная нормативная база, которая создала инвестиционные стимулы для развития ВИЭ.

Не приходится сомневаться в том, что до 2025 года в России будут построены генерирующие объекты ВИЭ общей мощностью около 5 ГВт.

Еще 10 лет назад эта цифра внушала уважение и являлась фактором инвестиционной привлекательности в этом секторе. Сегодня многие страны, которые не имеют ни значительно природного потенциала, ни развитой промышленности, ни квалифицированных специалистов реализуют более амбициозные национальные программы в области ВИЭ. В настоящее время стратегические планы по развитию ВИЭ имеют 164 страны, а «зеленые» тарифы утверждены в 108 странах мира.

ВЫВОД

Концепция энергетики будущего – это совокупность рядов факторов: фактор рационального использования и сбережения ресурсов, ограничение потребления. Все это должно стать основой создания нового энергетического уклада. Энергетика будущего – это новые технологии, позволяющие снизить потери в производственных процессах; это повсеместное внедрение энергосберегающих технологий и безотходных производств; это перестройка экономики из энергоемких в сторону наукоемких отраслей; это широкое участие в глобальной и национальной кооперациях в вопросах устойчивого развития; это формирование у людей понимания важности ответственного потребления ресурсов.

Энергосбережение Генерации в Российских компаниях в отрасли на примере ПАО «Интер РАО» уже учитывает международные экологические требования и постоянно улучшают свое энергосбережение и эффективность, уделяют все больше внимания окружающей среде для будущего развития.

Анализ ПЭИПЭ предприятий ТЭК на примере ПАО «Интер РАО» говорит о том, что российские компании уже учитывают международные экологические требования и постоянно улучшают свои показатели в области энергосбережения и эффективности и уделяют все больше внимания окружающей среде для будущего развития.

Россия стремится стать высокотехнологичной страной и отвечать высоким требованиям в области экологии, социального развития, корпоративных стандартов, тем самым следовать тренду ESG, несмотря на ряд различий в методологиях оценки выбросов.

Таким образом, основными шагами для Российских ТЭК на пути к достижению европейских стандартов и высоких ESG-показателей должны стать следующие мероприятия, которые уже доказали свою эффективность и возможность применения на практике без серьезного экономического ущерба:

- разработка программ по энергосбережению и развитие компании в соответствии с их требованиями
- постепенное изменение топливно-энергетического баланса в сторону газовых активов, более экологичных, чем уголь.
- модернизация генерирующих мощностей
- внедрение и активное применение технологии когенерации.
- Продолжение развития программ стимулирующих ВИЭ, которые продолжают доказывать синергический эффект

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Carbon Disclosure Project (CDP)** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.cdp.net/en>
2. **Task Force on Financial related Disclosure (TCFD)** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.fsb-tcf.org/>
3. **Sustainability Accounting Standards Board (SASB)** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.sasb.org/>

4. **Х.Н. Гизатуллин, В.А. Троицкий.** Концепция устойчивого развития, новая социально-экономическая парадигма. Журнал «Общественные науки и современность» - №5, 1998г
5. **Указ** Президента Российской Федерации от 01.04.1996 г. № 440 «О Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию»
6. **Аналитический** центр при Правительстве Российской Федерации Добровольный национальный обзор. – Москва, 2020 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://ac.gov.ru/projects/project/dobrovolnyj-nacionalnyj-obzor-dostizhenia-celej-ustojcivogo-razvitiia-10#>
7. По данным 2018г Global Sustainable Investment Alliance, [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.gsi-alliance.org/wp-content/uploads/2019/06/GSIR_Review2018F.pdf
8. **MSCI ESG** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.msci.com/esg-ratings>
9. **RobecoSAM** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.robecosam.com/en/>
10. **FTSE 4 GOOD** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.ftserussell.com/products/indices/ftse4good>
11. **Sustainalytics** Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.sustainalytics.com/>
12. **The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard revised edition, 2004.** [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://ghgprotocol.org/corporate-standard>
13. **Приказ** Минприроды России от 30.06.2015 N 300 "Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации" (Зарегистрировано в Минюсте России 15.12.2015 N 40098)
14. **Годовой** отчет ПАО «Интер РАО» 2019 [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://www.interra.ru/upload/docs/agsm2020/2_G_otchet_2019_rus.pdf
15. **Паспорт** Программы Инновационного Развития ПАО «Интер РАО» на период 2020-2024гг с перспективой до 2029 года [Электронный ресурс]: – Режим доступа: https://www.interra.ru/upload/Passport_PIR_IRAO_05.022020.pdf
16. **Постановление** от 21 сентября 2019 года №1228. Парижское соглашение по климату принято 12 декабря 2015 года 21-й сессией Конференции Сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Российская Федерация подписала Парижское соглашение 22 апреля 2016 года. <http://government.ru/docs/37917/>
17. **Энергетическая** стратегия России на период до 2035 года [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf
18. **Ассоциация** «Цель номер семь», Москва, Россия Официальный сайт [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.gns.center/>

Д.Ю. Батова, Д.А. Смирнова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

АННОТАЦИЯ

В данной работе проведен анализ хозяйственной деятельности ОА «Татэнерго», по результатам которого предложены мероприятия по улучшению финансового состояния организации. Оценена экономическая эффективность каждого мероприятия и даны рекомендации по их реализации. Также разработан алгоритм, который позволит выявить экономический эффект от внедрения указанных мероприятий на основе анализа хозяйственной деятельности.

1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в Казани физический износ центральных тепловых пунктов (далее – ЦТП) и линий горячего водоснабжения (далее – ГВС) на некоторых участках доходит до 80%, а протяженность труб ГВС составляет 260,36 п.км. К ЦТП подключены 1600 объектов, из них 1200 – это многоквартирные дома. Потери в сети ГВС, учитывая небольшую разницу температур и незначительную длину трасс, выглядят удручающе и составляют минимум 10%. В сумме получается от 20 до 50% потерь.

Новые дома, согласно закону «Об энергоэффективности» [1] сдаются только с автоматизированными индивидуальными тепловыми пунктами (далее – АИТП). При использовании АИТП, подключенных непосредственно к сетям источника, значительно уменьшается потеря на трассе. Использование АИТП по сравнению с ЦТП приводит к уменьшению потерь тепловой энергии как минимум на 15%. А это, в свою очередь, приведет к улучшению показателей хозяйственной деятельности теплогенерирующей компании.

2. АНАЛИЗ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АО «ТАТЭНЕРГО»

АО «Татэнерго» – одна из крупнейших региональных генерирующих компаний Российской Федерации. С 01 декабря 2008 года компанией получен статус субъекта оптового рынка электрической энергии (мощности) и допуск к торговой системе ОРЭМ. По объему производимой продукции АО «Татэнерго» входит в число крупнейших в России производителей электроэнергии. Продажу тепловой энергии АО «Татэнерго» осуществляет на территории Республики Татарстан. [2]

Анализ хозяйственной деятельности компании показал, что промышленная организация имеет высокую долю труднореализуемых активов в виде основных средств, которые снижают данный показатель, но не свидетельствует о недостатке оборотных средств, так как для ведения своей деятельности данному предприятию требуется более низкий размер оборотного капитала. Предприятию в связи со спецификой его деятельности требуется определенный уровень оборотного капитала. Таким образом, коэффициенты, рассчитываемые на основе внеоборотных активов, говорят о его недостаточности. На основе доступности для предприятия заемных источников финансирования можно сделать вывод о том, что предприятию достаточно оборотного капитала, а в случае возникновения потребности в его резком увеличении имеется доступность заемных средств, например, банковского кредитования на основе имеющихся показателей.

Основной проблемой предприятия, с учетом специфики его деятельности, является высокий уровень износа основных фондов. Количество изношенных сетей ГВС, обслуживаемых теплосетью со сроком эксплуатации более 10 лет составляет более 59% от общей протяженности. В среднем износ сетей ГВС порядка 80%, что приводит к значительным потерям тепловой энергии. Отсюда снижение основных финансовых показателей деятельности теплоснабжающей организации и, как следствие, образование значительной по сумме кредиторской задолженности перед подрядными организациями.

На балансе организации накопились значительные объемы дебиторской задолженности, что в сочетании с физическим и моральным износом основных фондов ставит под угрозу ее стабильное функционирование. Также большую часть задолженности перед предприятием составляют долги физических лиц, не оплативших вовремя услуги ЖКХ, а именно долги за услуги теплоснабжения. Если в других отраслях экономики коммерческие предприятия имеют возможность самостоятельно устанавливать цены на производимые товары и оказываемые услуги, то в сфере теплоснабжения ценообразование не относится к ка-

тегории свободного и регулируется Федеральной антимонопольной службой. Предприятия не могут в полном объеме включать в тариф на горячую воду некоторые расходы. В первую очередь это касается тепловых потерь. [3]

Обычно тепловая энергия, переданная в котельной теплоносителю, поступает в теплотрассу и следует на объекты потребителей. Величина КПД данного участка обычно определяется следующим:

- КПД сетевых насосов, обеспечивающих движение теплоносителя по теплотрассе;
- потерями тепловой энергии по длине теплотрасс, связанными со способом укладки и изоляции трубопроводов;
- потерями тепловой энергии, связанными с правильностью распределения тепла между объектами-потребителями, т.н. гидравлической настроенностью теплотрассы;
- периодически возникающими во время аварийных и нештатных ситуаций утечками теплоносителя. [4]

Потери тепловой энергии в теплотрассах горячего водоснабжения не должны превышать 5-7%. Но фактически, по данным АО «Татэнерго», они достигают достигают величины в 15,86% и выше (табл. 1, рис. 1). [0]

Таблица 1. Потери тепловой энергии по сетям ГВС в г. Казань

Показатели	2016 год	2017 год	2019 год
Полезный отпуск тепловой энергии потребителям, тыс. Гкал	5301,6	5100,94	5381,82
Выручка от реализации тепловой энергии, млн руб.	6772,6	6455,3	7319,8
Потери тепловой энергии, %	15,86	15,86	15,86
Потери тепловой энергии, тыс. Гкал	840,83	808,94	853,56

Из таблицы 1 видно, что из-за потерь тепловой энергии в сети ГВС предприятие теряет немалую часть тепловой энергии.

Необходимость модернизации обусловлена значительной изношенностью тепловых сетей и оборудования, высокими издержками в производстве тепла, растущими тарифами и снижением надежности теплоснабжения.

Высокая изношенность оборудования и невозможность погодозависимого регулирования подачи теплоносителя в систему отопления здания являются основными причинами неэффективного использования энергоресурсов со стороны системы отопления здания.

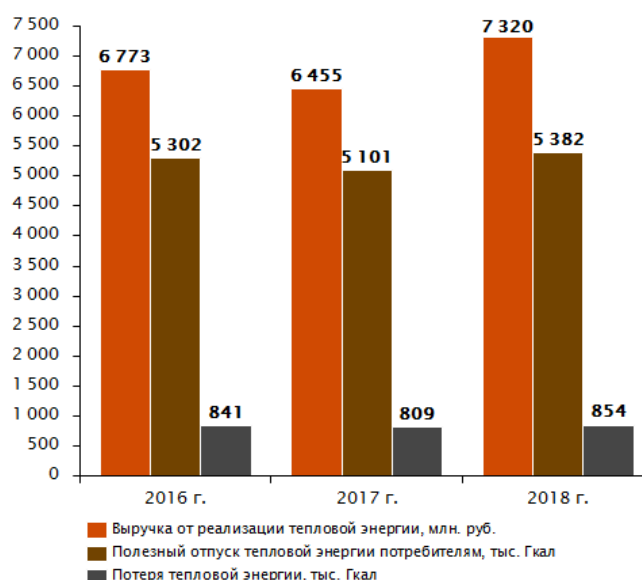


Рис. 1. Потери тепловой энергии.

Избыточное потребление тепла жилым фондом на сегодняшний день, по оценкам специалистов, составляет около 30-40%, в результате чего возникают недовольства со стороны потребителей, а именно жильцов и управляющих компаний, по поводу завышенных счетов на оплату тепловой энергии. Это влечет за собой многозначительные судебные иски и низкую оборачиваемость дебиторской задолженности со стороны данного сектора потребителей, что так же негативно сказывается на финансовом состоянии и имидже компании.

3. КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ АО «ТАТЭНЕРГО»

В целях снижения потерь тепловой энергии в сетях ГВС предлагается рассмотреть два мероприятия:

1. Модернизация ЦТП с переходом на независимую схему;
2. Демонтаж ЦТП и строительство АИТП.

АИТП используется для обслуживания одного потребителя (здания или его части). Как правило, располагается в подвальном или техническом помещении здания, однако, в силу особенностей обслуживаемого здания, может быть размещен в отдельно стоящем сооружении (пристрое).

Теплоноситель, поступающий в индивидуальный тепловой пункт (ТП) по подающему трубопроводу теплового ввода, «отдает» свое теплосодержание в подогревателях систем горячего водоснабжения (ГВС) и отопления (где это необходимо), после чего возвращается в обратный трубопровод теплового ввода и по магистральным сетям возвращается в теплоисточник. Температура воды теплоносителя, поступающего от теплоисточника, согласно температурного графика (135/65 со срезкой 115/65), из теплового пункта в систему отопления многоквартирного дома корректируется в ТП автоматически в зависимости от фактической температуры наружного воздуха. Холодная вода, поступающая из водопроводной сети в ТП, нагревается в подогревателе и поступает в циркуляционный контур системы ГВС

многоквартирного дома. То есть в результате демонтажа ЦТП и как следствие теплотрассы горячего водоснабжения, полностью отсутствуют потери при транспортировке тепловой энергии в сети ГВС. [5]

В таблице 2 представлен сравнительный анализ возможных вариантов реконструкции системы теплоснабжения.

Таблица 2. Сравнительный анализ реконструкции системы теплоснабжения

Показатели	Модернизация ЦТП с переходом на независимую схему	Демонтаж ЦТП и строительство ИТП
Суммарный расход электроэнергии	Минимально необходимый (без учета потерь на гидравлическое сопротивление разводящих сетей)	Минимально необходимый (без учета низкого КПД маломощных насосов)
Сверхнормативный расход холодной и горячей воды	Сведен к минимуму	Сведен к минимуму
Расход тепла на отопление	Расчетный в течение всего отопительного периода	Расчетный в течение всего отопительного периода
Срок службы инженерных сетей, год: - отопление; - горячего водоснабжения; - водопровода	45-50 45-50 40	30 Отсутствуют 50
Затраты, тыс. руб.		
Изготовление ИТП	-	900*1200=1080000
Монтаж	-	150*1200=180000
Реконструкция	(1240+175)*120=169800	-
Организация учета энергоресурсов и потребителей	2365*120=283800	144*1200=172800
Перекладка сетей: - отопление; - горячего водоснабжения; - водопровода	9032*120=1083840 4045*120=485400 -	992*1200=1190400 - 203*1200=243600
Установка регулятора давления	120*120=14400	-
Демонтаж ЦТП	-	120*120=14400
Итого	2037240	2905200

Таблица 3. Показатели для оценки эффективности инвестиций в данные мероприятия

	Капитальные вложения, млн. руб.	Экономия, млн. тыс. руб./год	PP, лет	DPP, лет	NPV, тыс. руб.	DPI
Модернизация ЦТП с переходом на независимую схему	2 037,24	365,99	5,56	9	1 303,94	1,64
Демонтаж ЦТП и строительство ИТП	2 905,2	1 160,92	2,5	4	4 227,72	2,46

В таблице 3 также представлен расчет капитальных вложений в реализацию каждого из рассматриваемых вариантов.

4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭКОНОМИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Модернизация ЦТП с переходом на независимую схему позволит сократить потери тепловой энергии на 5%, т.е. до 10,86%. Экономия от реализации этого проекта составит 269,09 тыс. Гкал ежегодно или 365,99 млн руб. ежегодно.

Демонтаж ЦТП и строительство ИТП позволит свести тепловые потери к нулю, что приведет к экономии в размере 1160,92 млн руб. ежегодно.

Результаты расчетов показывают значительную экономию тепловой энергии за счет внедрения ИТП.

В работе проведена оценка экономической эффективности предлагаемых мероприятий с помощью таких показателей, как:

- срок окупаемости,
- дисконтированный срок окупаемости,
- чистый дисконтированный доход,
- индекс доходности инвестированного капитала.

В таблице 3 представлены результаты расчетов. На рисунке 2 изображен график для определения дисконтированного срока окупаемости проектов.

По результатам таблицы 3 можно сделать вывод, что оба мероприятия экономически эффективны, их следует рекомендовать к реализации, но, исходя из расчетных показателей, делаем вывод, что целесообразнее использовать мероприятие по внедрению АИТП.

Автоматизированные ИТП меняют общую картину регулирования системы центрального теплоснабжения. При наличии АИТП у каждого потребителя задача теплоисточника – поддерживать минимально-достаточную температуру теплоносителя на входах АИТП с функцией регулирования. Основные преимущества АИТП — это компактность, широкий диапазон тепловых нагрузок, энергоэффективность, улучшение качества и уменьшение расхода тепловой энергии для «приготовления» горячей воды, снижение давления во внутренних сетях и уменьшение эксплуатационных затрат. Управление работой оборудования АИТП и регулирование режимов отпуска воды потребителю осуществляются автоматически, без постоянного присутствия обслуживающего персонала.

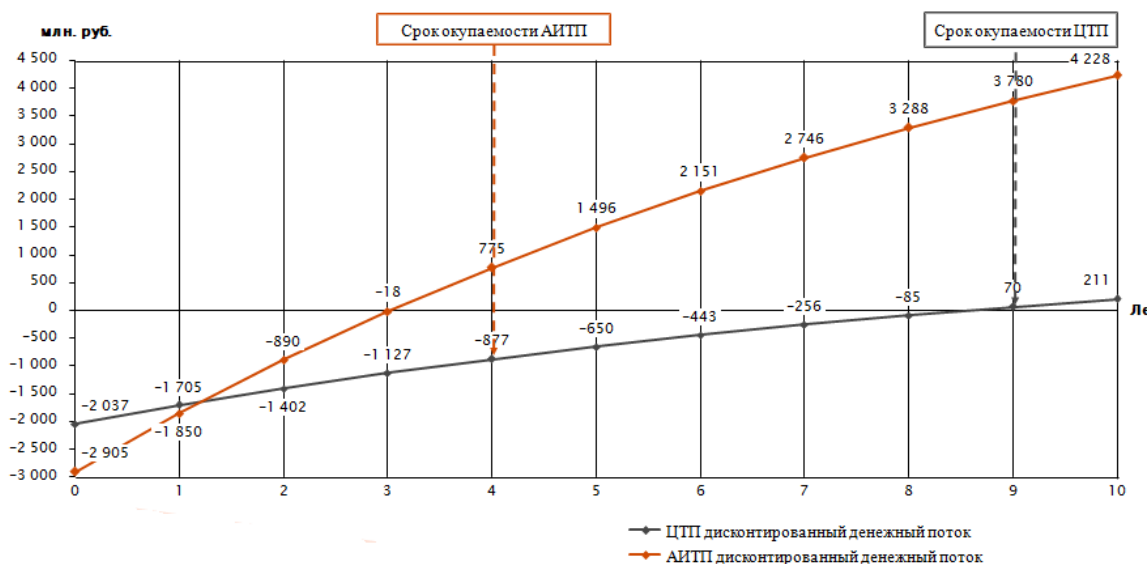


Рис. 2. Дисконтированный срок окупаемости мероприятий.

С применением АИТП отпадает необходимость капитального строительства зданий центральных тепловых пунктов (ЦТП) и ремонта централизованных сетей ГВС. Эффект от перехода приготовления горячей воды с ЦТП на АИТП получают также и конечные потребители горячей воды: как экономический, так и технологический.

Установка автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов обойдется компании немного дороже, чем затраты на реконструкцию ЦТП и замену сетей горячего водоснабжения. Но при внедрении АИТП происходит переход от 4-х трубной на 2-х трубную систему, то есть отсутствует необходимость в эксплуатации и ремонте трубопроводов горячего водоснабжения, исключаются сетевые потери, а также проведение дальнейших ремонтных работ теплоснабжающей организацией АО «Татэнерго».

Таким образом, внедрение данного мероприятия позволит АО «Татэнерго» вернуть доверие потребителей и подтвердить свой высокий профессионализм и заботу о потребителях. Сумев модернизировать систему теплоснабжения, заменив устаревшие как в техническом, так и в моральном плане ЦТП на оборудование, позволяющее более рационально использовать услугу теплоснабжения, АО «Татэнерго» получит возможность снизить платежи, затраты на ремонт линий горячего водоснабжения и повысить надежность всей системы.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснована необходимость разработки инвестиционных программ для повышения надежности теплоснабжения потребителей АО «Татэнерго». Реализация перечисленных мероприятий поможет предприятию повысить надежность работы всей системы теплоснабжения.

В результате перехода с централизованного теплоснабжения на индивидуальное исключаются тепловые потери по сетям горячего водоснабжения, затраты на обслуживание и реконструкцию сетей ГВС. В связи с сокращением трубопроводов горячего водоснабжения снижается количество обслуживающего и ремонтного персонала, таким образом, снижая затраты на заработанную плату работникам. Все это положительно повлияет на прибыль компании и приведет к ее значительному увеличению.

На основании ст. 218 ГК, ст. 36 Жилищного кодекса РФ от 29.12.2004 N188-ФЗ и п. 2 Правил содержания общего имущества в многоквартирном доме, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 13 августа 2006 г. N491. индивидуальный тепловой пункт является общедомовым имуществом и принадлежит собственникам помещений в здании на правах общей долевой собственности. Таким образом, оборудование АИТП переходит на баланс управляющей компании, так же за обслуживание и ремонт будет отвечать теперь она. АО «Татэнерго» за данное оборудование ответственности не несет [6], [7]. Снижение стоимости основных производственных фондов (ОПФ) приведет к увеличению показателя фондоотдачи, что говорит о более эффективном использовании ОПФ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

АИТП — автоматизированный индивидуальный тепловой пункт;
 АО — акционерное общество;
 ГВС — горячее водоснабжение;
 КПД — коэффициент полезного действия;
 ОПФ — основные производственные фонды;
 ОРЭМ — оптовый рынок электроэнергии и мощности;
 ТП — тепловой пункт;
 ЦТП — центральный тепловой пункт;
 РР — простой срок окупаемости;
 DPP — дисконтированный срок окупаемости;
 NPV — чистый дисконтированный доход;
 DPI — индекс доходности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 23.11.2009 №261-ФЗ (ред. От 29.12.2014) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»
2. **АО «Татэнерго»**. Официальный сайт [Электронный ресурс] — режим доступа: <http://www.tatenergo.ru/>
3. **СНиП 2.04.07-86**. Тепловые сети. — М.: Изд — во стандартов, 1986.
4. **СП 41-101-95**. Проектирование тепловых пунктов. М.: Изд-во ГУП ЦПП, 2004
5. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 472 с
6. **Жилищный кодекс** Российской Федерации от 29.12.2004 N188-ФЗ и п. 2
7. **Правила** содержания общего имущества в многоквартирном доме, утвержденные Постановлением Правительства РФ от 13 августа 2006 г. N491.

Е.А. Зинчук, Д.Э. Мусаева

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

АННОТАЦИЯ

В докладе рассмотрен один из современных и эффективных инструментов повышения энергетической эффективности на уровне национальных экономик — управление спросом на электропотребление. В работе рассмотрена разрабатываемая модель эффективного управления спросом для ЕЭС России «Пилотный проект».

1. ВВЕДЕНИЕ

В электроэнергетической системе спрос и предложение должны быть сбалансированы в каждый момент времени. В связи с тем, что потребление электроэнергии постоянно колеблется, энергосистемы строятся таким образом, чтобы справляться с этой переменчивостью и обеспечивать безопасное и бесперебойное энергоснабжение. То есть энергетическим системам присуща гибкость для постоянного поддержания баланса, нарушение которого грозит отклонением частоты и перебоями в энергоснабжении.

Традиционно гибкость в энергосистеме обеспечивается маневренностью тепловых и гидроэлектростанций, их способностью быстро увеличивать и сбрасывать нагрузку. В то же время гибкость может обеспечиваться и с помощью других средств, причём не только на стороне предложения, но и на стороне спроса. Это стало возможным в результате развития новых технологий, предлагающих дешёвые решения для управления нагрузкой на стороне потребителей, согласованного управления большими множествами активных потребителей и просьюмеров, организации экономических трансакций на основе цифровых платформ.

2. УПРАВЛЕНИЕ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Один из таких новых источников гибкости в энергосистемах — управление спросом (Demand response), механизм изменения потребления электроэнергии конечными потребителями относительно их нормального профиля нагрузки в ответ на ценовые сигналы или прямые команды. Такими сигналами могут быть изменение цен на электроэнергию во времени или стимулирующие выплаты, предусмотренные для того, чтобы снизить потребление в периоды

высоких цен на электроэнергию на оптовом рынке, обеспечить динамическое регулирование генерации на базе ВИЭ или в моменты, когда системная надёжность под угрозой.

Управление спросом позволяет снижать цены на электроэнергию на оптовом рынке, что, в свою очередь, приводит к снижению цен и на розничном рынке.

Управление спросом является эффективным инструментом снижения цен на рынке электроэнергии в пиковые часы, когда для покрытия спроса на электроэнергию привлекаются наименее эффективные генерирующие объекты («пиковые» мощности). При этом относительно небольшое снижение потребления может привести к существенному снижению цены на электроэнергию.

С технологической точки зрения управление спросом не является самостоятельной технологией. Управление спросом — это практика, повышающая гибкость энергосистемы за счёт применения множества разных современных технологий, позволяющих потребителю изменять спрос на электроэнергию из сети.

С экономической точки зрения система становится более рациональной, поскольку повышается эффективность использования существующих генерирующих и сетевых мощностей, снижается потребность в инвестициях в новые мощности. При этом системные операторы получают новый инструмент, повышающий гибкость, помогающий уменьшить отклонения частоты и, в итоге, обеспечить более высокую надёжность энергоснабжения и качество электроэнергии.

На сегодняшний день в разных странах и регионах рыночный механизм управления спросом развит неравномерно, но вектор политики един — это повышение роли DR в энергосистемах, что выражается как в эволюции нормативной базы, фактически законодательно предписывающей применение управления спросом в ряде государств, так и в росте объёмов рынка в натуральном и денежном выражении. На рисунке 1 изображен прогноз развития управления спросом в мире [1].



Рис. 1. Прогноз развития управления спросом (DR) в мире до 2025 года.

По прогнозу Navigant Research, к 2025 году мировой рынок вырастет в 3,5 раза – до 144 ГВт. При этом самый значительный рост ожидается в Азиатско-Тихоокеанском регионе, а также в Европе [2].

На сегодняшний день на основании постановления Правительства РФ № 287 от 20.03.2019, внесены изменения в Порядок проведения отбора и оказания системных услуг, Правила оптового рынка электроэнергии и Основы ценообразования. Это постановление позволяет:

1) Изменять ценовые параметры для оптовых потребителей электрической энергии и мощности;

2) Проведение пилотных проектов по вовлечению розничных потребителей в управление спросом с участием агрегаторов (2019 – 2020 г.); На период проведения пилотных проектов объем участия розничных потребителей ограничен на уровне 50 МВт на 2019 год и 0,5% от спроса на мощность в ценовой зоне на 2020 год;

3) Допуск потребителей и накопителей в системные услуги для участия в НПРЧ и АВРЧМ.

Пилотные проекты проведены в 2 этапа: Первый этап с 1 июля 2019 года по 31 декабря 2020 года, на нём реализованы пилотные проекты функционирования агрегаторов нагрузки, которые координируются Системным оператором в качестве единого заказчика услуг агрегаторов как вида услуг по обеспечению системной надежности.

На втором этапе деятельность агрегаторов будет интегрирована в механизмы оптового рынка электроэнергии и мощности.

Постановление правительства включает в себя определенные принципы:

1) Управление спросом организовано в форме оказания организациями-агрегаторами услуг по управлению спросом, в роли заказчика которых выступает Системный оператор. Роль агрегаторов могут играть гарантирующие поставщики, сбытовые компании и независимые компании, имеющие статус потребителей электроэнергии;

2) В управлении спросом участвуют потребители розничного рынка электроэнергии, заключившие с агрегатором нерегулируемые договоры оказания услуг по изменению нагрузки, отдельные от договоров электроснабжения;

3) Предусмотрена возможность агрегирования в один объект управления нескольких потребителей в рамках одной ГТП оптового рынка;

4) Предельная цена на услуги по управлению спросом – прогнозная средневзвешенная нерегулируемая цена мощности;

5) Договоры между СО и агрегаторами заключаются в результате процедуры конкурентного отбора, в рамках которой агрегатор имеет возможность повысить предпочтительность своей заявки путем снижения цены относительно предельной;

6) Оплате подлежит только фактически оказанный объем услуг, подтверждение исполнения обязательств осуществляется на основе данных коммерческого учета с использованием специальных математических методов.

На базировании постановления правительства была создана модель механизма управления спросом, включающая в себя, следующие пункты:

- Системный оператор проводит процедуру отбора агрегаторов, выступает в роли единого покупателя услуг агрегаторов по управлению спросом потребителей и заключает договоры на оказание нового вида услуг по обеспечению системной надежности;

- Источником оплаты услуг по управлению спросом для пилотных проектов служит тариф АО «СО ЕЭС» на оказание услуг по оперативно-диспетчерскому управлению в части обеспечения системной надежности (тариф ОДУ-2), собираемый с покупателей оптового рынка. Для оплаты услуг по управлению спросом устанавливается уровень предельных цен (price-cap), соответствующий цене средневзвешенной нерегулируемой цене на мощность для потребителей на оптовом рынке;

- Агрегаторы, в свою очередь, заключают с потребителями нерегулируемые договоры оказания услуг по изменению потребления;

- Объем разгрузки агрегаторов, заявленный в договоре оказания услуг по управлению спросом, передается АО «СО ЕЭС» в АО «АТС» для учета в рамках действующего механизма ценозависимого снижения потребления на оптовом рынке;

- АО «АТС» учитывает полученные от АО «СО ЕЭС» данные по объему и продолжительности разгрузки при двойном перерасчете РСВ в рамках действующего механизма ЦЗСП;

- В случае, если в роли агрегатора выступает не ГП или энергосбытовая компания, являющиеся субъектами ОРЭ, то объем разгрузки учитывается в ГТП ГП или сбытовой компании, на территории обслуживания которого находится потребитель, оказывающий услуги по управлению спросом;

- В случае, если в соответствии с критериями ЦЗСП ТГ формируется с учетом разгрузки, АО «АТС» передает АО «СО ЕЭС» информацию об учете разгрузки агрегаторов в ТГ АО «СО ЕЭС», в свою очередь, уведомляет агрегатора о возникновении события разгрузки и осуществляет контроль исполнения обязательств по разгрузке в рамках договоров оказания услуг по управлению спросом;

- Источником экономического эффекта служит снижение пиковой цены РСВ при учете объемов разгрузки агрегаторов в двойном перерасчете РСВ.

3. ПИЛОТНЫЕ ПРОЕКТЫ

В пилотном проекте рассматривались 43 участника в отношении 155 объектов агрегированного управления.

Среди компаний-агрегаторов – энергосбытовые компании и гарантирующие поставщики, электросетевые и генерирующие компании, а также независимые агрегаторы. Потребители розничного рынка электроэнергии, чью способность снижать потребление будут представлять агрегаторы, относятся к различным отраслям экономики – машиностроению, пищевой промышленности, нефтедобыче и транспорту, телекоммуникациям, сельскому хозяйству, также в их числе дата-центры и другие разновидности потребителей электроэнергии. Среди них есть государственные и частные компании, включая дочерние предприятия зарубежных компаний, а также бюджетные организации. Объем снижения потребления отдельных энергопринимающих устройств находится в диапазоне от 0,006 до 32 МВт.

Предельный объем услуг по управлению спросом на электрическую энергию на 2020 год составляет 0,5% спроса на мощность в соответствующей ценовой зоне оптового рынка электроэнергии: для I ценовой зоны оптового рынка – 712,55 МВт, для II ценовой зоны оптового рынка – 198,37 МВт. Всего на отбор было подано заявок с плановым объемом снижения потребления 347,49 МВт, отобранный плановый объем снижения потребления составил 281,193 МВт.

Критерием конкурентного отбора являлась минимизация общей стоимости совокупного объема оказания услуг по управлению спросом на электрическую энергию, определяемого по итогам отбора. Минимальная цена заявки от компании-агрегатора в I ценовой зоне составила 50 000 руб./МВт в месяц, максимальная – 835 000 руб./МВт в месяц, по II ценовой зоне – 400 000 руб./МВт в месяц и 650 000 руб./МВт в месяц соответственно. Детализированные итоги конкурентного отбора доступны на сайте АО «СО ЕЭС». Средневзвешенная цена отобранных объемов снижения потребления составила 346 582,44 руб./МВт в мес. по I ценовой зоне ОРЭМ и 520 283,57 руб./МВт в мес. по II ценовой зоне ОРЭМ.

В апреле с отобранными участниками пилотного проекта были заключены договоры оказания услуг по управлению спросом в рамках услуг по обеспечению системной надежности. Следующий отбор будет организован в июне с периодом оказания услуг с июля по сентябрь 2020 года.

По прогнозам экспертов, суммарный экономический эффект для энергетики России от управления спросом может составить 67–105 млрд рублей в год в зависимости от глубины реализации механизмов управления спросом на соответствующих сегментах энергетического рынка [3].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Управление спросом розничных потребителей электроэнергии в перспективе – важный инструмент поддержания и регулирования баланса спроса и предложения на электроэнергетическом рынке. Управление спросом – источник гибкости для энергосистемы, который может использоваться для оперативного регулирования баланса мощности в ней, повышения системной надежности, снижения цен. При этом управление спросом позволяет массовым потребителям зарабатывать на этом рынке, внося свой полезный вклад в улучшение работы всей энергосистемы страны.

Успешная реализация пилотного проекта позволит создать рабочую эффективную модель управления спросом и получать эффект за счет замещения неэффективной генерации ресурсами управления спросом и формирования более низких цен на электроэнергию для розничных потребителей, а в долгосрочной – снижение инфраструктурных платежей за счет учета объемов управления спросом, прежде всего на рынке мощности.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ- возобновляемые источники энергии;
DR- Demand response (управление спросом);
ГВт-гигаватт;
РФ-Российская Федерация;
НПРЧ- нормированное первичное регулирование частоты;
АВРЧМ- автоматическое вторичное регулирование частоты и перетоков активной мощности;
ГТП- группа точек поставки;
СО- системный оператор;
АО- акционерное общество;
ЕЭС- единая энергетическая система;
ОДУ- оперативно-диспетчерское управление;
АТС- администратор торговой системы;
РСВ- рынок на сутки вперед;
ЦЗСП- ценозависимое снижение потребления;
ГП- гарантирующий поставщик;
ОРЭ- оптовый рынок электроэнергии;
АТС- администратор торговой системы;
МВт- мегаватт;
ОРЭМ- оптовый рынок электроэнергии и мощности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление спросом в электроэнергетике России: открывающиеся возможности. Экспертно-аналитический доклад под ред. Ф. Опадчего, Д. Холкина. Инфраструктурный центр Energynet.2019
2. Grid 2030: A national vision for electricity's second 100 years (2003) / Office of Electric Transmission and Distribution. US State Department of Energy. Washington. 44 p.
3. Официальный сайт «Министерство Энергетики»

Д. Кривая, Д.В. Никифорова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОВЛЕЧЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОБАЛАНС ЮЖНОГО РЕГИОНА РОССИИ

АННОТАЦИЯ

Статья содержит исследования о целесообразности использования возобновляемых источников энергии, в частности энергии ветра, для электроснабжения потребителей в Южном регионе России. В работе представлены результаты экономической оценки эффективности строительства ветропарка установленной мощностью 300 МВт, а также сравнение двух вариантов финансирования проекта. Сформулированы выводы и рекомендации по стимулированию и поддержке возобновляемой энергетики в Южном регионе России.

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с повышением уровня жизни спрос на энергию растет, люди нуждаются в большем количестве энергии и изучают множество вариантов её получения. Возобновляемые источники энергии - это единственный вариант преодоления спроса на энергию, и они включает в себя солнечную, ветровую, биомассу, приливную, океаническую и геотермальную энергию [1].

Хотя разработки в направлении использования альтернативных источников велись и ранее, активное развитие альтернативной энергетики в мировом масштабе началось после нефтяного кризиса 1973 года, когда человечество осознало недопустимо высокую степень зависимости от источников органического топлива и цен на них. Несмотря на активное противостояние нефтегазового лобби, в современном мире использование альтернативных источников энергии является перспективным с точки зрения, как экономической, так и энергетической эффективности.

Дополнительным стимулом развития альтернативной энергетики послужили также произошедшие в последние годы политические, экономические и экологические кризисы, которые потенциально влияют на энергетическую безопасность государств и регионов. 29 мая 2020 года в Норильске на ТЭЦ – 3 произошла авария, утечка из резервуара, в котором было около 21 тысячи тонн дизельного топлива. В результате были загрязнены реки Далдыкан и Амбарная, концентрация вредных веществ в воде превышает норму в десятки тысяч раз. Устранение последствий аварии займет несколько месяцев, а экосистема сможет восстановить лишь через несколько лет.

В настоящее время Россия обладает замечательным опытом в области создания и реализации электростанций на основе технологий ВИЭ. Главная дилемма

для развития этой отрасли остается отсутствие реальной государственной поддержки, несмотря на принятые в 2000 году базовые нормативные акты, а также растущая необходимость охраны окружающей среды.

Почему именно ВЭС? ВЭС не потребляют органического топлива и, таким образом, не выбрасывают в атмосферу продукты сгорания топлива и не имеют твердых отходов. Каждый кВт.ч электроэнергии от ВЭС, замещающий электроэнергию от угольной ТЭС, предотвращает вредные выбросы в атмосферу окислов серы, окислов азота, летучей золы и парниковых газов, а также складирование золошлаковых отходов. Установка 500 МВт мощности ВЭС с ежегодной выработкой 1,5 млрд. кВтч электроэнергии позволит сохранить более 500 тыс. т.у.т. в год и предотвратить годовые выбросы в атмосферу порядка:

- 1,5 млн. тонн диоксида углерода;
- 12000 тонн оксидов серы;
- 7800 тонн оксидов азота;
- 12 600 тонн летучей золы,

а также складирование золошлаковых отходов в объеме 200 000 тонн.

Ветряные генераторы в процессе эксплуатации практически не потребляют ископаемого топлива. Работа ветрогенератора мощностью 1 МВт за 20 лет позволяет сэкономить примерно 29 тыс. тонн угля или 92 тыс. баррелей нефти.

НОРМАТИВНЫЕ АКТЫ И ЗАКОНОДАТЕЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА

Постепенно, с развитием ВИЭ, совершенствовалась и законодательная база, которая нацелена на стимулирование использования возобновляемых источников энергии.

Изучив и проанализировав большое количество материалов и источников, структурированы по годам законы о ВИЭ принятые на территории Российской Федерации с 1992 года по 2019 год (таблица 1).

Одним из основных результатов законодательной поддержки является налаживание производства отечественного оборудования для станций на основе ВИЭ в промышленных масштабах, в том числе на экспорт. Это приводит к постепенному снижению стоимости 1 кВт установленной мощности, что значительно влияет на снижение себестоимости вырабатываемой электрической энергии.

Таблица 1. Законы, принятые Правительством РФ на основе использования ВИЭ

Год	Закон
1992	Принцип адекватного удовлетворения потребностей нынешних и будущих поколений в области развития и окружающей среды.
1995	Законодательный акт на уровне Президента и Правительства РФ, который предусматривал меры по энергосбережению в России.
1996	“Об энергосбережении”
1998	ФЗ “О государственной политике в сфере использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии”.
2003	Правительство РФ утвердило Энергетическую стратегию на период до 2020г.
2009	Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности эл/эн на основе использования ВИЭ.
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 геной 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 пи строительстве ветроэлектростанции.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕГИОНА

Почему именно Краснодарский край для реализации проекта по строительству ВЭС: Краснодарский край обладает хорошими природными и климатическими особенностями, а именно огромными ветровыми ресурсами. По своему географическому положению Краснодарский край находится в ветровом поясе южного полушария и на значительной территории наблюдаются достаточно сильные воздушные течения [3]. Почти на 50 % процентах территории среднегодовая скорость ветра достигает 4-5 м/с метров, можно рассмотреть на рисунке 1, что, учитывая размеры страны, т.е. более 75,5 кв. км, предопределяет наличие огромного ветроэнергетического потенциала. В ряде районов

Краснодарского края среднегодовая скорость ветра достигает 6 м/с и выше, что делает эти районы перспективными для использования ветроэнергетики.

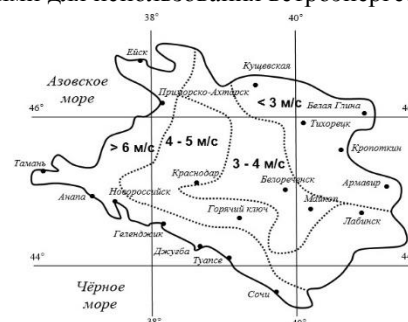


Рис. 1. Среднегодовая скорость ветра на территории Краснодарского края.

Стоимость электроэнергии у конечного потребителя от ВЭС, расположенной в таких местах, может составить 11-13 рублей за кВт*ч, как показано на рисунке 2, с учетом инвестиционной составляющей. В

этой связи, Краснодарский край, а именно г. Ейск рассматривается как одна из наиболее подходящих территорий РФ для использования ветроэнергетики. Также, Краснодарский край энергетически зависим, он получает около 36% электроэнергии из собственных источников, когда другие регионы около 60%.

В последние годы, наблюдается, значительный рост инвестиционных проектов по реализации ВЭС, стоит отметить большой вклад в развитие дорожных, транспортных сетей, через которые легко и не так дорого можно обеспечить транспортировку оборудования с места на место [4]. Поэтому в рамках продвижения плана “Развитие ВИЭ на период до 2024 года” и федерального проекта “Модернизация электроэнергетики России до 2024 года” вместе с организациями ООО “ВЕТРОЕН-ЮГ” и “ВЭС-ЮГ”, Министерство промышленности и энергетики готовы к реализации инвестиционного проекта по установке и использованию ветряной электростанции с суммарной мощностью 300 МВт, в городе Ейск, Краснодарского края.

ИНВЕСТИЦИОННЫЙ ПРОЕКТ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЭС

Инвестиции на проектирование, оборудование и строительно-монтажные работы составляют 30687,26 млн. руб., что в пересчете на 1 кВт установленной мощности – 102290,9 руб/кВт (1461 \$/кВт).

Ежегодные затраты на амортизацию, содержание и ремонт, заработную плату и отчисления в социальные фонды и прочие составляют 1909,12 млн. руб.

Ежегодная выработка 919,8 млн. кВтч, с учетом КИУМ для данного проекта. Затраты электроэнергии на собственные нужды станции 10%.

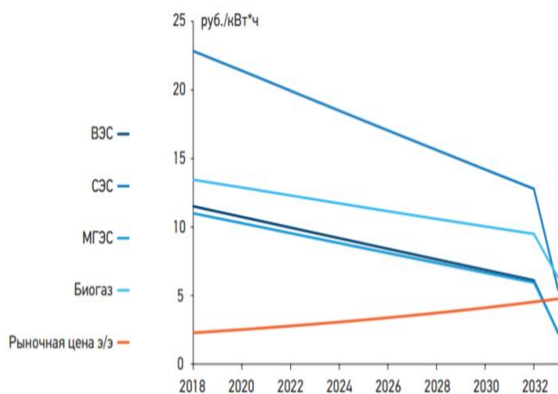


Рис. 2. Изменение тарифа.

На рисунке 2 представлено изменение тарифа ВЭС, по экономическим прогнозам, организации Выгон Консалтинг.

Компания, не сможет на 100% профинансировать строительство ветряной электростанции, представлены 2 варианта реализации проекта:

1. Компания вкладывает 25% собственных средств и 75% берет в кредит под 10% годовых;
2. Компания получает государственную поддержку в размере 33,3%, собственные вложения 33,3% и кредит в размере 33,3% под 10% годовых.

Ставка дисконтирования, считается, как безрисковая ставка и премия за риск, отсюда получается ставка равная 12,15% (9,916% и 2,23%).

Безрисковая норма доходности - это теоретическая норма доходности инвестиций с нулевым риском. Безрисковая ставка представляет интерес, который инвестор ожидал бы получить от абсолютно безрисковых инвестиций в течение определенного периода времени. На 2019 год она составляет 9,916% [5].

Премия за риск - это доход, превышающий безрисковую норму прибыли, которую, как ожидается, принесут инвестиции. На 2019 год – 2,23% [6].

В таблице 2 представлены результаты расчетов экономической оценки инвестиционных вложений для двух вариантов финансирования. Чистый дисконтированный доход в обоих вариантах больше 0, внутренняя норма доходности больше нормы дисконта, дисконтированный срок окупаемости проекта меньше, чем расчетный период проекта.

Таблица 2. Расчетные значения критериев эффективности проекта

Показатель	Знач-е показателя 1й вариант	Знач-е показателя 2й вариант
NPV млн. руб.	13143,84	26706,92
IRR, %	17	22
PP, лет	12,5	7

На рисунках 3 и 4 представлена зависимость ЧДД от тарифа, откуда видно, что потенциал для снижения отпускных тарифов имеет место.

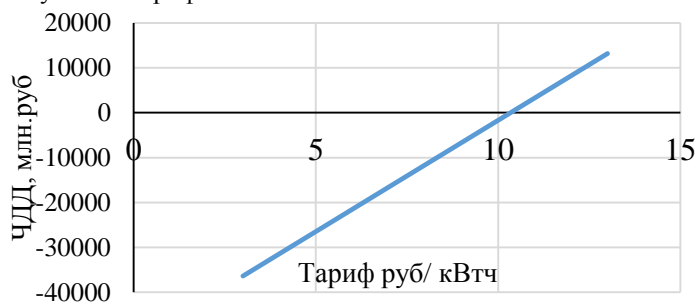


Рис. 3. Проект с вариантом финансирования 1.

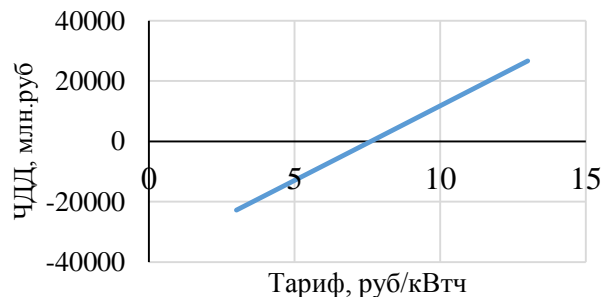


Рис. 4. Проект с вариантом финансирования 2.

Сопоставив результаты двух вариантов финансирования, можно сказать, что оба случая реализации проекта возможны и целесообразны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для того чтобы занять ведущую позицию на рынке возобновляемой энергетики, необходимо придерживаться ряда мер:

- ❖ Для поддержания развития возобновляемой энергетики, необходимо создать правила и организовать законы;
- ❖ Вести активные международные отношения, для поддержания и обмена информацией;
- ❖ Следует вкладывать денежные средства в разработку оборудования и научную работу, а также исследования;
- ❖ Принять ряд мер, которые предпримут постоянную государственную поддержку, в качестве субсидий;
- ❖ Для того чтобы регионы могли закупать оборудование для дальнейшего развития ВИЭ в своей местности, необходимо внедрить систему льготного кредитования;
- ❖ Так как, осуществляются большие выбросы CO₂ в атмосферу, следует ввести налог, а также, ввести систему налога для потребителей и производителей;
- ❖ В обязательном порядке, для всех организаций, необходимо ввести учебную программу, для повышения квалификации сотрудников.
- ❖ Так как, основными факторами развития ВИЭ, являются климат и географические особенности, то необходимо создать научные центры, которые будут изучать территории благоприятные для реализации ВИЭ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
ВЭС – ветровая электростанция;
ТЭС – тепловая электростанция;
КИУМ – коэффициент использования установленной мощности;
NPV (ЧДД) – чистый дисконтированный доход;
IRR – внутренняя норма доходности;
PP – дисконтированный срок окупаемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Renewable energy and environment – a future perspective** [Электронный ресурс] / Киберленинка. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/renewable-energy-and-environment-a-future-perspective> (дата обращения 20.10.2019).
2. **Документы и события** [Электронный ресурс] / Правительство РФ – Режим доступа: <http://government.ru/rugovclassifier/565/events/> (Дата обращения 15.12.2019).
3. **Лятхер В. М.** Оптимальное использование энергии приливов // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2006. – Т. 411. – №. 4. – С. 476-479. (Дата обращения 06.11.2019).
4. **Григораш О.В.** Современное состояние производства электроэнергии возобновляемыми источниками в мире и России / О.В Григораш, Ю. П. Степура, А. С. Пономаренко, Ю. В. Кондратенко // Труды КуюГ АУ. – Краснодар. 2012. № 6. С. 159 – 163.
5. **Ключевая ставка банка России** [Электронный ресурс] / Банк России – Режим доступа https://www.cbr.ru/hd_base/KeyRate/ (Дата обращения 27.04.2020).
6. **Расчет размера ERP** (Equityriskpremium) для российского рынка [Электронный ресурс] / SwissAppraisal – Режим доступа: https://swissapp.ru/upload/iblock/a0f/Swiss_Appraisal_Analitics_ERP_Russia_4Q2018.pdf (Дата обращения 27.04.2020).

Е.Е. Крыленко

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

АННОТАЦИЯ

В работе представлена разработка основных положений технической политики, направленной на повышение эффективности использования основных производственных фондов предприятий электрогенерирующего комплекса. Техническую политику, как один из основных стратегических документов предприятия, можно рассматривать как инструмент повышения энергетической эффективности.

1. ВВЕДЕНИЕ

Энергосбережение и повышение энергетической эффективности являются одним из основных источников будущего экономического роста, затрагивая при этом все отрасли экономики и социальную сферу, всех производителей и потребителей энергетических ресурсов. Для отрасли топливно-энергетического комплекса развитие энергосбережения и повышение энергетической эффективности являются стратегической задачей, решение которой возможно в том числе и за счет:

- введения запрета на использование энергетически неэффективной техники и оборудования;
- стимулирования использования наилучших доступных технологий (НДТ);
- обновления существующих и внедрения новых систем энергоменеджмента;

- приобретения нового энергоэффективного оборудования;
- обмена опытом и распространения лучших практик энергосбережения и повышения энергетической эффективности в отраслях топливно-энергетического комплекса [1].

Данный перечень мероприятий должен найти отражение в технической политике энергетических предприятий, как основном стратегическом документе.

2. ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФОНДОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Энергетическая отрасль традиционно считается фондоёмкой. Связано это с тем, что основные производственные фонды (ОПФ) энергетических предприятий могут насчитывать до нескольких десятков тысяч единиц оборудования.

ОПФ для энергетической отрасли имеют следующую структуру, представленную на рис 1. В энергетике значительную долю активной части основных производственных фондов (около 33%) составляет силовое оборудование: котлы, турбины, парогенераторы, электрогенераторы, силовые трансформаторы. Значительную долю в пассивной части основных производственных фондов (около 33%) занимают передаточные устройства: электросети, теплосети, трубо- и газопроводы.



Рис. 1. Структура основных производственных фондов в энергетике.

Структура ОПФ в энергетике зависит от следующих факторов.

1. Мощность энергообъекта. На мощных электростанциях доля силового оборудования, рабочих машин, измерительных и регулирующих устройств больше, чем для станций средней мощности.

2. Вид топлива на ТЭС. На угольных ТЭС по сравнению с газомазутными больше доля сооружений из-за стоимости системы топливоприготовления, разгрузочных устройств, эстакад, складов топлива, конвейеров, бункеров сырого угля и угольной пыли.

3. Климатические и сейсмические условия в районе размещения объекта. Чем теплее климат и ниже сейсмичность, тем меньше доля зданий и сооружений в структуре ОПФ.

4. Для генерирующих компаний структура ОПФ зависит от типа электростанций, входящих в их состав. Так для тепловых и атомных электростанций наблюдается преобладание активной части ОПФ (порядка 55-60%), на гидроэлектростанциях преобладают пассивные ОПФ (около 80%);

5. Для электросетевых компаний в структуре ОПФ будет преобладать доля передаточных устройств.

Несмотря на активную политику Министерства энергетики РФ по обновлению активной части ОПФ на энергетических предприятиях, на конец 2019 г. состояние 20% оборудования на энергообъектах оценивается как удовлетворительное, что требует усиленного контроля технического состояния, капитального ремонта, реконструкции или технического перевооружения [2].

Помимо физического износа рабочие машины, силовое оборудование и другие виды основных средств перестают соответствовать по своим технико-экономическим показателям запросам современного рынка, то есть подвергаются моральному износу.

Изношенное состояние основных производственных фондов электрогенерирующего комплекса РФ, не отвечающее современным технико-экономическим требованиям, является фактором снижения общей эффективности производства электроэнергии.

Внедрение нового более совершенного оборудования на предприятиях электрогенерирующего комплекса сможет обеспечить повышение энергоэффективности и существенное снижение издержек производства электроэнергии при одновременном значительном увеличении его мощности. В этом случае целесообразность использования нового, более технически совершенного оборудования очевидна.

3. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ ЭНЕРГОКОМПАНИИ

Одним из основных инструментов на уровне государства, направленных на обеспечение

устойчивого развития страны, является промышленная политика. Являясь частью общей экономической политики, промышленная политика является ключевым инструментом обеспечения экономической безопасности России и ее технологического суверенитета.

Согласно ФЗ №488 промышленная политика определяется как комплекс правовых, экономических, организационных и иных мер, направленных на развитие промышленного потенциала РФ, обеспечение производства конкурентоспособной промышленной продукции

На микроуровне промышленная политика напрямую влияет на реализацию технических политик компаний, задачей которых является поддержание в рабочем состоянии и своевременное обновление основных производственных фондов.

Техническая политика предприятия — это часть стратегии развития в области повышения качества и конкурентоспособности продукции, ресурсо- и энергосбережения, технического развития производства.

В соответствии с требованиями и рекомендациями современных систем менеджмента был разработан перечень положений технической политики предприятия:

1. цель технической политики;
2. процедуры ориентации на потребителя;
3. процедуры отбора поставщиков оборудования;
4. процедуры выбора оборудования;
5. подходы к реализации принципа «постоянное улучшение»;
 - 5.1 политика/процедуры внедрения новых знаний;
 - 5.2 критерии определения источников новых знаний;
 - 5.3 критерии патентования инноваций/ноу-хау;
 - 5.4 ориентация на патентный поиск;
 - 5.5 ориентация на наилучшие доступные технологии (НДТ);
6. система показателей эффективности технической политики [4].

Был проведен анализ публичной информации крупнейших энергокомпаний: АО «Концерн Росэнергоатом», ПАО «Интер РАО», ПАО «РусГидро», ООО «Газпром энергохолдинг», ПАО «Мосэнерго», ПАО «Т Плюс», ПАО «Юнипро», ПАО «Энел Россия», ПАО «Фортум», ПАО «Квадра». Результаты анализа показали, что техническая политика опубликована лишь у 50% компаний.

В табл. 1 показан пример анализа структуры и содержания технических политик трех энергокомпаний. По результатам анализа можно говорить о разном уровне проработки технической политики в зависимости от организации. В качестве эталона можно рассматривать техническую политику ООО «Газпром энергохолдинг», однозначно определяющую источники, инструменты и механизмы, критерии применения новых знаний, новых технологий, нового оборудования в контексте развития компании.

Таблица 1. Анализ состава технических политик энергокомпаний [4]

Положение технической политики	ПАО «Интер РАО»	ООО «Газпром энергохолдинг»	ПАО «Фортум»
цели технической политики	Есть	Есть	Есть
процедуры ориентации на потребителя	Нет	Есть	Есть
описание процедур отбора поставщиков	Нет	Есть	Есть
описание процедур выбора оборудования	Нет	Есть	Есть
реализация принципа «постоянное улучшение»	Есть	Есть	Есть
описание политики /процедур внедрения новых технологий	Есть	Есть	Есть
описание источников новых технологий	Есть	Есть	Нет
раздел патентования технологий/ноу-хау	Нет	Есть	Нет
ориентация на патентный поиск	Есть	Есть	Есть
ориентация на наилучшие доступные технологии (НДТ)	Есть	Есть	Есть
системы показателей эффективности технической политики	Есть	Есть	Есть

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы, касающиеся повышения эффективности использования ОПФ предприятий электрогенерирующего комплекса, занимают ключевое место в энергетике Российской Федерации. Изношенное состояние основных производственных фондов является фактором снижения общей эффективности производства электроэнергии.

Для повышения энергетической эффективности на предприятиях электрогенерирующего комплекса должны быть разработаны инструменты и механизмы обновления ОПФ, описанные в таком основополагающем документе, как техническая политика предприятия. В данной работе предложена структура технической политики, соответствующая современным системам менеджмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Энергетическая** стратегия России на период до 2035 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 09 июня 2020 г. N 1523-р)
2. **Официальный сайт** Министерства энергетики РФ. Показатели технического состояния объектов электроэнергетики (физический износ) за 2019 год. – [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/17860> (дата обращения 12.06.2020).
3. **Федеральный закон** от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации».
4. **Гудкова Е.Е.** Техническая политика как основа для оценки устойчивого развития электроэнергетического комплекса // Микроэкономика. 2019. №2. С. 66-71.

В.Р. Леус, Д.А. Смирнова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ SMART GRID В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ ФИЛИАЛОВ ПАО «МРСК ЮГА» – РОСТОВЭНЕРГО»

АННОТАЦИЯ

В статье приведены основные результаты изучения эффективности внедрения системы Smart Grid в распределительном электросетевом комплексе филиалов ПАО «МРСК Юга» – Ростовэнерго». Реклоузеры позволяют уменьшить время определения поврежденного участка фидера и его локализацию. Они позволяют локализовать поврежденные участки, сохраняя при этом питание остальных потребителей питающего фидера и подавая питание на неповрежденный участок от резервного источника питания, тем самым повышая надежность электроснабжения потребителей. Выполненные расчеты подтверждают экономическую эффективность комплексной автоматизации.

1. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным способом повышения надежности электроснабжения потребителей в воздушных распределительных сетях 6 – 20 кВ в настоящее время является комплексное использование интеллектуальной коммутационной аппаратуры, объединенной в одном устройстве наружного применения с интегрированной системой измерения токов и напряжений, и микропроцессорного шкафа управления с инновационными функциями защит и автоматики.

Функциональным назначением реклоузеров является разработка алгоритмов распределенной автоматизации аварийных режимов работы распределительных сетей (одна из базовых технологий Smart Grid) с целью наиболее эффективного и экономичного способа повышения показателей надежности электроснабжения потребителей (SAIFI и SAIDI) в воздушных электрических сетях.

Реклоузеры являются очень эффективным решением с целью расширения существующих РУ 10 кВ, а также для организации пунктов местного резервирования на подстанциях и в распределительных пунктах. В сочетании с комплектом коммерческого учета позволяют подключать новых абонентов к сети, обеспечивать

учет электрической энергии, оптимальным образом разграничивать балансовую принадлежность, предупреждать хищение электроэнергии и, таким образом, снижать потери.

В целях создания в распределительном электросетевом комплексе Филиалов ПАО «МРСК Юга» пилотного проекта автоматизации их участков за счет внедрения системы Smart Grid рассмотрено 8 схем, состоящих из 16 ВЛ 10 кВ, способных отразить эффект работы системы.

Объект установки системы Smart Grid определялся из следующих основных критериев: не менее двух кольцуемых ВЛ 6-10 кВ с разными источниками питания; максимальная протяженность; большое количество отключений с повреждением элементов ВЛ; загрузка ВЛ (предпочтительно не менее 2 МВт/50 км); удаленность от базы и затрудненность подъезда; социальная значимость и плотность нагрузки.

По всем параметрам наиболее подходящей линией для установки реклоузеров является ВЛ-10 кВ №3 ПС «Чалтырь» и №7 ПС «Синявская».

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ РЕКЛОУЗЕРОВ

2.1 Выбор схемы сети для внедрения системы Smart Grid

В данной работе решается вопрос увеличения надежности энергоснабжения потребителей фидеров №3 ПС «Чалтырь» и №7 ПС «Синявская» при помощи установки реклоузеров серии РВА/TEL в магистраль.

Для этого рассмотрен вариант расположения коммутационных аппаратов – по 1 реклоузеру на линиях №3 ПС «Чалтырь» и №7 ПС «Синявская», а также предусмотрен реклоузер с функцией автоматического ввода резерва (АВР). Для каждой линии сделан расчет показателей технического и экономического эффектов от внедрения системы.

Работы по локализации, поиску и выделению места повреждения на линии производятся вручную методом последовательных переключений, при которых количество отключений фидеров и время восстановления обуславливают значительные издержки и потенциальные ущербы сетевой компании.

Для повышения надежности электроснабжения потребителей, снижения текущих затрат и ущербов сетевой компании предлагается реализовать децентрализованную систему управления аварийными режимами работы на базе реклоузеров РВА/TEL.

При повреждении на любом из участков схемы отключаются ближайшие к месту повреждения реклоузеры, таким образом, выделяя поврежденный участок и восстанавливая электроснабжение на неповрежденных участках.

2.2 Расчет технического эффекта

Для последующего проведения расчетов было произведено разделение потребителей по 4 участкам, для которых впоследствии рассчитаны показатели надежности электроснабжения.

Показатели надежности электроснабжения позволяют количественно оценить эффект от применения реклоузеров для автоматизации участка распределительной сети.

Суммарный годовой недоотпуск электрической энергии количественно характеризует электрическую энергию, недопоставленную потребителям во время перерывов электроснабжения.

Суммарный годовой недоотпуск электрической энергии считается интегральным показателем надежности электроснабжения всего фидера, потому как фактически характеризует сумму продолжительностей отключений всех потребителей фидера. Таким образом, сравнение недоотпуска электрической энергии исходного варианта и варианта после реконструкции позволяет количественно оценить эффективность принятых технических решений.

Применение реклоузеров позволяет повышать показатели надежности электроснабжения группы потребителей, отдельного потребителя или же фидера в целом.

Эффективность применения реклоузеров и, соответственно, улучшение показателей надежности будут зависеть от правильности выбора мест установки.

Для того, чтобы учесть влияние реклоузеров в схеме электроснабжения, в формулы добавляются поправочные коэффициенты:

$k_{н.у}$ – коэффициент, который учитывает наличие многократных АПВ на устранение неустойчивых повреждений в сети;

$k_{в.в}$ – коэффициент, который учитывает влияние сокращения зоны поиска поврежденного участка путем секционирования на общее время восстановления электроснабжения [1].

Поясним влияние многократных АПВ в реклоузе-

рах на вероятность устранения неустойчивых повреждений.

Примерно 80% повреждений в воздушных распределительных сетях по своей природе являются неустойчивыми. Это схлестывание проводов при порывах ветра, касание проводов инородными предметами и прочее. По статистике – успешность первого цикла АПВ сокращает общее количество отключений на 60%, успешность второго цикла дополнительно увеличивает вероятность устранения повреждения на 20%, третьего цикла – еще 5%.

Таким образом, если в сети в составе защиты фидерного выключателя было установлено однократное АПВ либо АПВ отсутствовало, то применение реклоузеров с 3-х кратным АПВ в данной сети позволяет повысить вероятность устранения неустойчивых повреждений от 25% (однократное АПВ) до 85% (без АПВ).

Рекомендуемые значения коэффициента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента в зависимости от количества циклов АПВ

На ВГ На реклоузере	Без АПВ	1-ое АПВ
1-ое АПВ	0,6	0
2-ое АПВ	0,8	0,2
3-ое АПВ	0,85	0,25

Поясним влияние секционирования линии на снижение времени восстановления электроснабжения.

Примерно 60% времени восстановления электроснабжения тратится на поиск, выделение поврежденного участка и восстановление электроснабжения потребителей, подключенных к неповрежденным участкам сети, а 40% на поиск места повреждения, проведение ремонтных работ и восстановления исходной схемы.

Применение реклоузеров позволяет практически автоматизировать первый этап, таким образом сократить общее время восстановления электроснабжения в пределе на 60%.

Дать более точную оценку, насколько сократится время восстановления электроснабжения сложно, так как оно зависит, например, от наличия или отсутствия дорог, схем объезда линии персоналом ОВБ при возникновении повреждения и прочих факторов.

При проведении расчетов принимается укрупненное значение коэффициента – 0,6.

Результаты расчета технических показателей приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение показателей надежности электроснабжения участков в зависимости от варианта реконструкции сети

Вариант схемы	Параметр	1	2	3	4
Исходная схема	оп, откл./год	15,9	8,12	8,12	8,12
	T, ч/год	127,2	64,9	64,9	64,9
	W _{НО} , кВт·ч/год	154 598			
Схема после реконструкции	оп, откл./год	8,892	5,05	2,29	2,29
	T, ч/год	2,0124	0,67905	6,49035	0,99594
	W _{НО} , кВт·ч/год	31 266			

3. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЕКТА

3.1 Расчет экономического эффекта

Для оценки ущербов потребителей от перерывов электроснабжения использована методика, приведенная в РД 34.20.582-90 [2]. В качестве исходных данных по ущербам приняты нормативы удельных предельных затрат на повышение надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей,

Таблица 3. Результаты расчета экономических показателей

Параметр	Исходная схема	Схема после реконструкции
Ущерб потребителя общий, руб./год	2 471 986	499 939
Ущерб сетевой компании, руб./год	454 519	91 923
Пробег автотранспорта, км	11 531	432
Общее время восстановления, ч	192	72
Затраты на амортизацию автотранспорта, руб./год	54 192	2 032
Затраты на горюче-смазочные материалы, руб./год	72 643	2 724
Затраты на фонд заработной платы, руб./год	57 653	21 620
Итого затрат, руб./год:	3 110 993	618 237
Срок окупаемости инвестиций с учетом ущерба потребителей, лет:		1,02
Итого затрат, руб./год: (без учёта потерь потребителей)	639 007	118 299
Срок окупаемости инвестиций, лет:		4,90

3.2 Расчет экономической эффективности

Эффективность инвестиций, направляемых на комплексную автоматизацию ВЛ-10 кВ путем внедрения «умных» сетей (Smart Grid) в Чалтырском РЭС ПО «Юго-Западные электрические сети» филиала ПАО «МРСК Юга»-«Ростовэнерго, должна обеспечиваться путем сохранения работоспособности системы и повышения надежности эксплуатации, сохранения (или же увеличения) отпускаемой электроэнергии после проведения комплексной автоматизации.

Оценка эффективности инвестиций выполнена в соответствии с методикой, разработанной на основе «Методических рекомендаций по оценке эффектив-

указанные в ценах 1991 года.

В качестве коэффициентов пересчета в текущие цены приняты изменения индексной стоимости работ и затрат, которые публикуются министерством регионального развития ежеквартально.

Коэффициент пересчета в цены 2019 года для сельского хозяйства составляет – 106,72.

Результаты расчета экономических показателей приведены в таблице 3.

ности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике» [3].

Увеличение отпуска электроэнергии потребителям на следующий год после комплексной автоматизации (в 2020 г.) при числе часов использования максимальной нагрузки 5750 часов составит 23,29 млн кВт·ч.

Расчет критериев экономической эффективности строительства энергообъектов выполнен на период 16 лет. Годом приведения является год начала эксплуатации.

Результаты расчетов по оценке эффективности инвестиций, направляемых на комплексную автоматизацию ВЛ-10 кВ путем внедрения «умных» сетей (Smart Grid), приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчета экономической эффективности «Комплексная автоматизация ВЛ-10кВ путем внедрения умных сетей (Smart Grid)

Параметр	Значение
Всего затраты по проекту, млн руб.	-79,784
Выручка от реализации электроэнергии, млн руб.	437,625
Результирующий эффект, млн руб.	357,841
Простой срок окупаемости (Т), лет	2,63
Норма дисконта $E = 0,12$, год приведения $T_{прив} = 1$	
Дисконтированные затраты, млн руб.	-49,424
Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн руб.	130,563
Внутренняя норма доходности (ВНД), %	67,813
Индекс доходности (ИД), о.е.	4,71

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная составляющая экономического эффекта от внедрения реклоузеров – снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям.

Выполненные расчеты показывают, что при применении реклоузеров ущерб от недоотпуска снижается в несколько раз. При этом срок окупаемости затрат (в зависимости от удельной стоимости ущерба от недоотпуска 1 кВт·ч) равен 4,9 года.

Время восстановления электроснабжения потребителей уменьшится за счет возможности определения места повреждения по факту отключения реклоузера и локализации поврежденного участка. Помимо всего, снижаются затраты на профилактическое обслуживание реклоузеров, расследование аварий, связанных с неправильными действиями РЗА, ремонт поврежденного оборудования, сбор и обработку информации о режимах и событиях, поиск места повреждения на линиях электропередачи и установку дополнительных средств защиты. К тому же применение реклоузеров повышает безопасность обслуживающего персонала. SCADA-система для реализации комплексного управления позволяет диспетчеру вручную управлять сетью, возвращая ее в исходное состояние после аварии.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ПАО — публичное акционерное общество;
МРСК — Межрегиональная распределительная сетевая компания;

РУ — распределительное устройство;
ВЛ — воздушная линия;
ПС — подстанция;
АПВ — автоматическое повторное включение;
АВР — автоматический ввод резерва;
ОВБ — оперативно-выездная бригада;
РД — рекомендации;
РЭС — районная электрическая сеть;
ПО — производственное отделение;
РЗА — релейная защита и автоматика;
 $k_{н.у}$ — коэффициент, который учитывает наличие многократных АПВ на устранение неустойчивых повреждений в сети, о.е.;
 $k_{в.в}$ — коэффициент, который учитывает влияние сокращения зоны поиска поврежденного участка путем секционирования на общее время восстановления электроснабжения, о.е.;
 $\omega_{п}$ — количество отключений потребителя или группы потребителей, откл/год;
 T — среднее время восстановления одного устойчивого повреждения, ч;
 $\Delta W_{но}$ - годовой недоотпуск электроэнергии, кВт·ч/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **СТО 34.01-2.2-032-2017** / Утвержден распоряжением ПАО «Россети» от 14.11.2017 №617р.
2. **РД 34.20.582-90**. Рекомендации по применению скидок (надбавок) к тарифу за электрическую энергию за надежность электроснабжения сельскохозяйственных потребителей и установления штрафов за внезапные отключения сельскохозяйственных потребителей».
3. **Методические** рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами) /Утверждены приказом ОАО "РАО ЕЭС России" от 31.03.2008 г. № 155.

А.А. Павленок, Е.В. Каленская, Д.А. Фрей

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НВИЭ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

АННОТАЦИЯ

В статье рассматриваются практические вопросы оценки эффективности использования тепловых насосов для отопления объектов индивидуального жилищного строительства, дается сравнительная экономическая оценка различных вариантов технических решений.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ

Индивидуальное жилищное строительство (ИЖС) имеет большой потенциал, например, в Московской области в 2019 году построили свыше 24 тыс. домов площадью более 4 млн. кв. м¹.

Согласно данным Росстата (рис.1), доля ИЖС составляет в последнем отчетном году 45,9% от введенных объемов жилищного строительства². В 2020 году в РФ планируется к принятию федеральная программа поддержки ИЖС. К 2024 году годовой объем ввода планируется увеличить до 40 млн. кв. м./год.

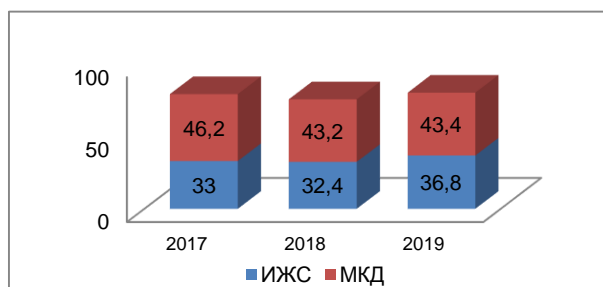


Рис.1 Динамика объема ввода жилья застройщиками и населением по РФ, млн. м²

Для строительства инженерной инфраструктуры предлагается привлекать ресурсоснабжающие организации в рамках инвестиционных программ. В случае необходимости могут привлекаться средства региональных бюджетов и федеральные субсидии, планируется к реализации большинство механизмов, уже применяемых для многоквартирного строительства³.

Увеличение индивидуального жилищного строительства влечет за собой необходимость решения

технических и технологических вопросов обеспечения энергоснабжения такого жилья. С одной стороны, это и более высокие требования по качеству жизни, с другой – значительные территории застройки, что ведет к увеличению протяженности сетей или, в некоторых случаях, к замене технологии энергоснабжения. Это могут быть различные решения, начиная от использования электричества, pellets или газа для отопления и до нетрадиционных возобновляемых источников энергии – тепловых насосов для отопления зданий или ветрогенераторов для электроснабжения. Выбор той или иной технологии зависит как от ее технических характеристик, доступности оборудования и информированности населения о ней, так и от условий, в которых осуществляется строительство домов.

Существенными факторами выбора технологии и непосредственного технического решения является регулирование в области энергосбережения и экономическое стимулирование. Так, например, в Германии одним из нормативов является энергопотребление на квадратный метр здания, а при строительстве индивидуального дома с энергопотреблением менее норматива выдается кредит на строительство с пониженной ставкой процента по кредиту на срок более 10 лет.

Объекты индивидуального жилищного строительства, использующие для отопления электроэнергию, рассматриваются как перспективный сегмент потребителей для энергосбытовых компаний, особенно в перспективе принятия федеральной программы поддержки ИЖС и активной работы по отмене перекрестного субсидирования в электроэнергетике.

В свою очередь, возможность экономичного использования электроэнергии для отопления объектов ИЖС с использованием нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) может стать дополнительным стимулом к реализации национального проекта «Жилье и городская среда», поскольку не требуют дополнительных инвестиций в газификацию и строительство протяженных тепловых сетей.

¹Официальный портал правительства Московской области <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/organy/ministerstvo-zhilishnoi-politiki-moskovskoi-oblasti/>

²<https://erzrf.ru/news/rosstat-vvod-zhilya-v-2019-godu-privysil-80-mln-kv-m-spasibo-izhs>

³Официальный портал Министерства строительства и ЖКХ РФ <https://minstroyrf.gov.ru/press/>

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТЕ

Индивидуальные жилые дома должны соответствовать строительным правилам СП 55.13330.2016, в том числе требованиям к системе теплоснабжения по СП 50.13330.2012 (тепловая защита зданий). На основе данных о значениях среднесуточной температуры наружного воздуха и длительности ее стояния⁴ в разрезе года определяется потребность в тепловой энергии для здания при условии поддержания температуры +20°C внутри жилых помещений. Согласно строительным правилам, ограждающие конструкции здания при величине градусо-суток отопительного периода (ГСОП) $4000 \div 6000$ (°C·сутки/год) должны обладать следующими значениями требуемого сопротивления теплопередаче R_0^{TR} (м²·°C/Вт):

- стены – 2,8-3,5;
- чердачные перекрытия, перекрытия над неотапливаемыми подвалами – 3,7-4,6;
- светопрозрачные ограждающие конструкции – 0,63–0,73.

Для Московской области ГСОП лежит в диапазоне значений от 4800 до 5200°C·сутки/год. Исходя из среднего значения ГСОП, сопротивление теплопередаче (R_0^{TR}) принимается соответствующим нормативу, если оно равно для стен 3,16 м²·°C/Вт, для окон и балконных дверей – 0,54 м²·°C/Вт, для перекрытия первого этажа – 4,16 м²·°C/Вт.

В работе рассматривался частный дом, проектируемый из SIP-панелей, представляющих из себя трехслойную конструкцию, которая состоит из утеплителя-прослойки (пенополистирола, толщиной 150 или 200 мм) и двух внешних цементно-стружечных плит (ЦСП) по обеим сторонам. ЦСП – композиционный листовой стройматериал, имеющий в составе воду (8,25 %), портландцемент (вяжущее вещество, 65 %), древесные стружки (24 %), гидрационные добавки (2,5 %). Использование этих материалов обеспечивает сопротивление теплопередаче через стены 3,2 м²·°C/Вт, что соответствует нормативу для Московского региона.

Теплопотери здания рассчитывались для минимальной температуры января (-27°C) и для усредненной температуры (-3,2°C) за отопительный период для площади здания 250м² (таблица 1).

Наибольшее количество тепла теряется через перекрытия и стены, так как площадь остекления в проекте была выбрана стандартная относительно площади стен здания и ограждающие светопрозрачные конструкции – с повышенным коэффициентом теплосопротивления – 1,06.

Таблица 1. Теплопотери здания при R=3,2

Наружная температура/Потери (Вт)	-3,2, °C	-27, °C	структура тепловых потерь
стены	1349,86	2624,74	27,45%
окна	875,73	1702,81	17,81%
двери	112,21	218,189	2,28%
перекрытия	2580,48	5017,6	52,47%
Итого	4918,28	9563,34	1

3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ

В проекте разрабатывалась система отопления на базе геотермального теплового насоса. В качестве критерия экономической оценки была выбрана стоимость жизненного цикла (суммарные дисконтированные затраты) за минимальный срок службы оборудования – 10 лет[1]. Авторы считают, что этот критерий необходимо использовать при выборе вариантов технических решений, так как отсутствуют притоки денежных средств для объектов ИЖС, и методология оценки экономической эффективности по чистому дисконтированному доходу и сроку окупаемости неприменима для таких оценок[2].

Для рассматриваемого объекта при уровне максимального значения тепловых потерь 9563,34 Вт предлагалось выбрать тепловой насос мощностью 13 кВт с учетом потерь тепловой энергии на вентиляцию. Стоимость оборудования, геозондов и бурения по данным производителя⁵ – 830 тыс. руб. Оценим стоимость жизненного цикла (ЖЦ) при ставке дисконтирования 10% по расходу электроэнергии за отопительный период с коэффициентом преобразования мощности (COP) 4,82 согласно данным производителя теплового насоса. Для этого рассчитаем затрачиваемую тепловым насосом электроэнергию по усредненному значению температуры наружного воздуха (таблица 2).

Таблица 2. Расход электроэнергии ТН на отопление по усредненной температуре

	На -3,2 °C	потребляемая мощность, кВт	Расход ЭЭ, кВтч/год
R=3,2	4918,28	1,02	5118,276
R=6,3	3840,68	0,80	3996,862

Необходимо отметить, что более точным будет расчет потребности в электроэнергии по значениям среднесуточной температуры наружного воздуха и

⁴ В СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*» приводятся значения в зависимости от региона строительства, осредненные за период наблюдения с 1966 по 2010 годы.

⁵ Производитель оборудования ТНУ <https://energylex.ru/tseny-pod-klyuch>

длительности ее стояния. Для теплого насоса мощностью 13 кВт расход составил 7543,7 кВтч/год. При цене электроэнергии для ИЖС в Московской области 3,89 руб./кВтч рассчитана стоимость жизненного цикла системы отопления с ТНУ – 1,108 млн.руб.

В работе была поставлена задача снижения стоимости жизненного цикла. Для решения этой задачи предложено снизить теплопотребление здания путем утепления ограждающих конструкций минеральной ватой с толщиной слоя 100 мм. Дополнительные затраты оцениваются в 84,5 тыс. руб. Коэффициент сопротивления теплопередаче изменился и составил 6,3, что соответствует более низким значениям теплопотерь здания (таблица 3). Изменилась и структура теплопотерь: наибольшую долю имеют перекрытия и окна.

Таблица 3. Теплопотери здания при R=6,3

Наружная температура	-3,2	-27	структура теплопотерь
стены	682,40	1326,88	17,77%
окна	875,73	1702,81	22,80%
двери	112,21	218,19	2,92%
перекрытия	2170,35	4220,12	56,51%
Итого	3840,68	7468,00	1

При уровне тепловых потерь 7468 Вт с учетом потерь через вентиляцию снижается потребность в мощности ТНУ – до 10 кВт и стоимости – до 700 тыс.руб., а также расход электроэнергии тепловым насосом за отопительный период (таблица 2).

В таблице 4 представлена стоимость ЖЦ системы отопления рассматриваемого объекта ИЖС по усредненной температуре и среднесуточной с учетом длительности ее стояния при разных коэффициентах теплопередачи. Также учитывалась стоимость обслуживания оборудования в размере 20 тыс.руб./год.

Таблица 4. Стоимость жизненного цикла ТНУ

	Стоимость оборудования и бурения, тыс.руб.	Расход электроэнергии ТНУ, кВтч/год	Текущие затраты, тыс. руб./год (электроэнергия)	Стоимость ЖЦ тыс.руб.
R=3,2, T=-3,2	830	5118,28	19,91	1050,16
R=3,2, T-среднесуточная	830	7543,7	29,34	1108,13
R=6,3, T=-3,2	700	3996,86	15,55	985,27
R=6,3, T-среднесуточная	700	5802	22,57	1028,42

Годовые затраты на отопление снижаются на 23%, стоимость оборудования и бурения на 15%, стоимость жизненного цикла – на 7%. Стоимость жизненного цикла снижается меньше из-за эффекта дисконтирования, когда затраты будущих периодов имеют более низкую стоимость в момент принятия решения об инвестициях.

Таким образом, изменение характеристик здания имеет существенное значение для выбора оборудования системы отопления на основе НВИЭ.

4. СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОТОПЛЕНИЯ ДЛЯ ИЖС

Сравним стоимость ЖЦ системы отопления на основе ТНУ и системы отопления рассматриваемого объекта ИЖС на основе использования магистрального газа. Газовое оборудование дешевле в 3-4 раза оборудования ТНУ. И газовое отопление не требует бурения. Однако оно требует специальных разрешений и обслуживания, а также должно проходить проверки со стороны государственных органов. Для Московской области стоимость технологического присоединения к газовой сети рассчитывается по стандартизированным ставкам. Согласно распоряжения Комитета по ценам и тарифам Московской области на 2019 год плата за технологическое присоединение к сетям газораспределения АО "Мособлгаз"

- газоиспользующего оборудования с максимальным расходом газа, не превышающим 15 куб. метров в час;
- при условии, что расстояние от газоиспользующего оборудования до сети с проектным рабочим давлением не более 0,3 МПа, измеряемое по прямой линии (наименьшее расстояние), составляет не более 200 метров;
- сами мероприятия предполагают строительство только газопроводов-вводов (без устройства пунктов редуцирования газа и необходимости выполнения мероприятий по прокладке газопровода бестраншейным способом) в соответствии со схемой газоснабжения территории поселения составляет 65 072,25 рублей (с учетом НДС).

В плату за техприсоединение газоиспользующего оборудования не включаются расходы по выполнению мероприятий в границах земельного участка. Без учета этих затрат стоимость жизненного цикла системы отопления ИЖС на основе газа составит 542,7 тыс. руб.

Отметим, что условия по льготному техприсоединению к газовым сетям далеко не всегда выполняются для объектов ИЖС, даже если они находятся в черте городских газифицированных поселений. Для отдельных поселков выполнение условий по расстоянию крайне затруднительно.

Таким образом, равной стоимостью жизненного цикла систем отопления на основе ТНУ и магистрального газа для рассматриваемого объекта обладают технические решения, реализуемые с техприсоединением к газовым сетям и объемом финансирования 582 тыс. руб.

Итак, системы отопления на основе НВИЭ, в частности – тепловых насосов, могут обладать равной экономической эффективностью с традиционными системами энергоснабжения. И могут эффективно участвовать в межтопливной конкуренции «газ-электроэнергия». В увеличении количества объектов, отапливаемых электроэнергией, могут быть заинтересованы энергосбытовые компании, поставляющие электроэнергию как населению, так и прочим потребителям. Электропотребление таких объектов из-за расхода электроэнергии на отопление существенно выше, чем потребление на бытовые нужды. При этом технические решения на основе ТНУ в 3-5 раз (в зависимости от COP, температурных режимов) снижают расход электроэнергии по сравнению с отоплением непосредственно электрическими котлами, что делает их привлекательными для ИЖС.

Централизованное теплоснабжение объектов ИЖС затруднено из-за низкой плотности населения,

а, следовательно, высокой стоимости строительства тепловых сетей и последующего их обслуживания. Однако вклад ИЖС в программы обеспечения жильем населения будет увеличиваться, что показывает важность решения задач экономического энергоснабжения таких объектов, в том числе через снабжение различными видами энергии от нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **А.Л. Наумов, Д.В. Капко, О.С. Судьина** Энергоэффективность, стоимость жизненного цикла и зелёные стандарты//Здания высоких технологий, осень 2014, стр.34-40.
2. **Д.А.Фрей, П.А.Костюченко, А.Г.Зубкова** и др. Оценка экономической эффективности энергосбережения: теория и практика: Справочно-методическое издание/Под общей редакцией А.Г.Зубковой, Д.А.Фрей. – М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2015. – 400с.

Н.А. Сабайкин, Д.А. Смирнова, В.А. Щевьёва, М.Г. Киселев

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается сетевой трехфазный регулятор качества электрической энергии, его структура и система управления. Сетевой регулятор применяется в микросети с целью уменьшения потерь электрической энергии, вызванных протеканием тока высших гармоник в сети. В работе приведены энергетический и экономический эффекты от внедрения регулятора в сеть.

1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием систем распределенной генерации электрической энергии, концепция микросетей становится все более популярной, это обусловлено уменьшением потерь на транспортировку электричества, уменьшением ее стоимости, повышением качества, улучшением экологической обстановки и так далее. Концепция микросетей основана на выработке электрической энергии в непосредственной близости к потребителю для работы в пиковые режимы потребления, совместно с макросетью, а также в случае аварии на питающей линии, способна работать автономно от макросети. Непрерывное энергообеспечение и улучшенное качество электрической энергии имеют решающее значение для постиндустриальной цифровой экономики, которая все больше основывается на непрерывном обмене информацией в режиме реального времени. В микросети часто используют устройства, преобразующие возобновляемую энергию в электрическую. В их состав входит полупроводниковое устройство на базе четырехквadrантного регулятора.

Использование нагрузок на основе силовой электроники, электрические приводы с регулированием частоты вращения, распределенная генерация, инверторное кондиционирование, бытовая электроника, светодиодные осветительные приборы и прочее усугубили ситуацию с качеством электрической энергии [1].

К качеству энергии на выходе преобразователей, как и в целом в сети, предъявляется ряд требований, например, напряжение, частота, гармонический состав напряжения и токов и другие параметры должны иметь минимальные отклонения от установленного в стандарте значения.

Проблемы качества электрической энергии решались с помощью таких устройств как пассивные фильтры [2], затем появились устройства на базе полупроводниковых приборов, которые положили начало развитию гибких систем передачи переменного тока – FACTS [3]. К устройствам FACTS первого поколения принято относить устройства, обеспечивающие регулирование напряжения (реактивной мощности). Примерами таких устройств являются статические тиристорные компенсаторы, фазосдвигающий трансформатор, управляемый тиристорами, управляемые устройства продольной компенсации и другие. К устройствам FACTS второго поколения относят устройства, регулирующие как величину, так и фазу напряжения. Такими устройствами являются СТАТКОМ, объединенный регулятор потока мощности и другие.

Все эти устройства направлены на поддержание необходимого качества электроэнергии, повышение устойчивости и надежности электрической сети [4], [5].

К наиболее перспективному устройству из системы FACTS, на данный момент, относится СТАТКОМ. В данной статье представлено описание его структуры, а также разработана модель микросети, на примере которой рассчитано технико-экономическое обоснование проекта введения регулятора в сеть. Моделирование проводилось в программном комплексе Matlab/Simulink.

2. ОПИСАНИЕ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА

2.1. Структура сетевого регулятора

Интеграция в электрическую сеть источников возобновляемой энергетики, различных видов накопителей электроэнергии, применение активных выпрямителей, активных фильтров, компенсаторов реактивной мощности (СТАТКОМ) выполняется на основе универсальной структуры сетевого регулятора, состоящего из полупроводникового преобразователя и выходного фильтра.

Основными элементами сетевого трехфазного регулятора являются:

- трехфазный мостовой полупроводниковый преобразователь, который способен работать в различных режимах потребления и генерации активной и реактивной мощности (четырёхквadrантный преобразователь);
- выходное фильтрующее звено, обеспечивает непрерывность тока и ослабляет модуляционные гармоники тока регулятора;
- звено постоянного тока;
- система управления.

Регулятор изображен на рисунке 1. В случае четырехпроводной системы, нейтральный проводник подключается к нейтральной точке на стороне постоянного тока.

Особенностью регулятора является то, что он способен работать в четырех квадрантах комплексной плоскости, то есть как потреблять, так и генерировать мощность. Причем потребляемая и генерируемая мощность может быть активной и реактивной.

2.2. Структура системы управления

Система управления регулятором генерирует в зависимости от функции сигналы, которые подаются на полупроводниковые ключи для формирования необходимого тока регулятора, на основании показаний датчиков токов нагрузки и напряжения сети.

Амплитуда, фаза и форма тока на выходе регулятора определяется его реализуемыми функциями [6]:

1. Обмен неактивной мощностью (активная фильтрация высших гармоник, компенсация реактивной мощности, симметрирование нагрузки и др.);
2. Генерирование активной мощности в сеть от различных типов постоянных источников (на стороне постоянного тока ФЭП, аккумуляторная батарея и др.);
3. Потребление активной мощности (выпрямление с высоким коэффициентом мощности и низким коэффициентом гармоник тока);
4. Поддержание качества напряжения сети.

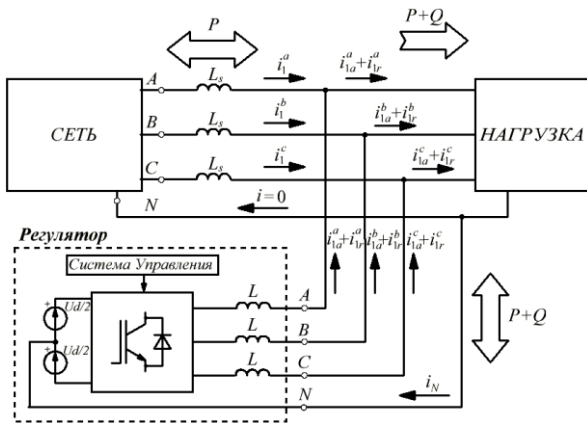


Рис.1. Структура сетевого регулятора.

Упрощенная блок-схема алгоритма управления показана на рисунке 2.

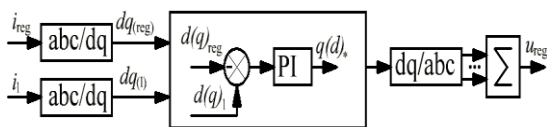


Рис.2. Схема расчета сигнала задания.

Напряжение регулирования вычисляется с помощью преобразования Парка-Горева и его модификаций (блок преобразования abc/dq). Сигналы тока регулятора и тока нагрузки преобразуются на отдельные составляющие в dq -составляющих в зависимости от желаемых функций, активной (d_1) и реактивной (q_1) составляющим, по гармоникам (d_5q_5, d_7q_7 , и т.д.), обратной (d_2q_2) и нулевой последовательностей (d_0q_0) и др. Вычисленные dq составляющие поступают на блок регулирования. По каждой составляющей, требуемой для управления, вычисляется ошибка, которая подается на ПИ регулятор. Выходы блока регулирования (составляющие dq) подаются на блок обратного преобразования dq/abc , где они отдельно преобразуются в трехфазные синусоидальные сигналы. Сумма этих сигналов дает сигнал напряжения регулирования U_{reg} [6].

Активная и реактивная мощности изменяются независимо друг от друга. Потребление или генерация активной энергии ведет к ее накоплению или отбору из конденсаторных батарей на стороне выпрямленного напряжения. Напряжение на конденсаторных батареях, при потреблении преобразователем активной мощности, увеличивается, а при генерации – уменьшается. При этом требуемое напряжение на конденсаторных батареях определяется либо режимом работы преобразователя, либо должно оставаться постоянным, с минимальными пульсациями, в зависимости от конкретной реализации системы автоматического управления регулятором. Поэтому произвольное изменение напряжение недопустимо. Номинальный уровень напряжения должен быть в два раза выше максимальной амплитуды основной гармоники выходного напряжения преобразователя.

2.3. Описание рассматриваемой микросети

Сетевой регулятор работает в микросети, модель которой изображена на рисунке 3, а параметры в таблице 1. Модель была собрана и рассчитана в программном комплексе Matlab/Simulink.

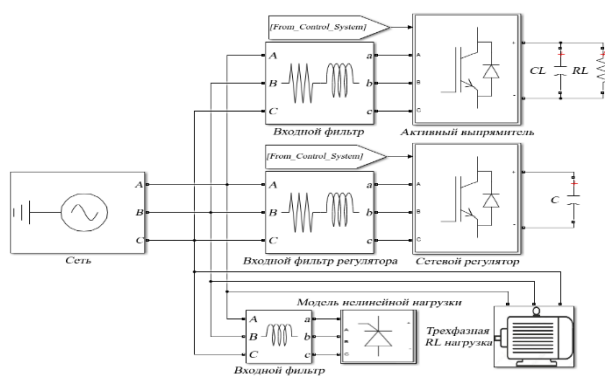


Рис.3. Структура микросети.

Таблица 1. Модель микросети

Параметры		Значения
Напряжение сети, В		380
Частота, Гц		50
Активная мощность нагрузки, кВт		7,07
Реактивная мощность нагрузки, кВА		7,07
ТВ	R, Ом	2
	L, мГн	2,5
	Индуктивность фильтра L_f , мГн	30
СР	Индуктивность фильтра L_f , мГн	1,05
	Сопrotивление фильтра R_f , Ом	0,033
	Входное напряжение, В	750
АВ	Индуктивность фильтра L_f , мГн	1,6
	Сопrotивление фильтра R_f , Ом	0,05
	Сопrotивление нагрузки, Ом	20
	Выходное напряжение, В	800
ТНД тока нагрузки, %		18,5
Итоговый ТНД тока сети, %		3,52

На рисунке 4 изображен спектральный состав тока нагрузки.

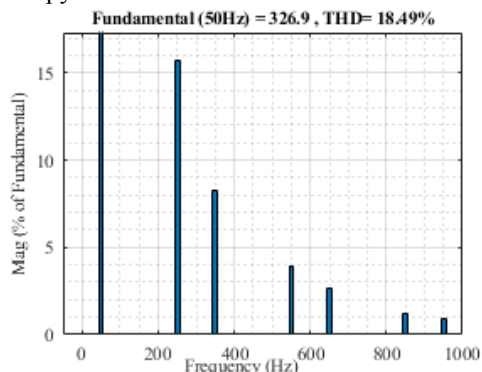


Рис.4. Спектральный состав тока нагрузки.

Коэффициент гармоник тока нагрузки равен 18.5%. Коэффициент гармоник тока сети равен 15.33%, расхождение связано с тем, что ток сети представляет собой сумму тока нагрузки и тока активного выпрямителя.

3. РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Для составления технико-экономического обоснования проекта внедрения сетевого регулятора в сеть необходимо задать местоположением микросети, так как от него зависит тариф на электрическую энергию. А от него, в свою очередь, зависит целесообразность проекта. В проекте рассматривается, внедрение регулятора на примере микросети, изображенной на рисунке 3, которая располагается в Астраханской области. Выбор местоположения обусловлен относительно высокими тарифами на электрическую энергию, большой численностью населения и климатом,

позволяющим вводить возобновляемые источники энергии.

3.1. Энергетический эффект

Результатом реализации проекта станет снижение издержек, вызванных потерями электрической энергии в микросети. Для выяснения энергетического результата проведем расчет снижения потребления электрической мощности.

По результатам моделирования, коэффициент гармоник тока сети до введения регулятора составил (THD) 15.33%. А действующее значение полного тока (I), с учетом высших гармоник, равно 280 А. Тогда действующее значение тока высших гармоник (паразитных – нежелательных), до введения регулятора, определяется из формулы:

$$I_{\text{гарм}} = THD \cdot I \quad (1)$$

$$I_{\text{гарм1}} = 0.1533 \cdot 280 = 42.92 \text{ А}$$

Активная мощность (P) сети составляет 175,8 кВт. Активное сопротивление находится по формуле (2) и не меняется при введении регулятора:

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{175.8 \cdot 10^3}{280^2} = 2.24 \text{ Ом}$$

При протекании тока высших гармоник по сети возникают потери, вызванные наличием рассчитанного активного сопротивления сети. Тогда эти потери можно оценить по формуле (3):

$$P_{\Delta} = R \cdot I_{\text{гарм}}^2 \quad (3)$$

$$P_{\Delta1} = 2.24 \cdot 42.92^2 = 4.1 \text{ кВт}$$

Для расчета энергии потерь найдем время максимальных потерь. Для расчета этого времени используют эмпирическую зависимость (4), и времена использования максимума нагрузки – T_{max} принимаем равным 4000 часов:

$$\tau = (0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10^4})8760 \quad (4)$$

$$\tau = (0,124 + \frac{4000}{10^4})^2 8760 = 2405,3$$

Тогда годовые потери электрической энергии составят:

$$\Delta W = P_{\Delta} \tau \quad (5)$$

$$\Delta W_1 = 4.1 \cdot 2405.3 = 9861.73 \text{ кВтч}$$

При внедрении сетевого регулятора, по результатам моделирования предполагается снижение коэффициента гармоник тока сети до 3.52%. По (1), (3) и (5) получим действующее значение тока высших гармоник, потери мощности и потери энергии:

$$I_{\text{гарм2}} = 8,87 \text{ А}$$

$$P_{\Delta2} = 176 \text{ Вт}$$

$$\Delta W_2 = 423,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Энергетический эффект от введения найдем по формуле (6):

$$\Delta W = \Delta W_1 - \Delta W_2 \quad (6)$$

$$\Delta W = 9861,73 - 423,3 = 9438,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

3.2. Экономический эффект

Временные рамки проекта характеризуются периодом реализации проекта и его разбивкой на отдельные интервалы времени (шаги). Период реализации проекта (расчетный период) – отрезок времени, в течение которого осуществляются предусмотренные проектом действия и обеспечивается получение предусмотренных проектом результатов.

Шаг расчетного периода – отрезок времени в расчетном периоде, для которого определяются технические, экономические и финансовые показатели проекта.

Принимаем за начало расчетного периода момент ввода регулятора в эксплуатацию. Период реализации принимаем равным 15 лет, а шаг составит 1 год. Условимся, что инвестиции приходятся на начало нулевого шага, а экономический эффект снижения потерь – на конец.

Проект рассчитан на 15 лет, однако возможно досрочное его прекращении. Условиями для прекращения данного проекта следующие:

- выход из строя сетевого регулятора, без возможности его ремонта;
- вывод из эксплуатации регулятора в связи с появлением более технологического устройства. То есть замена данного устройства, на более технологическое.

Характеристика инвестиционных и текущих затрат, результаты проекта. Инвестиционные затраты состоят из оплаты за выполненные работы подрядчика. Выполненные работы: проектирование и согласование документации на устройство, а также покупка комплектующих для его сборки, монтаж, пуск и наладка. Стоимость деталей и элементов, необходимых для сборки, приведена в смете, таблица 2.

К текущим затратам относится плановая техническая диагностика, осуществляемая каждый третий год эксплуатации. Диагностика проводится специалистами, которым необходимо заплатить денежные средства за проделанную работу. Принимаем, что на диагностику будет выделяться 10 тысяч рублей.

Для расчета экономического эффекта необходимо умножить энергетический эффект на стоимость электрической энергии – тариф. Исходя из анализа [7] принимаем для расчета экономического эффекта, одноставочный тариф, который увеличивается на 4% каждый год по отношению к предыдущему значению.

Примерные денежные потоки по шагам проекта представлены в таблице 3. При этом инвестиции осуществляются в начале шага, а экономический эффект оценивается в конце шага.

Таблица 2. Смета проекта

Наименование	Кол-во, шт.	Цена ед., тыс. руб.	Стоимость, тыс. руб.
Полупроводниковый модуль	1	23.3	23.3
Датчик тока	6	2.54	15.24
Датчик напряжения	4	2.6	10.4
Микроконтроллер	1	6.5	6.5
ПЛИС	1	1.1	1.1
Конденсаторные батареи	2	7	14
Контактор	1	10	10
Фильтрующий дроссель	1	24	24
Прочее			15.56
Проектирование, согласование, монтаж, пуск и наладка	1	60	60
Итого			180.1

4. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Оценка экономической эффективности произведена по нескольким показателям. Так в процессе оценки были определены чистая прибыль, срок окупаемости, рентабельность инвестиций, чистый дисконтированный доход, индекс доходности и ВНД. Результаты сведены в таблицу 4.

4.1. Рентабельность инвестиций

Данный метод подразумевает использование средней нормы прибыли на инвестиции:

$$НП = \frac{ПР}{И} \quad (7)$$

$$НП = \frac{944.7}{180.1} = 5.25$$

4.2. Срок окупаемости инвестиций

Данный метод заключается в определении необходимого для возмещения инвестиций периода времени, за который вложенные средства окупятся доходами, полученными от реализации проекта. Денежный поток нарастающим итогом стал равен нулю между 3 и 4 шагом. То есть проект окупиться на 4 году эксплуатации регулятора. С помощью пропорции найдем точный момент окупаемости:

$$\frac{x}{-36.6} = \frac{x - 12}{18.7}$$

$$x = 8$$

Срок окупаемости равен 3 года 8 месяцев, он меньше, чем срок реализации проекта, следовательно, проект эффективен.

4.3. Определение ЧДД

Инвестиционные ресурсы состоят полностью из собственных средств. А норма дисконта является основным экономическим нормативом, используемым при

оценке эффективности ИП и показывающим альтернативную норму доходности капитала.

Поскольку на данный момент средняя ставка по депозитам в банке составляет около 6%. Тогда примем в качестве нормы дисконта ставку по депозитам в банке и увеличим ее на премию за риск. Таким образом норма дисконта равна 10%. Расчеты представлены в таблице 4.

4.4. Определение индекса доходности

Индекс доходности представляет собой отношение суммы приведенных эффектов к величине капитальных вложений. Они могут рассчитываться как для дисконтированных, так и недисконтированных денежных потоков.

$$\text{ИДД} = \frac{445.68}{180.1} = 2.47$$

Таблица 3. Денежные потоки проекта

Шаг	Инвестиционные затраты, тыс. руб.	Текущие затраты, тыс. руб.	Энергетический эффект, кВтч.	Тариф, руб/кВтч	Экономический эффект, тыс. руб.
0	180.1				
1			9 438.4	5.21	49.2
2			9 438.4	5.42	51.1
3		10	9 438.4	5.64	43.2
4			9 438.4	5.86	55.3
5			9 438.4	6.1	57.5
6		10	9 438.4	6.34	49.8
7			9 438.4	6.59	62.2
8			9 438.4	6.86	64.7
9		10	9 438.4	7.13	57.3
10			9 438.4	7.42	70
11			9 438.4	7.71	72.8
12		10	9 438.4	8.02	65.7
13			9 438.4	8.34	78.7
14			9 438.4	8.68	81.9
15			9 438.4	9.02	85.2

Таблица 4. Оценка экономической эффективности проекта

Шаг	Инвестиционные затраты, тыс. руб.	Текущие затраты, тыс. руб.	Денежный поток, тыс. руб.	Денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб.	Коэффициент дисконтирования	Дисконтированный денежный поток, тыс. руб.	Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб.
0	180.1		-180.1	-180.1	1	-180.1	-180.1
1			49.2	-130.9	0.909	44.71	-135.4
2			51.1	-79.8	0.826	42.27	-93.1
3		10	43.2	-36.6	0.751	32.42	-60.7
4			55.3	18.7	0.683	37.78	-22.9
5			57.5	76.3	0.621	35.72	12.8
6		10	49.8	126.1	0.564	28.13	41
7			62.2	188.3	0.513	31.93	729
8			64.7	253	0.467	30.19	103.1
9		10	57.3	310.3	0.424	24.3	127.4
10			70	380.3	0.386	26.99	154.4
11			72.8	453.1	0.350	25.51	179.9
12		10	65.7	518.8	0.319	20.94	200.8
13			78.7	597.6	0.29	22.81	223.6
14			81.9	679.5	0.263	21.56	245.2
15			85.2	764.6	0.239	20.39	265.6

4.5. Определение ВНД

Внутренняя норма доходности представляет собой ту норму дисконта, при которой приведенные эффекты равны приведенным капитальным вложениям. Это такая норма дисконта, при которой интегральный эффект проекта (например, ЧДД) становится равным нулю.

Для нахождения ВНД воспользуемся специальной функцией в программе Excel. В результате получилось, что ВНД данного проекта составляет 29%, что больше альтернативной доходности. Следовательно, проект эффективен.

Зависимость чистого дисконтированного дохода от ставки дисконтирования представлена на рисунке 6.

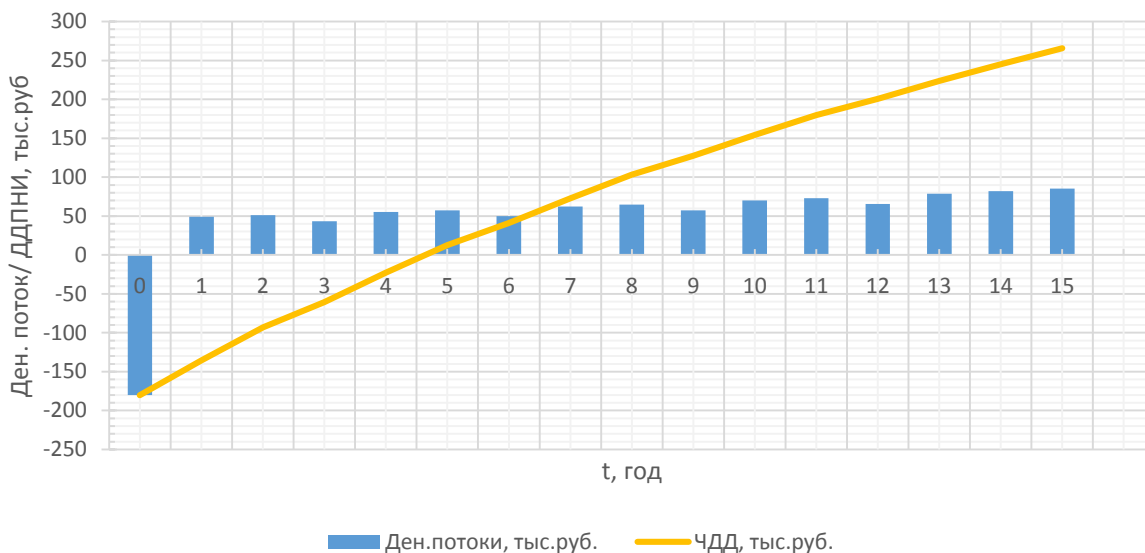


Рис.5. Распределение денежных потоков и денежных потоков нарастающим итогом по годам функционирования проекта.

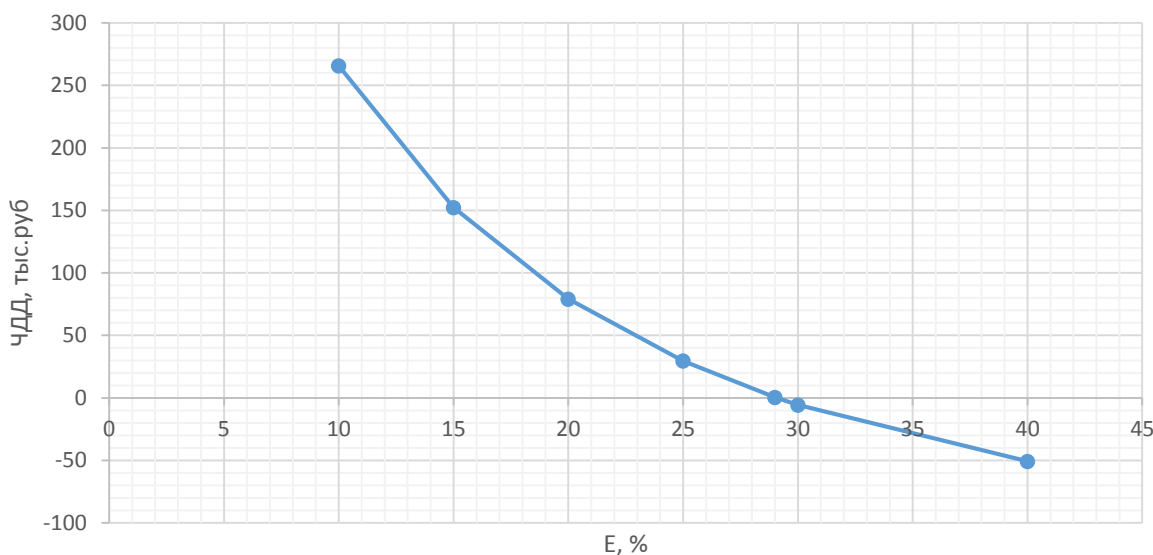


Рис.6. Зависимость ЧДД от ставки дисконтирования.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье был проведен анализ структуры сетевого регулятора и его системы управления. А также была проведена экономическая оценка внедрения данного регулятора в микросеть.

Результаты оценки показали, что на экономическую эффективность проекта влияют такие факторы как тариф на электрическую энергию. Проект будет тем эффективнее с экономической точки зрения, чем выше тариф на электрическую энергию.

Помимо всего, проект имеет положительные ЧД, ЧДД, срок окупаемости меньше периода реализации, индекс доходности и норма прибыли превосходят требуемые значения. Поэтому, можно сказать, что проект является экономически эффективным и его следует рекомендовать к реализации.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИП — инвестиционный проект;
 НП — норма прибыли;
 THD — коэффициент гармоник;
 FACTS — Flexible AC transmissions system;
 АВ — активный выпрямитель;
 СР — сетевой регулятор;
 ТВ — трехфазный выпрямитель;
 ИДД — индекс доходности;
 ЧДД — чистый дисконтированный доход;
 ДДПНИ — дисконтированный денежный поток нарастающим итогом;
 ВНД — внутренняя норма доходности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rohouma W., Balog R.S., Peerzada A.A., Begovic M.M. D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads // Renewable Energy, vol. 145, pp. 1449-1464, January 2020.

2. **Beres R.N., Wang X., Liserre M., Blaabjerg F., Bak C.L.** A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4 (1), pp.54-69, March 2016.
3. **Understanding FACTS.** Hingorani N. G., Gyugyi L. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2000.
4. **Rozanov Y., Lapanov M., Kiselev M.** Multifunctional power quality controller based on power electronic converter // 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC 2014), pp. 1011-1016, August 2014.
5. **Xu Y., Tolbert L.M., Kueck J.D., Razy D.T.** Voltage and current unbalance compensation using a static var compensator // *IET Power Electronics*, vol.3 (6), pp. 977-988, 2010.
6. **Sabaykin N. A., Kiselev M. G., Konyushenko E. V., Erokhina E. S. and Rozanov Y. K.** Power Grid Regulator Utilization for Current Harmonic Reduction in Smart Grid// 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5.
7. **Постановление службы по тарифам Астраханской области от 11.12.2019 №131** "О ценах (тарифах) на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Астраханской области на 2020 год" // Служба по тарифам Астраханской области. Режим доступа: URL: <http://www.astrtarif.ru/?id=7038>.
8. **Щевьёва В. А.** Финансирование инновационных проектов и экономическая оценка инвестиций: учеб. пособие. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

П.М. Савченков

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье описаны возможности и перспективы использования модульных систем, которые могут использоваться для охлаждения как различных типов электронного оборудования, так и объектов инфраструктуры. Особый интерес подобные системы представляют при применении их в масштабируемых системах, что позволяет получить существенную экономию при проектировании, производстве, монтаже и эксплуатации.

1. ВВЕДЕНИЕ

Экономия энергии в настоящее время становится приоритетным вопросом в развитии большинства технических систем. Одним из направлений повышения энергоэффективности в области поддержания требуемых температурных режимов тепловыделяющего оборудования, а также создания необходимых условий окружающей среды является использование пассивных теплопередающих устройств, применяемых для создания требуемого теплового режима функционирования.

Пассивные системы охлаждения не используют дополнительные источники энергии, которые требуют финансовых затрат при работе. Это чаще всего потребление электрической энергии для своего функционирования. Эти системы позволяют охлаждать, нагревать или поддерживать температурные режимы, используя различные механизмы передачи тепла без дополнительных затрат.

Пассивные системы можно разделить на несколько типов:

- системы, использующие механизм теплопроводности при отводе теплоты от охлаждаемого объекта с последующим ее рассеиванием в окружающую среду с помощью естественной или вынужденной конвекции;
- системы, использующие фрикулинг, фактически заменяющие мощные холодильные установки для охлаждения помещений с большими тепловыделениями, с минимальными затратами энергии на привод вентиляторов для создания эффективного режима сброса теплоты;
- системы, использующие механизмы фазовых переходов испарения-конденсации, такие как тепловые трубы и термосифоны различных конструкций;

- системы, использующие механизмы фазовых переходов плавление-затвердевание, фактически являющиеся накопителями тепла или холода и др.

- различные сочетания упомянутых типов.

В настоящее время описано большое количество пассивных устройств и систем. При этом следует заметить, что типовые системы часто не имеют типовых решений, что вызывает необходимость индивидуального проектирования, существенно повышая затраты при проектировании. Остается и проблема объективного выбора конкретного устройства или системы для решения различных задач, обусловленная ограниченностью ресурсов, активным, даже можно сказать, агрессивным продвижением определенных брендов, а соответственно, и типов оборудования, а также квалификацией и кругозором проектировщика данных систем. В связи с этим, становится актуальной разработка универсального способа выбора системы охлаждения тепловыделяющего оборудования, одним из которых являются модульные системы пассивного охлаждения.

Модульные системы, используемые для пассивного охлаждения, позволяют, во-первых, стандартизировать выбор типа этой системы в зависимости от объекта охлаждения, во-вторых, обеспечит снижение капиталовложений в типовое оборудование и в стоимость его монтажа, в-третьих, ускорит процесс проектирования, что также повлияет на конечную стоимость, а также снизит эксплуатационные затраты.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

В настоящее время модульные системы применяются для охлаждения:

1. ЦОД:
 - a. Вычислительные центры;
 - b. Центры хранения данных;
2. Сотовых вышек;
3. Объектов инфраструктуры;
4. Компьютеров;
5. Электронных устройств;
6. Любых масштабируемых систем.

Принципиально важным на таких объектах является компактное размещение тепловыделяющей, в том числе, вычислительной мощности, то есть высо-

кая плотность размещения оборудования, и, следовательно, повышенные требования по компактности и при этом высокой эффективности охлаждающего оборудования. А эти требования зачастую противоречат друг другу, а кроме того, увеличивают затраты на электропривод такого оборудования.

Подобные проблемы с повышенными требованиями по компактности размещения возникают и при охлаждении радиоэлектронного оборудования в компьютерной технике, на авиационных и космических летательных аппаратах. Все это в конечном итоге влияет на стоимость таких объектов.

Модульный подход позволяет одновременно учесть ряд влияющих технико-экономических факторов в отличие от традиционного подхода. Традиционный подход (рис. 1) предлагает выбор типа системы охлаждения исходя из знаний и навыков проектировщика, а иногда и его финансовой заинтересованности в продвижении определенных типов оборудования. В этом случае велика вероятность того, что самые эффективные системы охлаждения, в частности, пассивные, останутся не рассмотренными в рамках оценки энергетической, а затем и экономической эффективности.

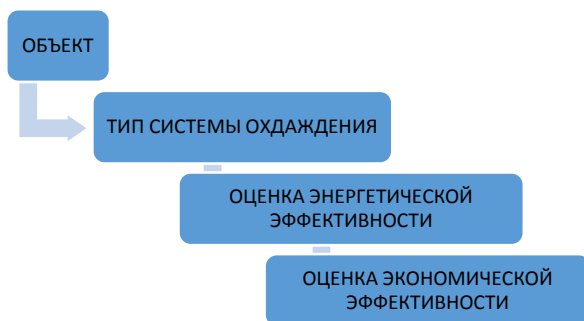


Рис. 1. Традиционный подход.

Модульный подход (рис. 2) требует предварительных затрат времени и ресурсов на оценку потенциала существующих систем пассивного охлаждения применительно к различным объектам, создание обобщающего банка данных, комплексную оценку на основе критериев энергетической и экономической эффективности.

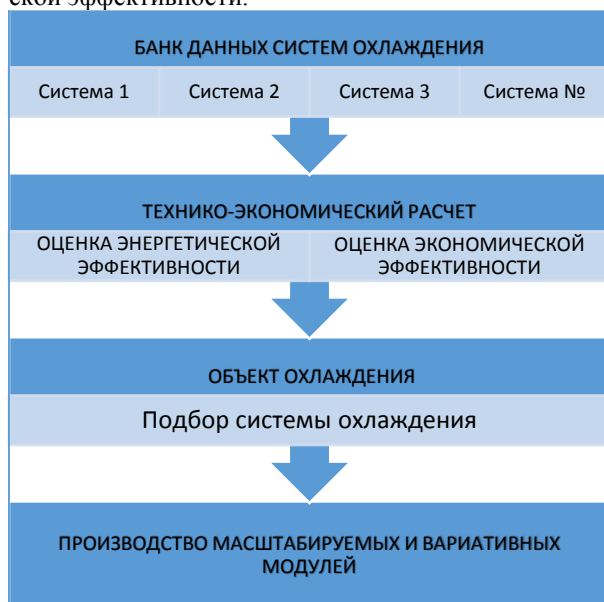


Рис. 2. Модульный подход.

Системы с фрикулингом нельзя считать системами с нулевым потреблением энергии. Эксплуатационные затраты должны учитывать не только затраты электрической энергии, но и амортизацию оборудования. Хотя количество этой энергии существенно ниже потребления традиционных систем. Энергетическую эффективность для подобных систем охлаждения, которые используют пониженное количество энергии, например, системы с фрикулингом или свободным охлаждением, рекомендуется рассчитывать по показателю энергетического КПД, как отношение полезной теплоты к затраченной:

$$\eta_a = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{затр}}} \quad (1)$$

$Q_{\text{пол}}$ – это количество отведенной от объекта теплоты, Вт, $Q_{\text{затр}}$ – затраченная на привод нагнетательной мощности, чаще всего электрическая, Вт.

А эффективность абсолютно автономных систем, например, с тепловыми трубами или с теплопроводными радиаторами, рекомендуется рассчитывать по показателю эксергетического КПД.

$$\eta_e = \frac{E_{\text{отв}}}{E_{\text{подв}}} \quad (2)$$

где $E_{\text{отв}}$ – поток эксергии на выходе из объекта, Вт, $E_{\text{подв}}$ – поток эксергии на входе в объект, Вт.

В свою очередь, показателями экономической эффективности пассивных модульных систем будут срок окупаемости и суммарные дисконтированные затраты, определяющие экономический эффект.

Технико-экономическое обоснование эффективности применения модульной системы пассивного охлаждения производится на основе сопоставления затрат на проведение модернизации и экономии топливно-энергетических ресурсов [14-16].

Экономический эффект, вычисляется по формуле:

$$\mathcal{E}_e = \sum_{t=0}^{T_p} (\Delta \mathcal{E}_t - I_t - K_t) * (1 + E_d)^{-t} \quad (3)$$

где \mathcal{E}_e – величина экономического эффекта, руб.; $\Delta \mathcal{E}_t$ – стоимостная оценка экономии эксплуатационных расходов при внедрении технологии, руб./год; K_t – затраты на реализацию технологии и проведения работ, руб./год; I_t – ежегодные издержки без учета амортизационных отчислений, руб./год; T_p – расчетный период, равный сроку службы основного оборудования, г, E_d – средняя величина ставки дисконтирования. Точная оценка экономии эксплуатационных расходов представляет сложность в связи с необходимостью учета взаимного влияния определяющих факторов, для чего рекомендуется использовать метод экспертной оценки.

Основными влияющими факторами являются:

- использование природных тепла и холода;
- снижение эксплуатационных затрат;
- экономия расхода запасных частей при уменьшении количества движущегося оборудования;
- экономия эксплуатационного расхода на энергоресурсы – электроэнергию, топливо;
- использование вторичных энергетических ресурсов, утилизации и регенерации;
- другие.

3. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Преимущества

1. Низкое потребление энергии

Как уже отмечалось выше, системы с пассивным охлаждением [7-8] чаще всего требуют затрат энергии, однако по сравнению с принудительным охлаждением, так, а при сопоставлении этих затрат на электроэнергию для систем свободного и машинного охлаждения (рис. 3) для кондиционируемых помещений офисов для различных условий эксплуатации, получена разница в 2-5 раз.

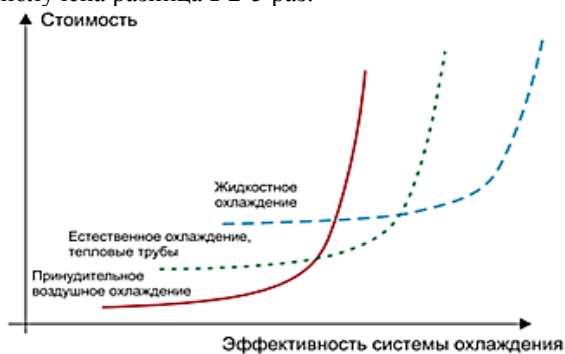


Рис. 3. Соотношение стоимости и эффективности различных систем охлаждения.

2. Надежность

Использование систем с пассивным охлаждением позволяет снизить количество оборудования с движущимися частями, в связи с чем, снижается вероятность отказов и время восстановления, а также время плановых и внеплановых ремонтов и количество комплектующих для ремонтов, то есть снижаются и материальные затраты.

Модульность системы еще более увеличивает ее ремонтпригодность, так как позволяет восстанавливать оборудование, меняя блоки, пришедшие в негодность. Ремонт самих блоков затем может осуществляться в стационарных условиях в сервисных центрах производителей или дилеров оборудования, что существенно улучшает качество и увеличивает ресурс. В работе [9] приводится пример модульной архитектуры системы охлаждения электронной аппаратуры (рис. 4), которая позволяет легко заменять элементы системы как в зависимости от нагрузки, так и по причине выхода из строя.

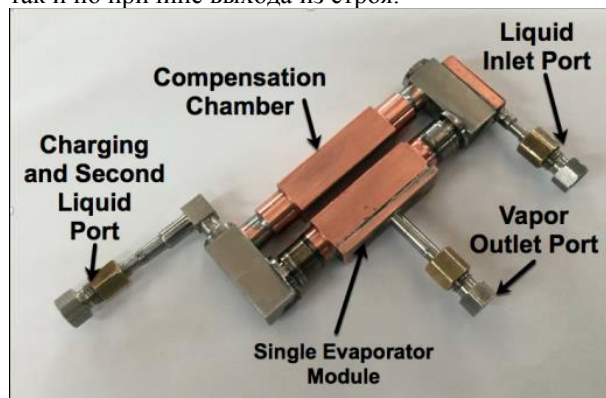


Рис. 4. Модульная конструкция испарителя системы охлаждения электронной аппаратуры на основе контурной тепловой трубы.

Важным фактором надежности является также уменьшение пожароопасности системы в целом.

3. Компактность

Можно рассмотреть преимущества в размерах системы по компактности во всех типах модульных систем, перечисленных выше [1-6]. Описанная в работе [4] модульная система охлаждения представляет собой само-охлаждаемый шкаф-стойку для аппаратуры высокой плотности в информационных центрах. Модульная система охлаждения предназначена для дополнения существующей традиционной системы охлаждения информационного центра и позволяет увеличить вычислительную мощность без увеличения текущей тепловой нагрузки в информационном центре. Кроме того, позволяя размещать аппаратуру с плотностью энергопотребления в три раза превышающей соответствующий показатель для стандартной стойки, модульная система охлаждения повышает надежность информационного центра.

Виды и формы пассивных систем охлаждения для электронных устройств поражают воображение, сочетая компактность с дизайном. Например, пассивные радиаторы для охлаждения светодиодной техники (рис. 5) могут иметь практически любую форму сечения, высоту устройства, форму ребер [11-12].



Рис. 5. Радиаторы для охлаждения светодиодов.

Увеличивает компактность системы и отсутствие электрической проводки в пассивных системах.

4. Дешевизна

Стоимость самой системы по сравнению с активным охлаждением может отличаться в 2-7 раз. Снижается стоимость проектирования, появляется возможность подбора из банка данных систем охлаждения с учетом модульного подхода. Эксплуатационные затраты снижаются из-за снижения потребления электроэнергии и других ресурсов.

5. Соответствие требованиям технического задания

Масштабируемость и вариативность модулей позволит выполнять требования для штатного функционирования охлаждаемой аппаратуры, прежде всего, по соблюдению рабочей температуры эксплуатируемой техники, отводимого теплового потока, локальных перегревов и т.д.

6. Использование вторичных источников

Рециркуляция, регенерация, применяемые в системах охлаждения, повышают их коэффициент по-

лезного действия, снижают и без того малое потребление энергии из внешних источников, позволяют утилизировать и перераспределять потоки теплоты.

7. Гибкость системы

Гибкость модульных систем обусловлена стандартизацией охлаждающего оборудования, взаимозаменяемостью ее элементов.

8. Эксплуатационные характеристики

Модульные системы обеспечивают удобство монтажа и обслуживания, сокращая время, а соответственно, эксплуатационные затраты.

9. Экологическая безопасность

Защита окружающей среды обусловлена применением типового оборудования, что обеспечивает более высокое качество изготовления, снижает аварийность, количество оборудования, потребления энергоресурсов при эксплуатации.

Ограничения

Следует помнить и о недостатках таких систем.

1. Мощность и эффективность

Пассивные системы не всегда могут обеспечить отвод требуемого количества теплоты, имеют сложности с возможностью регулирования теплоотдачи, ограничены расстоянием теплопереноса. Например, эффективный предел теплопереноса тепловых труб.

2. Условия работы

Несмотря на преимущества в компактности модульных систем, не всегда можно найти место для их локального размещения. Эксплуатация этих устройств происходит при высокой температуре, запыленности, влажности, локальных перегрузках, др.

3. Стоимость

Определенные типы модульных систем пассивного охлаждения являются высокотехнологичными, а, следовательно, имеют более высокую стоимость.

4. Влияние внешней среды

Эффективность эксплуатации пассивных устройств сильно зависит от погодных условий и времени суток, наличия принудительной природной конвекции, других различных внешних воздействий.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня одной из основных проблем при проектировании систем охлаждения является отсутствие единого подхода, обеспечивающего максимальный технико-экономический эффект от применения той или иной системы охлаждения. Рекомендуемым подходом к оценке эффективности пассивных модульных систем охлаждения является расчет суммарных дисконтированных затрат и экономического эффекта, определяющего сроки окупаемости этих систем. Преимущества использования пассивных систем охлаждения увеличиваются при использовании модульных систем. Использование пассивных систем в случаях, например, с охлаждением зданий и сооружений, позволит снизить капитальные затраты, так как оборудование таких систем существенно дешевле традиционных. Однако для систем охлаждения электронного оборудования эти системы могут стоить как дешевле, так и дороже, в зависимости от используемой технологии. Модульный подход к проектированию, производству и использованию пассивных систем охлаждения позволит снизить эксплуатационные затраты в 2-5 раз.

В связи с этим, предложенный модульный подход позволит проектировать на основе банка данных системы охлаждения с максимальной экономической эффективностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соловьев А.В.** Модульные системы охлаждения в серверных комнатах и ЦОДах, https://avtprom.ru/news/2016/09/05/modulnye-sistemy-okhlazhzh_2016
2. **Torell Mercedes Cortes, James Luntz.** Quantitative Analysis of a Prefabricated vs. Traditional Data Center White Paper https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=White+Paper&p_File_Name=VAVR-9U4PPA_R0_EN.pdf&p_Doc_Ref=SPD_VAVR-9U4PPA_EN
3. **Колпаков А.** Охлаждение в системах высокой мощности. Силовая Электроника, № 3, 2010 С. 62-66 https://www.power-e.ru/pdf/2010_3_62.pdf
4. **Стеффан Рапп,** Россия. Нестандартное решение проблем теплоотвода. №2 (50), Control Engineering. 2014
5. **Муратов А.В., Ципина Н.В.** Способы обеспечения тепловых режимов РЭС. ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет» Учебное пособие Воронеж 2007
6. **Меркульев А. Ю., Горячев Н. В., Юрков Н. К.** Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий — Молодой ученый. 2013. № 11 (58). С. 143-145.
7. **Малявина Е. Г., Фролова А. А., Силаев А. С.** Энергетическая и экономическая оценка систем свободного и машинного охлаждения для кондиционируемых помещений офисов. АВОВ / Кондиционирование воздуха. №1, 2014
8. **Belarbi R., Allard F.** Development of feasibility approaches for studying the behavior of passive cooling systems in buildings. Renewable Energy 22 (2001) 507–524
9. **Mishkinis D, Usakovs I, Nasibulin D.** Novel Modular Evaporator Architecture for Electronics Cooling Applications. Paper 338, proc. 19th International Heat Pipe Conference and 13th International Heat Pipe Symposium, Italy. 2018
10. **María Herrando, Christos N. Markides** Hybrid PV and solar-thermal systems for domestic heat and power provision in the UK: Techno-economic considerations. Applied Energy, 161, 2016, 512-532
11. **Лотар Н.** Охлаждение и регулирование температурных режимов светодиодов. Полупроводниковая светотехника. №3, 2010
12. United States Patent 12.11.2013 PASSIVECOOLING ENCLOSURE SYSTEM AND METHOD FOR ELECTRONICS DEVICES Mario Facusse, **David Scott Kosch**
13. United States Patent (10) Patent No.: US 8,276,394 B2 02.10.2012 MODULAR ABSORPTION HEAT SINK **Ali Heydari, Kenneth C. Gross**
14. **Гагарин В. Г.** Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. – 2010. – № 3
15. **Бланк И.А.** Инвестиционный Менеджмент. – М.: Эльга-Н, 2007. – 448 с
16. Инвестиции : учебник для вузов / под ред. **Л.И. Юзвович, С.А. Дегтярева, Е.Г. Князевой.** – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 543 с.

Д.А. Смирнова, Д.Г. Шувалова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

КОНЦЕССИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ТАРИФНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

АННОТАЦИЯ

В данной работе изучается состояние тепловых сетей в России. Рассматриваются современные технологии, применяемые для снижения потерь в трубопроводе и повышения энергосбережения при работе котельной. Анализируется опыт применения трубопроводов в ППУ изоляции как наиболее эффективный вариант борьбы с тепловыми потерями. Изучается существующая проблема финансирования инвестиционных проектов в энергетике и трудности привлечения частного капитала в данную сферу. Одним из способов решения сложившейся ситуации является заключение концессионных соглашений. В работе приведены результаты расчетов тарифа при участии котельной в концессии, которые доказывают эффективность модернизации в рамках концессионного соглашения.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос состояния разводящих тепловых сетей в России имеет достаточно большое значение. На период 2019 года страна имеет 342 тыс. км. теплоснабжения. Примерно 34 процента (99 тыс.км.) сетей нуждаются в замене по причине роста количества аварий и окончания срока эксплуатации. В настоящее время удельная повреждаемость по регионам России составляет в среднем 1,8–2,2 на 1 км в год при допустимых 0,3. В Западной Европе этот показатель равен 0,1. Объем перекладки изношенных тепловых сетей не превышает 1,2% их общей протяженности и только в отдельных регионах составляет 1,8% при необходимости 4–5 и более в год [1]. Большинство тепловых сетей в РФ находятся в плачевном состоянии, что приводит к кризису в системе ЖКХ.

2. СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ В РОССИИ

Активное строительство в 50-е годы и последующие десятилетия XX века дешевого теплорасточительного жилья сопровождалось рассредоточенной застройкой городов. Это удешевляло строительство и стимулировало быстрое развитие систем централизованного теплоснабжения (ЦТ) – локальных естественных монополий. В результате резко увеличилась протяженность теплотрасс и затраты на их строительство, многократно выросли потери тепла, удорожилась эксплуатация. В настоящее время

около 72% всей тепловой энергии производится централизованными источниками (мощностью более 20 Гкал/ч), остальные 28% производятся децентрализованными источниками, в том числе 18% – автономными и индивидуальными источниками. Кроме того, незначительная часть спроса на тепловую энергию (4,5%) удовлетворяется за счет утилизации сбросного тепла от технологических установок, а доля тепла, получаемого от возобновляемых источников энергии, очень мала.[2]

Системами централизованного теплоснабжения вырабатывается около 1,4 млрд Гкал тепла в год. Около 600 млн Гкал тепловой энергии ежегодно производят 68 тысяч коммунальных котельных. В большинстве крупных городов (более 100 тыс. чел.) централизованным теплоснабжением обеспечено 70-95% жилого фонда.

Ключевая проблема жилищно-коммунального хозяйства – повышение надёжности и экономичности теплоснабжения, поскольку 20% всех тепловых источников находится в этом секторе экономики и 20-30% расходной части бюджетов муниципальных образований используется на нужды теплоснабжения.

Около 50% объектов коммунального теплоснабжения и инженерных сетей требуют замены, не менее 15% находятся в аварийном состоянии. На каждые 100 километров тепловых сетей ежегодно регистрируется в среднем 70 повреждений. Потери в тепловых сетях достигают 30%, а с утечками теплоносителя ежегодно теряется более 0,25 кубических километров воды, 82% общей протяженности тепловых сетей требуют капитального ремонта или полной замены.

К основным причинам плачевного состояния систем коммунального теплоснабжения относятся дефицит финансовых средств, износ оборудования и тепловых сетей, слабое управление и нерешенные вопросы разграничения полномочий и ответственности в коммунальной энергетике, отсутствие перспективных схем развития систем теплоснабжения. [3]

Развитие децентрализованных источников теплоснабжения будет идти высокими темпами, как в связи с ростом числа жилых домов и общественных зданий в сельской местности, пригородах, малых го-

родах и ПГТ, так и за счет перехода к индивидуальному теплоснабжению в городских зонах с не устраняемыми критическими условиями функционирования систем ЦТ. Использование здесь технически и энергетически совершенных конструкций и схем позволит постоянно снижать расходы топлива, повышать надежность теплоснабжения и обеспечивать стоимость тепла на уровне, адекватном доходам населения.

Намечаемые уровни развития теплоснабжения, коренная модернизация и техническое перевооружение отрасли потребуют значительного роста инвестиций. Основным источником капитальных вложений будут являться собственные средства предприятий отрасли, средства региональных и муниципальных бюджетов, тарифные источники, заемные средства, в том числе привлеченные на условиях проектного финансирования.

3. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В ППУ ИЗОЛЯЦИИ

Большая часть домов в нашей стране пользуется центральным отоплением. Горячая вода почти во всех ее регионах тоже подается централизованно. Однако воду мало нагреть — ее еще нужно доставить потребителю с минимальными потерями тепла.

В советские времена теплоизоляция трубопровода представляла из себя следующее:

- * Труба заворачивалась в слой теплоизоляции;
- * Стекловата фиксировалась обычной отожженной стальной проволокой;
- * Сверху трубы покрывалась листом оцинкованного железа.

Во время эпидемии краж цветных металлов в 90-е годы от оцинковки пришлось отказаться. Поверхность зачастую стали обмазывать простым цементным раствором. Его, разумеется, не крали; однако потери тепла в этом случае были больше: оцинковка уменьшала и потери на излучение, чего о растворе не скажешь.

Наконец, примерно 15 лет назад начали применять трубы в ППУ (в пенополиуретане). Параллельно был налажен выпуск еще одного изделия: скорлупа ППУ для труб могла служить теплоизоляцией уже действующих теплотрасс.

Материал на фоне предшественников обладает целым рядом достоинств:

- * Предельно легким монтажом;
- * Если стекловата, намкнув под дождем при нарушении внешней оболочки, резко ухудшает теплоизолирующие качества, то труба в ППУ имеет одинаково низкие теплотери при любой влажности;

* Трубу с полиэтиленовым покрытием поверх пенополиуретана можно укладывать в грунт без всякой дополнительной изоляции и защитного короба;

* Вандализм и кража теплоизоляции стали практически невозможны;

* Коррозия трубы под непроницаемой для воды оболочкой замедляется на десятки процентов.

Труба стальная ППУ — это обыкновенная стальная труба для отопления или водопровода, которая на фазе изготовления покрыта теплоизолирующим слоем из вспененного полиуретана. В зависимости от того, предназначена труба для укладки в грунт или для прокладки по воздуху, выбирается внешнее защитное покрытие поверх слоя пенополиуретана.

Для грунта идеальный выбор — полиэтиленовый защитный слой (труба так и называется — ППУ ПЭ), для воздуха — старая добрая оцинковка. Та же, что применялась раньше. Такие трубы в прайс-листах помечаются сочетанием «ОЦ».

Производство труб ППУ не несет в себе никаких технических сложностей: обычная стальная труба окружается оболочкой из вспененного полиуретана (известного, кстати, строителям в качестве обыкновенной монтажной пены) и затем защищается внешним слоем из полиэтилена или оцинковки.

Технология, по которой производятся ПЭ трубы ППУ, в общих чертах такова:

* Экструзией (выдавливанием подогретого полиэтилена из резервуара через пресс-форму) изготавливается внешняя оболочка, в которую помещается стальная труба.

* Пространство между ними заполняется вспененным полимером, который быстро застывает при контакте с воздухом.

Монтаж труб ППУ включает следующие основные этапы:

- * Труба зачищается от изоляции на расстояние до 300 мм от каждого края;
- * Выполняется сварное соединение, которое проверяется на прочность переносным дефектоскопом;
- * На трубу надевается термоусадочная муфта;
- * Полость под ней заполняется вспененным полимером (монтажной пеной), после чего муфта нагревается и осаживается по месту, обеспечивая герметичность внешней оболочки.

Строительство надежных и экономичных теплосетей является основой обеспечения эффективного теплоснабжения любой страны. В среднем в России потери тепла в тепловых сетях составляют более 40%, порядка 30 % сетей находятся в аварийном и близком к аварийному состоянию, что позволяет говорить о неудовлетворительном состоянии теплосетей Российской Федерации. Под экономичностью тепловых сетей предполагается низкий расход средств на строительство, монтаж и эксплуатацию, а также минимальные теплотери в трубопроводах. Опыт использования трубопроводов, смонтированных из труб в пенополиуретановой изоляции (ППУ), и их технические характеристики позволили выявить множество их достоинств и преимуществ.

Так, расчеты и практический опыт показывает, что строительство сетей методом бесканальной прокладки (именно так происходит установка труб ППУ) осуществляется в 3-4 раза быстрее, нежели строительство методом канальной прокладки при практически равных затратах. Уменьшение сроков установки стало возможным при использовании элементов заводской готовности.

Помимо этого, трубы, изолированные пенополиуретаном, имеют гораздо больший срок эксплуатации. Трубопроводы при канальной прокладке служат около 12-13 лет, в то время как срок их службы при бесканальной прокладке превышает 30 лет.

За весь период эксплуатации качественные трубы в ППУ изоляции практически не нуждаются в капитальном ремонте, за исключением возникновения системных и посторонних повреждений. Причинами возникновения системных повреждений могут являться недостаточно высокое качество компонентов системы, а так же непрофессионально выполненные монтажные работы (например, некачественная изоляция стыков). Посторонние повреждения могут быть вызваны механическими повреждениями труб и элементов системы оперативного дистанционного контроля.

Для сравнения, за время эксплуатации труб ППУ трубам канальной прокладки в минераловатной изоляции непременно потребуется капитальный ремонт, на который уйдет около 60% от стоимости изначального строительства, а учитывая затраты на эксплуатацию и текущий ремонт таких труб, их использование становится нерациональным и добавляет еще один плюс трубам в ППУ изоляции.

Трубы, теплоизолированные пенополиуретаном (ППУ), используются в нашей стране более 15 лет. К сожалению, применение труб в ППУ изоляции затрагивает далеко не все регионы России. Активное применение трубы ППУ нашли в Москве и Московской области, Санкт-Петербурге и прочих административных центрах и крупных городах страны. Таким образом, трубопроводы из труб в ППУ изоляции составляют менее 5% всей системы теплопроводов России, что явно не способствует повышению энергетической эффективности страны в целом. Для достижения целей, соответствующих стратегии энергетического развития Российской Федерации, необходимо внедрить трубы ППУ повсеместно, на всей территории страны.

Потери тепла в трубах данной конструкции минимальны. Трубы в ППУ изоляции практически не подвержены действию блуждающих токов, значит, и внешней коррозии. Сама конструкция «труба в трубе» позволяет полностью исключить наружную коррозию трубопровода.

Есть специалисты оппонировать широкому внедрению данной технологии на практике. Основная причина этому чаще всего кроется в низком качестве конкретной теплоизолированной трубной продукции, выпускаемой малыми предприятиями, нарушающими требования ГОСТ 30732-2006 (что было достаточно частым явлением в первые годы освоения данной технологии), а также откровенно низким качеством стальных труб для потребностей сферы ЖКХ, то есть применение труб, бывших в употреблении.

В числе очевидных проблем в первые годы внедрения данной технологии можно назвать также следующие:

- достаточно часто не монтировалась система ОДК;

- стыки при бесканальной прокладке изолировались скорлупами и термолентой вместо заливки пенополиуретана и применения термоусадочных муфт;

- применялись компоненты ППУ низкого качества или в неправильной дозировке, что отразилось на низкой теплостойкости полимерного теплоизолятора ППУ, не выдерживающего рабочую температуру в 130 °С (требование ГОСТ 30732) и ряд других проблем.

Однако, несмотря на имеющиеся проблемы, следует подчеркнуть, что в целом качество ППУ изолированной трубной продукции ежегодно растет. Действующие производства оснащаются новым более эффективным оборудованием. Развивается внутренний рынок.

4. ИНВЕСТИЦИИ В ПРОЕКТЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Энергетическая отрасль является одним из главных элементов экономики нашей страны. Во все времена именно развитие энергетики имело первостепенное значение. Именно такой подход позволил отрасли выстоять и работать с минимальными финансовыми потерями в кризисные для страны периоды. Следует отметить, что любая экономическая отрасль не может просто стоять на месте, она должна развиваться, для улучшения результатов и дальнейшей работы постоянно требуется приток капитала.

Существовавшая ранее плановая система экономики позволяла осуществлять крупные финансовые вливания в отрасль энергетики. Это позволяло своевременно модернизировать отрасль и постоянно увеличивать мощности производства. В настоящее время, когда значительная часть энергетического комплекса нашей страны не может рассчитывать на субсидирование из бюджета государства, инвестиции в энергетику становятся особенно актуальными, поскольку:

1. Практически во всех странах, особенно в государствах с неустойчивым экономическим положением, энергетический комплекс существует благодаря инвестированию.

2. Первоочередное значение в инвестировании отдается энергетической отрасли потому, что для любой страны именно она является основой, обеспечивающей стабильное состояние экономики и жизнедеятельность, промышленности (всей без исключения находящейся в стране) и производства.

3. Сбой, недостаток финансирования или неустойчивое положение энергетического комплекса могут в малые сроки повергнуть страну просто в хаос (это касается вообще любого государства). [4]

Теплоснабжение в России – одна из самых недофинансированных отраслей. Система теплоснабжения находится в плачевном состоянии и требует срочных и масштабных инвестиций, но на данный момент законодательство и тарифная политика не

позволяют гарантировать возврат вложенных средств.

Инвестиции — «долгосрочные вложения» государственного или частного капитала в собственной стране или за рубежом с целью получения дохода в предприятия разных отраслей, предпринимательские проекты, социально-экономические программы, инновационные проекты.[5]

Решить проблемы привлечения инвестиций в целях создания энергоэффективных систем при наличии твердой законодательной базы можно, используя механизмы государственно-частного партнерства (ГЧП).

5. КОНЦЕССИОННЫЕ СОГЛАШЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРОГРАММ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Одним из вариантов привлечения дополнительных средств в развитие энергетики является государственно-частное партнерство (ГЧП). В результате анализа распространенных в России форм ГЧП, при помощи которых возможно провести меры, направленные на энергосбережение и повышение энергетической эффективности, было выявлено, что выходом из сложившейся в отрасли неблагоприятной ситуации могут послужить концессионные соглашения, являющиеся наиболее комплексной формой ГЧП, способные повысить эффективность управления государственным имуществом, привлечь частные инвестиции в ТЭК за счет возможности разделения рисков, предоставления государством платы концедента, гарантий и льгот, а также за счет долгосрочного характера отношений, позволяющего проводить стратегическое планирование деятельности.

Под концессией или концессионным соглашением (КС) принято понимать такую систему государственно-частных взаимоотношений, при которой происходит привлечение частного сектора в управление государственным или муниципальным имуществом с целью повышения эффективности управления, повышения качества предоставляемых товаров и услуг на взаимовыгодных условиях. КС представляет собой договор о передаче в пользование на возвратной основе на определенный срок (или без указания срока) совокупности исключительных прав, являющихся собственностью правообладателя. Концессия носит временный характер, создаваясь, как правило, для решения определенной задачи за определенный период времени. По КС концессионер обязуется создать и (или) реконструировать за собственный счет предоставленное ему во временное пользование на определенный срок имущество, собственником которого является концедент, а также использовать объект КС [6, 7, 8].

КС применялись в различные исторические периоды, практика их применения исчисляется десятками веков. Россия относится к числу стран, имею-

щих богатый исторический опыт применения концессий в различных сферах и отраслях экономики. В период с 1921 по 1929 г. СССР являлся абсолютным лидером по количеству заключенных концессионных договоров, но в 1937 г. по политическим мотивам масштабная концессионная программа была прекращена. И только спустя 68 лет, основываясь на успешном опыте реализации концессионных соглашений за границей, в 2005 году в России был принят закон «О концессионных соглашениях» [6, 9, 10]. Он выступает регулятором взаимоотношений, возникающих при разработке, заключении, изменении, исполнении и прекращении действия концессионных соглашений, а также определяет объекты, стороны, сроки действия соглашения, плату, условия, гарантии прав, особенности передачи некоторых видов имущества в концессию, определяет основные права и обязанности, которые должны быть обязательно включены в заключаемое концессионное соглашение, порядок заключения концессионного соглашения [7, 11, 12].

С каждым годом, по мере совершенствования законодательной базы в области концессионных соглашений, число заключаемых концессий постепенно растет. По данным Минэкономразвития, на начало 2020 года насчитывалось около 3100 КС. Так же сообщается, что большинство КС заключено именно в коммунально-энергетической сфере (90%). [13]

6. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕССИОННОГО СОГЛАШЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ТАРИФА

По опыту применения ППУ изоляции выявлен ряд преимуществ.

Применение теплосетей с ППУ изоляцией позволяет:

- увеличить срок службы теплотрасс до 30–40 лет;
- снизить тепловые потери при транспортировке до 2%;
- существенно сократить расход топлива и электроэнергии: при диаметре труб 1020 мм – 0,106% на 1 км сетей; при диаметре труб 530 мм – 0,217% на 1 км сетей; при диаметре труб 219 мм – 0,08 % на 1 км сетей;
- обеспечить падение температуры соответственно: при 1020 мм – 0,05°C/км; при 530 мм – 0,12°C/км; при 219 мм – 0,46°C/ км;
- снизить капитальные затраты на 15–20%;
- снизить эксплуатационные затраты в 9 раз;
- снизить ремонтные затраты в 3 раза;
- уменьшить время прокладки теплотрассы в 3–4 раза;
- исключить аварийность теплотрасс, благодаря обязательной установке системы оперативного дистанционного контроля за увлажнением тепловой изоляции (СОДК). [14]

Поэтому в качестве примера расчета влияния концессионного соглашения на тариф рассмотрен

вариант модернизации тепловых сетей, который заключается в замене трубопровода по всей длине на трубопровод с ППУ изоляцией.

Рассматриваемая котельная и принадлежащий ей трубопровод имеют следующие параметры, необходимые для расчета:

- длина трубопровода 5,168 км;
- выработано тепловой энергии 31044,25 Гкал/год;
- отпуск тепловой энергии потребителям составляет 28285,14 Гкал/год;
- потери в трубопроводе достигают 7,6%;
- расход тепловой энергии на собственные нужды котельной составляют 439,61 Гкал/год.

При описанных выше параметрах размер необходимой валовой выручки (НВВ) котельной на текущий момент равен 50197,04 тыс. руб. и действующий тариф равен 1774,68 руб./Гкал.

Реализация предлагаемой замены трубопровода позволит сократить тепловые потери в сети до 2%, а также сократить эксплуатационные затраты и затраты на ремонт в 9 и 3 раза соответственно.

Необходимый объем производства с учетом новой величины потерь составит 29302 Гкал/год.

По прайс-листу компании ООО «СКТК», замена одного метра трубы на трубу с ППУ изоляцией стоит 4423 руб. [15]. Значит капитальные затраты на модернизацию равны:

$$4423 \text{ руб.} \cdot 5168 = 22\,858\,064 \text{ руб.} \quad (1)$$

Срок службы труб с ППУ изоляцией 30 лет, а значит, при линейном способе начисления амортизации амортизационные отчисления в год можно определить следующим образом:

$$22\,858\,064 \text{ руб.} / 30 \text{ лет} = 761\,935,4667 \text{ руб./год}$$

Таким образом, получается следующее изменение затрат в структуре себестоимости тепловой энергии:

- 1) затраты на топливо снижаются благодаря уменьшению тепловых потерь в трубопроводе, а значит снижению объема производства тепловой энергии при неизменном объеме потребления;
- 2) амортизационные отчисления увеличиваются за счет введения нового оборудования.
- 3) эксплуатационные затраты и затраты на ремонт снижаются благодаря новой технологии, направленной на уменьшение данных статей затрат.

Так как имеется смета затрат по всей котельной в целом и сумма затрат в структуре себестоимости тепловой энергии, относящихся к трубопроводу в данных затратах, неизвестна, то проводится несколько расчетов при разных долях затрат, относящихся на эксплуатацию трубопровода, меняя долю от 0 до 50% с шагом 5%.

В таблице 1 представлены результаты расчета НВВ и величины тарифа после реализации концессионного соглашения в целях замены трубопровода на трубы с ППУ изоляцией в зависимости от доли эксплуатационных затрат и затрат на ремонт, приходящихся на трубопровод, в общей смете затрат на производство и передачу тепловой энергии.

Таблица 1. Величина НВВ и тарифа после КС

Доля затрат на трубопровод	НВВ, тыс. руб.	Тариф, руб./Гкал
0	49543,5	1751,57
5	49436,11	1747,78
10	49328,72	1743,98
15	49221,33	1740,18
20	49113,94	1736,39
25	49006,55	1732,59
30	48899,16	1728,79
35	48791,77	1725
40	48684,38	1721,2
45	48576,99	1717,4
50	48469,6	1713,61

На рисунке 1 изображена потенциальная разница в тарифах между текущей величиной и величиной после осуществления КС.

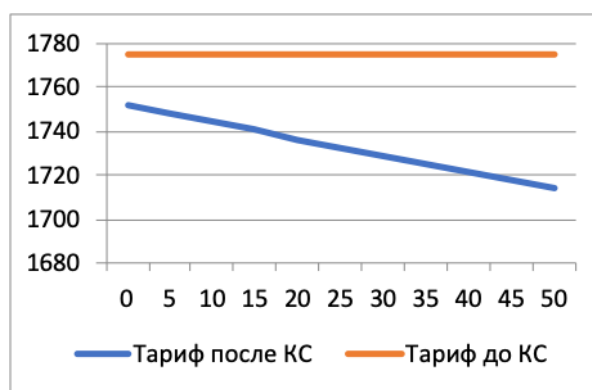


Рис. 1. Влияние КС на величину тарифа

Из расчета и графика видно, что модернизация эффективна, позволяет уменьшить величину тарифа на тепловую энергию при увеличении надежности теплоснабжения потребителей, повысив энергоэффективность работы котельной.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от устаревших способов прокладки теплотрасс, технология применения трубопроводов в ППУ изоляции позволяет существенно снизить затраты, повысить качество и срок службы коммунальных трубопроводных систем. Эта технология помогла бы частично выйти из кризиса водопроводно-канализационного хозяйства. Конечно, плохое состояние трубопровода — это не единственная причина высоких затрат на тепловую энергию, но потери в тепловых сетях варьируются от 30 до 40%, когда новые технологии позволят нам снизить этот показатель до 2% и увеличить срок безаварийной службы тепловых сетей до 30 и более лет.

Так как в энергетике остро стоит проблема финансирования проектов, привлечь инвестиции в отрасль поможет государственно-частное партнерство, в том числе концессионные соглашения как наиболее распространенный механизм взаимодействия государства и бизнеса.

Реализация в рамках концессионного соглашения проекта по замене тепловых сетей поможет не только повысить технические характеристики котельной и трубопровода, а также энергоэффективность его использования, но и позволит снизить тариф на тепловую энергию, что является достоинством данного проекта.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЖКХ — жилищно-коммунальное хозяйство;
ПГТ — поселок городского типа;
ЦТ — централизованное теплоснабжение;
ППУ — пенополиуретан;
ППУ ПЭ — пенополиуретановая труба с полиэтиленовым защитным слоем;
ОЦ — оцинковка;
ГЧП — государственно-частное партнерство;
ТЭК — топливно-энергетический комплекс;
КС — концессионное соглашение;
СОДК — система оперативного дистанционного контроля;
НВВ — необходимая валовая выручка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мельникова М.П.** Теплоснабжение России: состояние и перспективы развития: [Текст] – по материалам доклада на международном семинаре «Проблемы теплофикации в странах с переходной экономикой», 2019
2. **Данные** Федеральной службы Государственной Статистики (Росстата): [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.gks.ru>
3. **Официальный сайт** компании ООО ППК «Свердловский»: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ppu-izolyaciya.ru>
4. **Исмагулова Д.М., Айдаралиева А.А.** Понятие инвестиций и их роль в экономике – М.: Молодой ученый, 2011. – 83с.;
5. **«Просто инвестиции»:** [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://prostoinvesticii.com>
6. **Варнавский В.Г.** Государственно-частное партнерство: теория и практика [Текст] / В. Г. Варнавский [и др.]. – М.: Изд. дом Гос. ун-та – Высшей школы экономики, 2010. – 287 с.
7. **Федеральный закон** от 21 июля 2005 г. № 115 – ФЗ «О концессионных соглашениях» (ред. от 30.12.2015).
8. **Т.Г. Скурихина, Н.В. Пронина.** Концессия как форма финансовой муниципальной поддержки инвестиционной деятельности. Вестник Челябинского университета. 2010, №2(183). Экономика. Вып. 23. С. 65-69.
9. **Поляков И.И.** Концессионные соглашения в СССР в 1920 – 1927 годах // Вопросы современной юриспруденции: сб. ст. по матер. XXX междунар. науч.-практ. конф. № 10(30). – Новосибирск: СибАК, 2013.
10. **Практика** применения концессионных соглашений для развития региональной инфраструктуры [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://pppcenter.ru/assets/docs/ppp+.pdf>
11. **Титова А.М.** Выпускная квалификационная работа бакалавра «Оценка влияния концессионных соглашений на величину тарифа на тепло», ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2015 год
12. **Титова А.М.** Магистерская диссертация «Разработка модели оценки эффективности концессионных соглашений в теплоэнергетике», ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2017 год
13. **Официальный сайт** информационного агентства «РосБизнесКонсалтинг» [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.rbc.ru/economics/25/02/2020/5e4fcdf89a7947decf57ae33>
14. **Курьяков С.** Опыт применения трубопроводов в ППУ изоляции. Коммунальный комплекс России. 2011, № 7 (85). С. 36-41.
15. **Официальный сайт** компании ООО «Современные Комплексные Тепловые Коммуникации»: [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.sktk-ppu.ru

В.Ю. Шведова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия

УЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ТАРИФОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

АННОТАЦИЯ

В целях повышения энергетической эффективности российской экономики необходимо стимулировать организации, в том числе территориальные сетевые организации, осуществляющие передачу и распределение электрической энергии, к снижению объема потребления энергетических ресурсов. Действующая в России система установления тарифов на услуги по передаче электрической энергии содержит инструменты, стимулирующие только снижение потерь электрической энергии. При этом сетевые организации не заинтересованы в снижении потребления прочих энергетических ресурсов. В статье предложен метод расчета показателей энергетической эффективности территориальных сетевых организаций и учета этих показателей при установлении тарифов на передачу электрической энергии методом долгосрочной индексации необходимой валовой выручки или методом сравнения аналогов. Применение предложенного в статье метода, в отличие от внедрения в России подходов, применяемых в других странах, не требует существенных капиталовложений, усложнения процедур принятия тарифных решений, роста трансакционных издержек или внесения серьезных изменений в существующие нормативные документы, регламентирующие деятельность по передаче электрической энергии.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальность проблем энергосбережения и повышения энергетической эффективности не вызывает сомнения. Как показано в [1], только благодаря сокращению потерь электрической энергии в системах передачи и распределения электрической энергии в 142 странах мира возможно сократить выбросы углекислого газа на 544 миллиона метрических тонн эквивалентов углекислого газа. Помимо этого, сетевые организации могут повышать энергетическую эффективность за счет сокращения потребления прочих энергетических ресурсов (тепловой энергии, газа, топлива и т.д.).

Согласно российскому законодательству, сетевые организации должны формировать программы энергосбережения и определять целевые показатели энергосбережения и повышения энергетической эффективности, достижение которых обеспечивается в результате реализации указанных программ, а также представлять в Министерство энергетики Российской Федерации информацию об энергосбережении

и о повышении энергетической эффективности, содержащую сведения о фактическом потреблении различных энергетических ресурсов.

Механизм регулирования цен на услуги территориальных сетевых организаций предусматривает компенсацию нормативных потерь электрической энергии. Покупка сверхнормативных потерь не включается в экономически обоснованные расходы организации, не компенсируется территориальным сетевым организациям из платы за передачу электрической энергии и, соответственно, является убытком, покрываемым территориальной сетевой организацией из прочих средств. Таким образом, территориальные сетевые организации заинтересованы в доведении фактических потерь до уровня нормативных. Проблемам оценки и снижения технических и коммерческих потерь посвящено много исследований [2-4].

Однако экономические стимулы к снижению потребляемых территориальными сетевыми организациями прочих энергетических ресурсов (тепловой энергии, газа, топлива и т.д.) в настоящее время отсутствуют. Несмотря на то, что тарифы на передачу электрической энергии устанавливаются на долгосрочный период, в течение которого сетевые организации имеют возможность использовать экономию от сокращения расходов по своему усмотрению, расходы на энергетические ресурсы редко превышают 4 % необходимой валовой выручки на передачу электрической энергии. Соответственно, снижение объема потребляемых территориальной сетевой организацией энергетических ресурсов даже на 10 % приводит к снижению суммарных расходов территориальной сетевой организации всего на 0.4 %. Учитывая, что энергосберегающие мероприятия, как правило, требуют дополнительных капиталовложений, экономия, получаемая территориальной сетевой организацией за счет снижения объема потребляемых энергетических ресурсов, оказывается несущественной и не является стимулом к повышению энергетической эффективности.

Однако следует отметить, что сегодня в России функционирует более 1600 территориальных сетевых организаций, и даже незначительная экономия энергетических ресурсов каждой из них приведет к существенной экономии энергетических ресурсов в

масштабах страны. Следовательно, необходимо внедрять инструменты, стимулирующие территориальные сетевые организации к сокращению потребления энергетических ресурсов.

Таким инструментом является учет показателей энергетической эффективности при установлении тарифов на передачу электрической энергии, предложенный в данной статье.

2. ПОДХОДЫ К СТИМУЛИРОВАНИЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Тарифы на передачу электрической энергии для сетевых организаций в большинстве стран мира определяются регулирующими органами исходя из величины экономически обоснованных расходов организаций, которые должны быть покрыты за счет выручки от передачи электрической энергии с учетом различных стимулов, позволяющих добиться тех или иных результатов деятельности (снижения издержек, повышения надежности и качества услуг и т.д.).

Подходы к стимулированию повышения энергетической эффективности территориальных сетевых организаций в различных странах мира подробно рассмотрены в [5]. К таким подходам относятся:

1) обязанность инвестировать определенную долю своих доходов в мероприятия, направленные на повышение энергетической эффективности (например, в Бразилии — 1%);

2) раздельный учет расходов на повышение энергетической эффективности (например, в Калифорнии, США):

- изначально в тарифы на электрическую энергию для конечных потребителей закладывается сверх стоимости электрической энергии 1% от стоимости электрической энергии за предыдущий месяц, и из этих «доплат» формируется денежный фонд на реализацию энергосберегающих мероприятий;

- планирование и оценка эффективности реализации мероприятий осуществляется с помощью специализированной информационной системы и контролируется регулирующим органом;

3) системы «белых сертификатов» (например, в Италии), которые выдаются за сокращение удельных расходов энергетических ресурсов и могут продаваться и покупаться на рынке [6].

Анализ данных подходов показывает, что их внедрение в российскую практику тарифообразования приведет к существенному росту транзакционных издержек в связи с необходимостью дополнительного обоснования и оценки энергосберегающих мероприятий регулирующими органами или разработки целой системы, позволяющей торговать «белыми сертификатами».

В настоящее время в Российской Федерации тарифы на передачу электрической энергии для территориальных сетевых организаций определяются либо

с применением метода доходности инвестированного капитала [7], либо методом долгосрочной индексации необходимой валовой выручки [8]. Во втором случае необходимая валовая выручка на содержание электрических сетей на год i (HBB_i) устанавливается регулирующими органами исходя из величины экономически обоснованных расходов (ЭОР) и корректировки необходимой валовой выручки сетевой организации с учетом надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг:

$$HBB_i = ЭОР + HBB_{i-2} \cdot КНК, \quad (1)$$

где $КНК$ — понижающий (повышающий) коэффициент, корректирующий необходимую валовую выручку сетевой организации с учетом надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг; HBB_{i-2} — необходимая валовая выручка на содержание электрических сетей, установленная на год $i-2$.

Для стимулирования реализации энергосберегающих мероприятий применяются энергосервисные контракты [9-10]. Сетевые организации имеют право заключать энергосервисные контракты со сторонними организациями, которые должны разрабатывать и помогать реализовывать энергосберегающие мероприятия, а оплату получают в зависимости от достигаемых результатов. На практике часто стоимость энергосервисных контрактов закладывается в тариф на передачу электрической энергии, а реальное достижение заявленных показателей не оценивается.

Из вышесказанного следует, что необходимо разработать инструмент, стимулирующий электросетевые организации снижать потребление энергетических ресурсов, внедрение которого в российскую практику не требовало бы существенных капиталовложений или внесения серьезных изменений в нормативные документы и не приводило бы к росту транзакционных издержек.

3. МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Приказом Минэнерго РФ от 30.06.2014 № 401 утвержден «Порядок представления информации об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности», согласно которому организации, осуществляющие регулируемые виды деятельности, в частности передачу электрической энергии, должны предоставлять информацию о динамике по годам объемов потребленных энергетических ресурсов (тепловой энергии, твердого и жидкого топлива, газа и т.д.) в натуральном и стоимостном выражении. Информация, предоставляемая в Минэнерго РФ согласно указанному порядку, которую предлагается использовать для расчета обобщенного показателя энергетической эффективности территориальных сетевых организаций, представлена в таблице 1.

Таблица 1. Информация, предоставляемая в Министерство энергетики РФ согласно Приказу Минэнерго РФ от 30.06.2014 № 401 и используемая для расчета обобщенного показателя эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий

Информация о потребленных энергетических ресурсах	Предшествующие отчетному периоду годы			Отчетный год $i-2$
	$i-5$	$i-4$	$i-3$	
Объем производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении Q	Q_{i-5}	Q_{i-4}	Q_{i-3}	Q_{i-2}
Объем j -го потребленного энергетического ресурса V_j	$V_{j,i-5}$	$V_{j,i-4}$	$V_{j,i-3}$	$V_{j,i-2}$
Стоимость j -го потребленного энергетического ресурса C_j	$C_{j,i-5}$	$C_{j,i-4}$	$C_{j,i-3}$	$C_{j,i-2}$
...				
Суммарная стоимость потребленных энергетических ресурсов $\sum_{j=1}^n C_j$				$\sum_{j=1}^n C_{j,i-2}$

Обобщенный показатель энергетической эффективности территориальной сетевой организации ПЭ должен учитывать эффективность реализованных энергосберегающих мероприятий, не связанных со снижением потерь в сетях передачи и распределения электрической энергии, и может быть рассчитан по формуле:

$$ПЭ = \sum_{j=1}^n (k_j R_j), \quad (2)$$

где j – номер наименования потребленного энергетического ресурса; n – общее количество наименований потребленных энергетических ресурсов; k_j – значимость j -го потребленного ресурса в суммарной стоимости потребленных энергетических ресурсов; R_j – уровень изменения потребления j -го ресурса.

Значимость j -го потребленного энергетического ресурса в суммарной стоимости потребленных энергетических ресурсов рассчитывается как отношение стоимости j -го потребленного ресурса за год $i-2$ $C_{j,i-2}$ к суммарной стоимости потребленных энергетических ресурсов:

$$k_j = \frac{C_{j,i-2}}{\sum_{j=1}^n C_{j,i-2}}. \quad (3)$$

Уровень изменения потребления j -го энергетического ресурса R_j принимается равным 1, если фактически сложившийся объем $V_{i,j-2}$ потребления j -го энергетического ресурса за последний прошедший год $i-2$, приведенный к объему Q_{i-2} производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за год $i-2$, существенно (более чем на 20%) снизился по сравнению со средним потреблением j -го энергетического ресурса за предыдущие годы (годы $i-3, i-4, i-5$), приведенным к среднему объему производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за соответствующие годы. То есть:

$$R_j = 1, \quad \text{если } 1 - \frac{V_{j,i-2} \cdot (Q_{i-3} + Q_{i-4} + Q_{i-5})}{Q_{i-2} \cdot (V_{j,i-3} + V_{j,i-4} + V_{j,i-5})} > 0.02. \quad (4)$$

Уровень изменения потребления j -го энергетического ресурса R_j принимается равным 0, если фактически сложившийся объем $V_{i,j-2}$ потребления j -го энергетического ресурса за последний прошедший год $i-2$, приведенный к объему Q_{i-2} производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за год $i-2$, не существенно (менее чем на 20%) снизился по сравнению со средним потреблением j -го энергетического ресурса за предыдущие годы (годы $i-3, i-4, i-5$), приведенным к среднему объему производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за соответствующие годы. То есть:

$$R_j = 0, \quad \text{если } 0 \leq 1 - \frac{V_{j,i-2} \cdot (Q_{i-3} + Q_{i-4} + Q_{i-5})}{Q_{i-2} \cdot (V_{j,i-3} + V_{j,i-4} + V_{j,i-5})} \leq 0.02. \quad (5)$$

Уровень изменения потребления j -го энергетического ресурса R_j принимается равным (-1) , если фактически сложившийся объем $V_{i,j-2}$ потребления j -го энергетического ресурса за последний прошедший год $i-2$, приведенный к объему Q_{i-2} производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за год $i-2$, увеличился по сравнению со средним потреблением j -го энергетического ресурса за предыдущие годы (годы $i-3, i-4, i-5$), приведенным к среднему объему производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за соответствующие годы. То есть:

$$R_j = -1, \quad \text{если } 1 - \frac{V_{j,i-2} \cdot (Q_{i-3} + Q_{i-4} + Q_{i-5})}{Q_{i-2} \cdot (V_{j,i-3} + V_{j,i-4} + V_{j,i-5})} < 0. \quad (6)$$

4. КОРРЕКТИРОВКА ВЕЛИЧИНЫ ТАРИФОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ СЕТЕВЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Индивидуальные тарифы на передачу электрической энергии по сетям территориальных сетевых организаций определяются исходя из величины установленной регулирующим органом необходимой валовой выручки, суммарной присоединенной (заявленной) мощности и объема сальдированного перетока электрической энергии между сетевыми организациями.

В целях стимулирования сбережения энергетических ресурсов территориальными сетевыми организациями в случае установления тарифов на передачу электрической энергии методом долгосрочной индексации необходимой валовой выручки, предлагается дополнить формулу расчета необходимой валовой выручки (1) слагаемым, корректирующим необходимую валовую выручку в зависимости от фактического потребления территориальными сетевыми организациями энергетических ресурсов (КЭ):

$$НВВ_i = ЭОР + НВВ_{i-2} \cdot КНК + НВВ_{i-2} \cdot КЭ. \quad (7)$$

Коэффициент энергетической эффективности (КЭ) — это понижающий (повышающий) коэффициент, корректирующий необходимую валовую выручку сетевой организации с учетом эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий, не связанных со снижением потерь в сетях передачи и распределения электрической энергии.

Данный коэффициент предлагается рассчитывать по формуле:

$$КЭ = k_{\max} \cdot ПЭ, \quad (8)$$

где k_{\max} — максимальный процент корректировки необходимой валовой выручки, производимой с учетом эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий; ПЭ — обобщенный (интегральный) показатель энергетической эффективности территориальной сетевой организации, рассчитанный по формуле (2).

Анализ расходов территориальных сетевых организаций центрального региона РФ показал, что расходы на энергетические ресурсы составляют от 0.4% до 5% необходимой валовой выручки на передачу электрической энергии. Величина необходимой валовой выручки закладывается в тарифы на передачу электрической энергии и, соответственно, ее изменение приведет к изменению тарифов.

Вопреки установившемуся мнению о том, что передача электрической энергии является естественно-монопольным видом деятельности и спрос на электрическую энергию неэластичен, исследование эластичности спроса на электрическую энергию со стороны населения и производственных потребителей [11-12] показывает, что при росте тарифа на электроэнергию на 1% электропотребление в долгосрочном плане снижается на 1–1.15%, причем снижение электропотребления населением составляет менее 0.5%, а производственными потребителями — 0.75-1.2% (из них 0.4-0.55% составляет снижение электроемкости производства, а 0.3-0.7% — снижение уровня эконо-

мической активности). Соответственно, максимальный процент корректировки необходимой валовой выручки, производимой с учетом эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий, должен устанавливаться исходя из желаемой модели поведения потребителей на основе анализа эластичности спроса на электрическую энергию в зависимости от целей государственной политики в сфере тарифного регулирования.

Применение предложенного в статье инструмента учета показателей энергетической эффективности территориальных сетевых организаций возможно также при переходе к регулированию тарифов на передачу электрической энергии методом сравнения аналогов [13]. В этом случае необходимая валовая выручка, покрывающая экономически обоснованные расходы (ЭОР в формуле (2)) может рассчитываться методом сравнения аналогов на основе внешних показателей, не подконтрольных организации, а результативность деятельности организаций, направленной на повышение надежности и качества услуг и снижение потребления энергетических ресурсов может учитываться в виде корректировок (формула (7)).

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ УЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ТАРИФОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Предложенный в статье инструмент учета показателей энергетической эффективности при установлении тарифов на передачу электрической энергии для территориальных сетевых организаций опирается на отчетные данные, предоставляемые территориальными сетевыми организациями в Министерство энергетики Российской Федерации. Таким образом, отсутствует необходимость в сборе дополнительной информации, проведении трудоемких исследований и создании новых баз данных. Однако следует отметить, что заполнение отчетных форм осуществляется «вручную» в бумажном или электронном виде. Соответственно, использование этих данных для расчетов возможно, но не гарантирует получения точного, достоверного результата.

В настоящее время осуществляется переход к цифровой экономике. Во всех сферах экономической деятельности, включая электроэнергетику, внедряются цифровые технологии, позволяющие собирать и анализировать данные автоматически, устанавливаются интеллектуальные приборы учета. Таким образом, информация об объеме потребления и расходы территориальных сетевых организаций на тепловую энергию и газ в обозримом будущем будет передаваться в регулирующие органы и обрабатываться автоматически. Закупка топлива и прочих ресурсов должна осуществляться через проведение конкурентных закупочных процедур в соответствии с федеральным законом от 18.07.2011 № 223-ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц». Информация о закупке размеща-

ется в единой информационной системе и, соответственно, может передаваться из базы данных о конкурентных закупках в базы данных регулирующих органов через систему межведомственного взаимодействия, которая сегодня активно разрабатывается.

Учитывая вышесказанное, расчет величины корректировки необходимой валовой выручки с учетом эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий, не связанных со снижением потерь в сетях передачи и распределения электрической энергии, сможет осуществляться в автоматическом режиме на основе точных и достоверных данных.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод расчета показателей энергетической эффективности территориальных сетевых организаций и их учета при установлении тарифов на передачу электрической энергии, предложенный в статье, создает стимулы к снижению объемов потребляемых территориальными сетевыми организациями энергетических ресурсов (тепловой энергии, газа, горюче-смазочных материалов и т.д.). При этом его внедрение в существующую систему тарифного регулирования не требует значительных капиталовложений, не приводит к росту транзакционных издержек и не усложняет существующие процедуры принятия тарифных решений.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

i — плановый период регулирования (год, на который устанавливаются тарифы на передачу электрической энергии);
НВВ — необходимая валовая выручка;
ЭОР — экономически обоснованные расходы;
КНК — понижающий (повышающий) коэффициент, корректирующий необходимую валовую выручку сетевой организации с учетом надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг;
КЭ — коэффициент энергетической эффективности;
 k_{\max} — максимальный процент корректировки необходимой валовой выручки, производимой с учетом эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий;
ПЭ — обобщенный (интегральный) показатель эффективности реализованных энергосберегающих мероприятий;
 j — номер наименования потребленного энергетического ресурса;
 n — общее количество наименований потребленных энергетических ресурсов;
 k_j — значимость j -го потребленного ресурса в суммарной стоимости потребленных энергетических ресурсов
 R_j — уровень изменения потребления j -го ресурса
 C_j — стоимость j -го потребленного ресурса
 $V_{j,i}$ — объем потребления j -го энергетического ресурса за год i ;

Q_i — объем производства основной продукции (работ, услуг) в стоимостном выражении за год i .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Surana K., Jordaan S.M.** The climate mitigation opportunity behind global power transmission and distribution. *Nat. Clim. Chang.* 9, 660–665 (2019).
2. **Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р.** Анализ потерь электроэнергии и разработка мероприятий по их снижению в городских распределительных электрических сетях 6–10/0,4 кВ // *Энергетик.* 2019. № 1. С. 31–34.
3. **Khazae A., Ghasempour M.** Distribution loss minimization: A case study in a commercial section in Mashhad // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013). Stockholm, 2013. Pp. 1–4.
4. **Шведов Г.В., Чоршанбиев С.Р.** Расчет и анализ технических потерь электроэнергии в городских распределительных электрических сетях 6–10/0,4 кВ г. Душанбе // *Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова.* 2017. № 4 (44). С. 316–323.
5. **Alvarez F., Rudnick H.** Impact of Energy Efficiency Incentives on Electricity Distribution Companies // *IEEE Transactions on Power Systems.* Volume 25, no. 4. Pp. 1865–1872, Nov. 2010.
6. **Franzò S., Frattini F., Cagno E., Trianni A.** A multi-stakeholder analysis of the economic efficiency of industrial energy efficiency policies: Empirical evidence from ten years of the Italian White Certificate Scheme // *Applied Energy,* Volume 240, 2019. Pp. 424–435.
7. **Приказ ФСТ России от 30.03.2012 № 228-э** «Об утверждении Методических указаний по регулированию тарифов с применением метода доходности инвестированного капитала».
8. **Приказ ФСТ России от 17.02.2012 № 98-э** «Об утверждении Методических указаний по расчету тарифов на услуги по передаче электрической энергии, устанавливаемых с применением метода долгосрочной индексации необходимой валовой выручки».
9. **Mourtzis D., Boli N., Alexopoulos K., Rózycki D.** A Framework of Energy Services: From Traditional Contracts to Product-Service System (PSS) // *Procedia CIRP,* Volume 69, 2018. Pp. 746–751.
10. **Sorrell S.** The economics of energy service contracts // *Energy Policy.* Volume 35, Issue 1, 2007. Pp. 507–521.
11. **Мишура А.В.** Оценка эластичности спроса на электроэнергию со стороны населения в России // *Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки.* 2011. Том 11, выпуск 2. С. 92–101.
12. **Мишура А.В.** Долгосрочная эластичность спроса на электроэнергию со стороны производственных потребителей в России // *Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки.* 2008. Том 8, выпуск 3. С. 14–24.
13. **Shvedova V.** Application of Benchmarking in Electric Power Distribution Tariff-Setting // 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russia, 2020. Pp. 1–4.

Д.Г. Шувалова, А.И. Королькова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ОЦЕНКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДПРОЦЕССАМИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОКОМПАНИЙ

АННОТАЦИЯ

Качественное управление бизнес-процессами является базовым фактором успеха в повышении эффективности энергопредприятий. В статье проанализированы теоретические подходы к реализации процессного подхода для системы энергетического менеджмента энергокомпании в разрезе управления одним бизнес-процессом, связанным с повышением энергоэффективности и энергосбережения на уровне главного энергетика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей, стоящей перед современными способами повышения эффективности энергокомпаний, можно назвать формирование эффективной системы управления предприятием, его бизнес-процессами и сферами деятельности предприятия. Производители, конкуренты, инвесторы, как участники рынка, контрагенты и партнеры, уделяют особое внимание вопросам оптимизации бизнес-процессов энергетической компании.

Одним из способов повышения энергоэффективности энергокомпаний может стать применение процессного подхода. Так как сотрудники компании в большинстве заинтересованы в выполнении отдельных функций, то важно сосредоточить внимание на цепочке операций, а не на отдельных функциях, так как эффективность компании в целом и эффективность отдельных бизнес-процессов взаимосвязаны.

Применение процессного подхода в управлении предполагает формализацию бизнес-процессов на энергетических предприятиях. Бизнес-процесс – это совокупность логически связанных действий, имеющих «вход», то есть использование ресурсов предприятия с целью переработки объекта, направленные на достижение «выхода», то есть достижение определенных измеримых результатов (целей организации, создания продукции, удовлетворения спроса потребителя и так далее).

2. БИЗНЕС-ПРОЦЕССЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В настоящее время довольно актуальна тема реинжиниринга и контроль бизнес-процессов, и она обусловлена продолжающейся эволюцией инструментов управления на предприятии, также значительным опережением теории и практики управления бизнес-процессов в Мире по сравнению с РФ, а также технологии, применяемые в менеджменте при управлении бизнес-процессами предприятий, не подразумевают увязку каждой функции бизнес-модели с показате-

лями финансово-хозяйственной деятельности предприятия, хотя на практике существует большое количество бизнес-моделей компаний.

За последние несколько лет предприятия нуждаются в совершенствовании своих бизнес-моделей, так как клиенты и покупатели требуют более лучшей товарной продукции.

В разные времена авторы научных исследований рассматривали трактовки бизнес-процессов под различными точками зрения. В результате можно выделить несколько особо ярких определений, описывающих бизнес-процесс под разными углами.

Лукиянов А.А. и Сафронова А.А. понимают, что бизнес-процесс – это взаимоувязанная совокупность материальных, информационных, инвестиционных потоков, проходящих через взаимодействующие подразделения предприятия и направленных на реализацию поставленной цели [2].

В работе Ойхмана Е.Г. и Попова Э.М. бизнес-процесс – это множество внутренних шагов (видов) деятельности, начинающихся с одного и более входов и заканчивающихся созданием продукции, необходимой клиенту и удовлетворяющей его по стоимости, долговечности, сервису и качеству [3].

Репин В.В. понимает под бизнес-процессом устойчивую, целенаправленную совокупность взаимосвязанных видов деятельности, которая по определенной технологии преобразует входы в выходы, представляющие ценность для потребителя (клиента) [1] [5].

В работе Кольцовой О.В. и Меньщикова В.И. представлены следующие определения входа, управления, выхода и ресурсов:

1. Вход – материал или информация, которая используется или преобразуется бизнес-процессом для получения результата (выхода). Допускается, что бизнес-процесс может не иметь входа.
2. Управление – правила, технологии, процедуры или стандарты, которыми руководствуется бизнес-процесс.
3. Выход – материал или информация, которая производится бизнес-процессом. Бизнес-процесс без результата не имеет смысла.
4. Ресурсы – персонал предприятия, оборудование, инструмент и т.д. [4].

Мы становимся больше на позицию Репина В.В.

Под бизнес-процессом понимаем совокупность логически связанных действий, имеющих «вход», то есть использование ресурсов предприятия с целью переработки объекта, направленные на достижение «выхода», то есть достижение определенных измеримых результатов (целей организации, создания

продукции, удовлетворения спроса потребителя и так далее).

Каждое предприятие – это тяжелая и очень сложная организация или социальная система, которая состоит из сочетания различных звеньев или структурных подразделений и связей между ними. Во всех этих подразделениях происходит большое количество бизнес-процессов, которые требуется контролировать и выполнять, но при этом потребляя на них на сколько это возможно меньше времени и ресурсов, и в тоже время извлекая из этого необходимый эффект и качество. Достижение этих целей возможно в том случае, если периодически проводится оценка и последующая оптимизация бизнес-процессов как в целом по организации, так и по отдельным ее структурным подразделениям.

В работе Кузнецова С.Ю. и Руденко И.В. представлена классификация бизнес-процессов [7]:

- 1) По отношению к клиентам бизнес-процессы делятся на два вида:
 - Внешние процессы – обеспечение результатов для внешних клиентов;
 - Внутренние процессы – обеспечение результатов для внутренних клиентов.
- 2) По уровню рассмотрения в подробном виде:
 - Бизнес-процессы верхнего уровня – детальное рассмотрение предприятия в целом;
 - Детальные бизнес-процессы – процессы, относящиеся к крупным подразделениям, а также к подразделениям и отделам;
 - Элементарные бизнес-процессы – выполнение операций и процессов на рабочих местах.
- 3) По видам деятельности:
 - Процессы планирования деятельности – планирование всех показателей эффективности предприятия и самой ее деятельности;
 - Процессы самой деятельности – непосредственно выполнение работы, особенностью которой является то, что данные процессы должны иметь входы ото всех предыдущих и остальных процессов;
 - Процессы регистрации – процессы, относящиеся к функции бухгалтерского учета, управленческого и производственного, то есть регистрация фактической информации по выполнению процесса;
 - Процессы по анализу и контролю – анализ и контроль по достижению плановых показателей;
 - Процессы принятия управленческих решений – оперативное, то есть принятие решений по отклонениям, и стратегическое управление, то есть изменение планов и стратегий развития.
- 4) По степени локализации:
 - Межфункциональные или сквозные процессы – заключается в координации подразделений предприятия;
 - Подпроцессы подразделений – заключается в оперативном управлении по функциям в подразделениях.
- 5) По управляющему воздействию:
 - Бизнес-процессы управления – заключаются в управлении деятельностью предприятия в целом и на уровне каждого из бизнес-процессов.
- 6) По уровню инновационности:

- Бизнес-процессы развития – заключаются в совершенствовании направлений деятельности предприятия на стадиях жизненного цикла.

Как видно по приведенной классификации, существует большое количество ежедневной рутинной операционной деятельности, которую следует четко прописывать и выполнять.

Бизнес-процессы также должны быть закреплены трудовым договором, должностными инструкциями, штатным расписанием и табелем рабочего времени.

Переход от документального закрепления бизнес-процессов, то есть грамотно сформированных организационных структур, матриц функциональной ответственности и должностных инструкций, к финансовым потокам и финансовой работе компании, позволит улучшить показатели эффективности хозяйственной деятельности компании, а также поможет грамотно распределять бюджет организации в соответствии с функционалом отделов и служб.

На сколько грамотно сформулирована организационная структура энергокомпании и как хорошо она работает, будут напрямую зависеть показатели энергоэффективности хозяйственной деятельности предприятия. Поэтому сначала отстраивается иерархия исполнения бизнес-функций документально, а потом она наполняется финансовыми потоками.

В чем же заключается процессный подход в управлении и чем он отличается от функционального подхода?

Функциональный подход заключается в том, что сотрудники заинтересованы в большей степени в выполнении отдельных своих функций, а не всего процесса в целом, что может привести к появлению противоречий в работе отдельных структурных подразделений или отдельных сотрудников, и, как следствие, снижению эффективности деятельности предприятия.

Процессный же подход, в свою очередь, заключается в том, что его главное отличие в выделении понятия «бизнес-процесс», как цепочки действий по достижению измеримого, конечного и конкретного результата, а также процессный подход в условиях глобализации экономики имеет большую эффективность, так как имеется широкое применение информационных технологий (ИТ) и информационного обеспечения (ИО).

На примере управления одним подпроцессом можно проследить применение процессного подхода в основе повышения энергоэффективности: на уровне главного энергетика заключаются технологические процессы, на уровне главного экономиста экономические и финансовые процессы.

При анализе работы отдела ремонтного обеспечения, где появилась необходимость в повышении энергоэффективности оборудования на станции ТЭЦ – турбины, необходимо выстроить процесс, в рамках реализации которого четко прописаны цели, ответственные за его реализацию исполнители и степень участия каждой из выше обозначенных должностных позиций. От качества документального сопровождения процесса зависит успех его реализации, поэтому должна быть прописана каждая функция, которую будет выполнять сотрудник для достижения конкретно поставленной цели – модернизация оборудования с целью улучшения показателей КПД,

повышения энергоэффективности и уменьшения затрат. Возможно привлечение таких инструментов, как энергосервисный контракт при модернизации оборудования. Надо отдельно обращать внимание на то, что за организацию и успешную реализацию процессов отвечают не только производственные линейные подразделения, но и функциональные службы. Например, служба главного экономиста просчитывает экономические показатели реализации проекта и составляет необходимый инвестиционный проект по замене/ремонту турбины, исполнение которого необходимо для соблюдения графика финансовых потоков. Обладая полным пакетом документов, полномочиями и бюджетом, главный энергетик прописывает все функции и механики для осуществления поставленной цели повышения энергоэффективности.

При этом далеко не все мероприятия должны носить характер инвестпроектов. К беззатратным (закрывать каждый день форточку) и условно-затратным (поставить новые лампочки) функциям будет относиться изменение должностных инструкций (введение дополнительной функции сотруднику на выполнение), и капиталоемкие затраты увеличивают энергоэффективность и уменьшают удельный расход. Также создается план, который проверяет главный экономист, потом все направляется в бухгалтерию или финансовый отдел на соглашение и выделение бюджета.

Если бизнес-процессы прописаны недостаточно четко, есть пересечение функциональных направлений, операции, за которые никто не отвечает или те функции, исполнители которых четко не зафиксированы, потоки запутываются. Может получиться так, что за одну и ту же функцию или процесс отвечают два-три человека, а может и больше. Данное обстоятельство не только делает эту функцию исключительно дорогой, но и не дает возможности её беспрепятственно выполнять. Следовательно, при исполнении должностных обязанностей сотрудники не могут договориться. Заработная плата выплачивается всем сотрудникам той или иной функции, однако дела компании будут «стоять на месте». Что из этого может произойти? Появляются лишние издержки, которых можно было бы избежать на этапе формирования бизнес-процессов.

Основными системами процессного управления являются такие системы как:

- Система управления проектами;
- Система управления рисками;
- Система менеджмента качества;
- Система управления по ключевым показателям успеха или эффективности, то есть Key Performance Indicator (KPI).

В настоящее время на энергопредприятиях множество неструктурированных процессов. Также они не все процессы поддаются полной автоматизации, достаточно обычных и привычных средств коммуникации.

Одним из основных показателей эффективного развития экономики России является повышение энергоэффективности и конкурентоспособности промышленных энергетических предприятий. Усло-

вия и темпы перехода к устойчивому экономическому развитию страны во многом определяются экономической эффективностью предприятий, входящих в российский топливно-энергетический комплекс (ТЭК).

Необходимо создавать системы мотиваций собственников хозяйствующих субъектов для повышения энергоэффективности компании и деятельности, заключающейся также в области повышения энергосбережения, чтобы реализовывать весь потенциал энергосбережения, выявленный в результате энергоаудита.

Однако, следует принять во внимание тот факт, что процесс повышения энергоэффективности и энергосбережения энергетического предприятия – это довольно затратный наукоемкий процесс, который требует значительных ресурсов, таких как финансовых, материальных, информационных и кадровых, для реализации и разработки наиболее эффективных методов организации управления бизнес-процессами, а также новых энергосберегающих технологий в части производства, передач и последующего использования энергии.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следовательно, чтобы радикально менять бизнес-процессы необходимо подняться до проектирования работ организации и наладить горизонтальные связи, а, чтобы это сделать нужно отстроить бизнес-процессы таким образом, чтобы был конкретный исполнитель понятной функции, существовали формальные уровни участия в данном процессе всех уровней ответственности от руководителя, принимающего решения и контролера, до исполнителя.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КПД – коэффициент полезного действия;
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
ТЭК – топливно-энергетический комплекс;
ИТ – информационные технологии;
ИО – информационное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Репин В.В.** Бизнес-процессы // Моделирование, внедрение, управление. Издательство Манн, Иванов и Фербер, 2012. 216 с.
2. **Лукьянов А.А., Сафронова А.А.** Бизнес-процессы как основа эффективности функционирования предприятия в условиях неполной информации // Экономика и бизнес. Научный журнал Транспортное дело России №6, 2012. С. 21-26.
3. **Ойхман Е.Г., Попов Э.М.** Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии. // Финансы и статистика, 1997. 333 с.
4. **Кольцова О.В., Меньщикова В.И.** Бизнес-процессы как основа процессного подхода в управлении // Вестник ТГУ, выпуск 5 (61) Гуманитарные науки. Экономика, 2008. С. 113-118.
5. **Репин В.В., Елиферов В.Г.** Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. Издательство Манн, Иванов и Фербер, 2004. 322 с.
6. **Кузнецов С.Ю., Руденко И.В.** УПРАВЛЕНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССАМИ (ВРМ) В СТРАТЕГИЧЕСКОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2015;(2). С. 92-98.



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

ТРУДЫ

*Десятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

Секция 8

*Энергосбережение в комплексе город-
ского хозяйства*

Н.А. Малахов, В.С. Глазов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

БАЗА ДАННЫХ ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ И ПРИМЕР ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОТТЕДЖА С ТЕРМОСИФОНАМИ

АННОТАЦИЯ

Статья содержит в себе пример создания базы данных с использованием системы управления базами данных MySQL при использовании программного обеспечения MySQL Workbench, а также использование данной базы данных, с помощью внешней программы, позволяющей работать с этой базой данных, для определения тепловых потерь коттеджа и расчета термосифонов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из крупнейших потребителей энергоресурсов в нашей стране является жилищно-коммунальное хозяйство. На вентиляцию, отопление, горячее водоснабжение и кондиционирование расходуется почти 20% топливно-энергетических ресурсов, что составляет почти 160 миллионов тонн условного топлива. Для снижения теплотерь и, как следствие, снижение потребления ресурсов люди создают высококачественные строительные и теплоизоляционные материалы, а также ищут новые способы получения и передачи тепла. Также важно определять фактическое теплотехническое состояние здания. Контроль за теплотехническим состоянием здания осуществляется по двум методам:

1. Контактный метод;
2. Бесконтактный метод.

Контактный метод является более сложным и затратным, так как требует для своей реализации установки сотен и даже тысяч датчиков, измеряющих температуру, поэтому, все чаще применяют бесконтактный метод определения распределения температур. Для бесконтактного метода используют тепловизоры и термографы.

Для определения тепловых потерь здания и потребления тепловой энергии системами отопления и вентиляции используют

1. Метод расчета отопительной и вентиляционной нагрузки по укрупненным показателям.
2. Метод расчета тепловых потерь по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением N 1)» и СП 23-101-2004 "Проектирование тепловой защиты зданий".

3. Тепловизионный способ определения тепловых потерь ограждающих конструкций зданий и сооружений по МДС 23-1.2007 "Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионных технологий", ВСН 43-96 "теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритных тепловизоров" и ГОСТ 26629-85 "Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций".

В каждой из методик есть как плюсы, так и минусы. Основной недостаток первых двух методик заключается в том, что расчет делается на проектирующиеся или строящиеся здания, и трудно узнать реальную тепловую мощность. Для расчета потерь в функционирующем здании лучше всего подходят расчетно-инструментальные тепловизионные методы, но и тут есть свои недостатки такие как: необходимость знать форму, ориентацию по сторонам света, геометрические размеры и информацию по строительным материалам. Все эти данные, по строительным материалам, могут находиться в различных документах и могут быть недостаточно полными. Поэтому создание единой базы данных по строительным материалам является актуальной задачей. Существующие базы данных не имеют температурных и влажностных зависимостей, а также являются платными. Данная база данных отличается тем, что имеет открытый код.

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

2.1. Обзор технологий, которые подходят для создания базы данных

В информационных технологиях существует понятие СУБД, что расшифровывается как система управления базами данных. Эта система управления представляет собой комплекс программно-языковых сред, которые позволяют создавать и управлять

базами данных. Системы управления условно делятся на:

1. Домашние, которые подходят для небольших баз данных, которые можно использовать в домашних условиях;
2. Полупрофессиональные, которые подходят в основном для малого бизнеса;
3. Профессиональные, которые подходят для любого бизнеса и могут создать базу данных любого размера.

К домашним системам управления можно отнести Microsoft Office Access, который имеет широкий спектр функций, такие как связанные запросы или связь с внешними базами данных и таблицами. Так же MS Access имеет встроенный язык visual basic, благодаря которому в MS Access можно писать приложения, которые будут работать с базами данных. Но база данных, созданная в этой среде будет иметь небольшие объемы данных и небольшое количество одновременно работающих в ней пользователей.

К полупрофессиональным системам управления базами данных можно отнести MySQL. Данная система является собственностью корпорации Oracle, которая получила права на нее после поглощения компании Sun Microsystem. Данное приложение распространяется, как под GNU General Public License, так и под собственной коммерческой лицензией, на выбор пользователя.

Система MySQL является решением для малых и средних приложений и чаще всего ее используют в качестве сервера, к которому обращаются локальные или удаленные пользователи. Кроме того, в дистрибутив входит библиотека внутреннего сервера, который позволяет использовать MySQL в автономных программах.

К профессиональным системам управления базами данных можно отнести систему Oracle Database, которая является первой в мире базой данных, разработанной специально для работы в сетях распределенных вычислений. Данная система предназначена для эффективного развертывания на различных типах оборудования, начиная с небольших серверов и заканчивая Oracle Enterprise Grid, мощных многопользовательских серверных систем.

Архитектура Oracle Database такова, что она может самостоятельно распределять нагрузку на систему, оптимизировать запросы, выявлять и прогнозировать ошибки, что упрощает работу с данной системой.

Для дальнейшей разработки базы данных будем использовать MySQL, так как она имеет возможность создания автономных программ и имеет свободное распространение.

2.2. Инфологическая модель базы данных

Для информационной системы теплофизических свойств строительных материалов выделены следующие сущности:

1. Material: сущность содержит данные о материале;
2. Kategoria: сущность хранящая в себе данные о категории материала;

3. Proizvoditel: сущность содержит данные о производителе;
4. TFS: сущность содержит данные по теплофизическим свойствам.

С учётом приведенных выше сущностей была построена инфологическая модель предметной области (см. рис. 1)

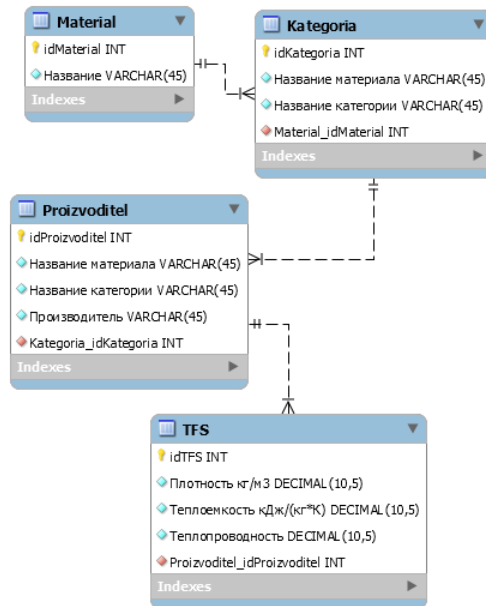


Рис. 1 - Инфологическая схема базы данных

2.3. Обоснование выбора модели данных

Для рассматриваемой базы данных была выбрана даталогическая модель. Под данной моделью понимается модель, отражающая логические взаимосвязи между элементами данных безотносительно их содержания.

Существует несколько типов даталогических моделей:

1. Сетевая модель;
2. Иерархическая модель;
3. Объектно-ориентированная модель;
4. Реляционная модель.

В нашем случае выбор пал на реляционную даталогическую модель, т.к. она способна обеспечить целостность данных при вводе, изменении или удалении записей, а также способна создать все виды связей, такие как:

1. Один к одному: связывающая одну строчку одной таблицы с одной строчкой другой;
2. Один ко многим: связывает одну строчку таблицы со многими строчками другой;
3. Многие ко многим: позволяет связать многие строчки одной таблицы со многими строчками другой.

Переход к реляционной модели возможен по следующему алгоритму:

1. Каждой сущности ставится в соответствие отношение;
2. Каждому атрибуту сущности ставится в соответствие определенный атрибут соответствующего отношения;
3. Первичный ключ сущности становится Primary Key (PK) соответствующего отношения, при

этом атрибуты, входящие в РК, обязательны для заполнения (NOT NULL);

4. В каждое отношение, соответствующее подчиненной сущности, добавляется набор атрибутов основной сущности, являющийся в ней первичным ключом;

5. По умолчанию все атрибуты, которые не входят в РК, не обязательны;

6. Для отображения категоризации сущности возможны несколько вариантов.

Пользуясь данным алгоритмом, опишем каждую сущность инфологической модели.

Материал

'idМатериал' int(11) NOT NULL,
'Название' varchar(45) DEFAULT NULL,
PRIMARY KEY ('idМатериал'),

Категория

'idКатегория' int(11) NOT NULL,
'Наименование производителя' varchar(45) DEFAULT NULL,
'Название материала' varchar(45) DEFAULT NULL,
PRIMARY KEY ('idКатегории'),

Производитель

'idПроизводитель' int(11) NOT NULL,
'наименование производителя' varchar(45) DEFAULT NULL,
'Название материала' varchar(45) DEFAULT NULL,
'Категория материала' varchar(45) DEFAULT NULL,
PRIMARY KEY ('idПроизводитель'),

ТФС

'idТФС' int(11) NOT NULL,
'Плотность' DECIMAL(4) DEFAULT NULL,
'Теплоемкость' DECIMAL(4) DEFAULT NULL,
'Теплопроводность' DECIMAL(4) DEFAULT NULL,
PRIMARY KEY ('idТФС'),

2.4. Реализация базы данных

На основе реляционной модели произведена программная реализация, в результате база данных стала содержать четыре таблицы:

1. Материал;
2. Категория;
3. Производитель
4. Теплофизические свойства

Таблица "Материал" содержит в себе:

1. ID Материала;
2. Название материала

ID Материала нужно для связи данной таблицы с таблицей "Категория"

Таблица "Категория" содержит в себе:

1. ID Категории;
2. Название материала;
3. Название категории;
4. ID Материала

ID Материала используется для связи данной таблицы с таблицей "Материал", а ID Категории используется для связи с таблицей "Производитель". Данная таблица нужна в том случае, если, например, кирпич может быть как облицовочным, так и строительным, данная таблица должна это учитывать.

Таблица "Производитель" содержит в себе:

1. ID Производителя;
2. Название материала;
3. Название категории;
4. Наименование производителя;
5. ID Категории.

ID Категории используется для связи с таблицей "Категория", а ID Производитель, для связи с таблицей "ТФС"

Таблица "ТФС" Содержит в себе:

1. ID ТФС
2. Плотность;
3. Коэффициент теплопроводности;
4. Теплоемкость;
5. ID Производителя

ID Производитель используется для связи с таблицей "Производитель".

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ПРИ РАСЧЕТЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕРМОСИФОНОВ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ МАНСАРДЫ

Для снижения потребления тепловой энергии и, как следствие, уменьшения потребления природных ресурсов, будет предпринята попытка использования термосифонов для отопления мансарды, за счет использования избытка теплоты, скопившегося под потолком первого этажа.

На рис. 2 и 3 приведен план коттеджа и его фасада, соответственно. В данном случае приведен пример дома, пол которого расположен на грунте.

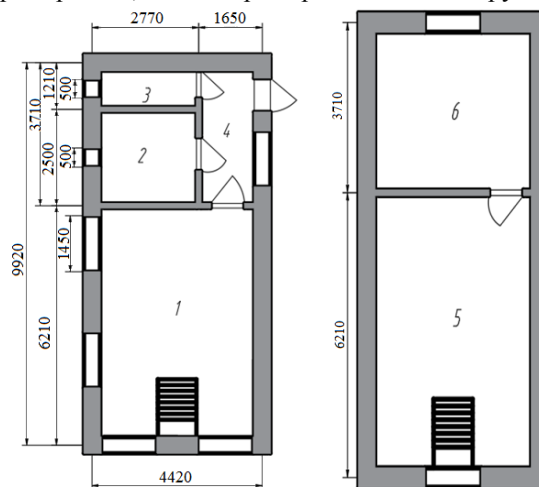


Рис. 2. План первого этажа коттеджа.

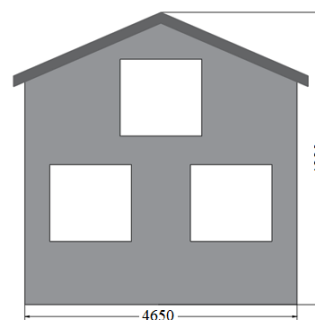


Рис. 3. Фасад коттеджа.

3.1. Расчет тепловых потерь

Для этого здания был произведен расчет тепловых потерь по следующему алгоритму [1]:

Алгоритм расчета:

Для начала требуется узнать термическое сопротивление ограждающих конструкций:

Для стен и крыши:

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{нв}}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{вв}}}$$

Для пола:

$$R_{\text{пол}} = R_{\text{зоны}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

После определения термического сопротивления ограждающих конструкций требуется сравнить его с требуемым сопротивлением по [2].

Потери через ограждающие конструкции:

$$Q_{\text{огр}} = \frac{F_{\text{огр}}}{R_{\text{огр}}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot n \cdot (1 + \beta)$$

Потери через пол:

$$Q_{\text{пол}} = \frac{F_{\text{зоны}}}{R_{\text{зоны}}} \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})$$

Суммарные потери теплоты:

$$Q_{\text{потери}} = \sum Q_{\text{потери}i}$$

Расчет тепловых потерь на нагревание инфильтрующего наружного воздуха.

Условное давление в лестничной клетке считается по формуле:

$$p_0 = 0.5 \cdot H \cdot g \cdot (\rho_{\text{воздн}} - \rho_{\text{воздв}}) + 0.25 \cdot V^2 \times \rho_{\text{воздн}} \cdot (c_{\text{н}} - c_3) \cdot k$$

Условное давление для этажей:

$$p_i = 0.5 \cdot (H - h_i) \cdot g \cdot (\rho_{\text{воздн}} - \rho_{\text{воздв}}) + 0.5 \times V^2 \cdot \rho_{\text{воздн}} \cdot (c_{\text{н}} - c_3) \cdot k$$

Условное давление в помещении выражается из уравнения баланса

$$0.21 \cdot (p_i - p_{xi})^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{F_{\text{ок}i}}{R_{\text{н}1}} = (p_{xi} - p_0)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{F_{\text{дв}}}{R_{\text{н}2}}$$

Разность давлений:

$$\Delta p = p_i - p_{xi}$$

Расход воздуха, проникающего через окна помещений:

$$G_i = 0.21 \cdot \Delta p_i^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{F_{\text{ок}}}{R_{\text{н}1}}$$

Воздухопроницаемость окон должна быть

$$G_i / F_{\text{ок}i} \leq 10$$

Количество теплоты необходимой для нагрева инфильтруемого воздуха:

$$Q_{\text{инф}} = 0.21 \cdot G_i \cdot \rho_{\text{воздн}} \cdot (t_{\text{в}i} - t_0)$$

Результаты сведем в таблицу

Таблица 1. Тепловые потери коттеджа

Комната (этаж)	Тепловые потери, Вт
КМ 1	1181.679
КМ 2	152.009
КМ 3	158.091
КМ 4	458.307
Первый этаж	1950.086
КМ5	556.727
КМ 6	420.979
Мансарда	977.958

3.2. Расчет термосифона

Расчет термосифона произведен по алгоритму, представленному в [3].

Для расчета испарителя:

Разность температур для начала кипения:

$$\Delta T = \frac{4 \cdot \sigma_{\text{ф}} \cdot (t_s + 273)}{r_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{фп}} \cdot d_{\text{кр}}}$$

Число Рейнольдса, с допущением, что скорость равна средней скорости парообразования

$$Re = w \cdot d_{\text{вн}} / \nu_{\text{ф}}$$

Тепловой поток, соответствующий началу кипения:

$$q_{\text{нк}} = \frac{\lambda_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{фп}} \cdot r_{\text{ф}} \cdot \Delta T^2}{4 \cdot \sigma_{\text{ф}} \cdot (t_s + 273) \cdot (1 + Re)^{5.1}}$$

Средний коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Лабунцова:

$$\bar{\alpha}_{\text{и}} = 0.075 \cdot (1 + 10 \cdot (\frac{\rho_{\text{фп}}}{\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{фп}}})^{2/3}) \cdot (\frac{\lambda_{\text{ф}}^2}{\sigma_{\text{ф}} \cdot \nu_{\text{ф}} \cdot (t_s + 273)})^{1/3} \cdot q^{2/3}$$

Уточненная температура стенки испарителя

$$t_{\text{стн}} = t_s + q / \bar{\alpha}_{\text{и}}$$

Для расчета конденсатора:

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{q \cdot h_{\text{к}}}{\mu_{\text{ф}} \cdot r_{\text{ф}}}$$

В зоне конденсации будет наблюдаться течение пленки конденсата. Чаще всего режим движения пленки оказывается ламинарным.

Определяем длину зоны конденсации, при которой число Рейнольдса достигнет критического значения, и начнется турбулентный режим течения:

$$2300 \cdot \frac{r_{\text{ф}} \cdot \mu_{\text{ф}}}{\lambda_{\text{ф}}} \cdot (\frac{\nu_{\text{ф}}^2 \cdot \rho_{\text{ф}}}{9.81 \cdot (\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{фп}})})^{\frac{1}{3}}$$

Средний коэффициент теплоотдачи определяется по формуле Нуссельта:

$$\bar{\alpha}_{\text{к}} = 0.943 \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ф}}^3 \cdot (\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{фп}}) \cdot r_{\text{ф}} \cdot g}{\nu_{\text{ф}} \cdot (t_s - t_{\text{стк}}) \cdot h_{\text{к}}}}$$

При конденсации происходит выделение неконденсирующихся газов, которые снижают коэффициент теплопередачи. Расчет количества неконденсирующихся газов весьма проблематичен, поэтому влияние неконденсирующихся газов можно условно принять как:

$$\bar{\alpha}_{\text{к}} = \frac{1}{3} \cdot \bar{\alpha}_{\text{к}}$$

Термическое сопротивление термосифона:

$$R_{\text{тс}} = \frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{и}}} + \frac{1}{\bar{\alpha}_{\text{к}}}$$

Результаты расчета термосифона сведены в таблицу:

Таблица 2. Расчет термосифона

$t_{1э}$	$t_{2э}$	$\bar{\alpha}_{\text{и}}$	$\bar{\alpha}_{\text{к}}$	k	Q
24	16	662.2	2315	4.283	0.067

3.3. Сравнение

Площадь термосифона составляет

$$F = 1.963 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Сравним, сколько тепла передается через такую же площадь путем теплопроводности через перекрытие.

Расчеты показывают, что количество тепла, переданного только за счет теплопроводности, через такую же площадь в перекрытии, составляет 0.042 Вт. Значит, термосифон может передавать тепла в 1.603 раз больше, чем теплопроводность.

Если известны тепловые потери мансарды, несложно определить количество термосифонов, необходимых для восстановления тепловых потерь.

Расчёты показывают, что для компенсации всех потерь необходимо 7823 термосифона. Это потребует закупки 714.3 кг фреона R-22, что будет стоить 469050 рублей.

Для расчета окупаемости необходимо знать экономию, которая достигается за счет отопления только первого этажа. Данная экономия составляет 6136.266 рублей (данные по тарифу для расчета отопления взяты по данным за март для Московской области, Городского округа Богородский, село Мамонтово).

Срок окупаемости такого метода отопления составляет примерно 77 лет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи была разработана база данных, которую можно получить на кафедре ТМПУ Московского энергетического института, и показано ее применение для проектирования коттеджа с термосифонами. Выполнен расчет теплопотерь, расчет

одного термосифона, расчет количества термосифонов, расчет отопления, расчет массы фреона, необходимого для заполнения всех испарителей термосифонов, произведено сравнение цен и в результате получен срок окупаемости данного способа отопления.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- R — термическое сопротивление, $\frac{\text{м}^{\circ}\text{С}}{\text{Вт}}$;
 p — давление, Н/м^2 ;
 α — коэффициент теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С}}$;
 δ — толщина, м;
 λ — коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{С}}$;
 Q — тепловая мощность, Вт;
 ρ — плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
 F — площадь, м^2 ;
 Δp — разность давлений, Н/м^2 ;
 ΔT — разность температур для начала кипения, $^{\circ}\text{С}$;
 Re — безразмерное число Рейнольдса;
 q — удельный тепловой поток, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;
 t — температура, $^{\circ}\text{С}$;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави А.Н, Махов Л.М. Отопление: Учебник для вузов. - М.: Издательство АСВ, 2008. -576с.: ил.
2. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.
3. Методы интенсификации теплообмена на макро- микро- и наномасштабах : учебное пособие для вузов по направлению "Ядерная энергетика и теплофизика" / Ю. А. Кузма-Кичта, Нац. исслед. ун-т "МЭИ" . – М. : Изд-во МЭИ, 2013 . – 124 с.

М.А. Разаков, В.А. Хохлов

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ГОРОДСКОЙ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассмотрены различные энергосберегающие мероприятия для систем поддержания микроклимата в городской канализационной насосной станции (КНС). Рассмотрены положительные и отрицательные особенности тепловых и электрических источников энергии. Приведены различия между набором потребителей в канализационной насосной станции и насосной станции системы холодного водоснабжения населенного пункта. В данной работе указаны результаты поиска всех возможных мероприятий по энергосбережению, которые можно использовать не только в канализационной насосной станции, но и в насосной станции системы водоснабжения населенных пунктов, а также в насосных станциях для мелиоративных нужд. В работе также рассматривается ряд отечественных методик по оценке энергопотребления здания и оценке влияния энергосберегающих мероприятий на общее энергопотребление здания.

1. ВВЕДЕНИЕ

Человечество в результате второй научно-технической революции в XX веке, начало задумываться об энергосбережении и экологических последствиях своей деятельности [1]. В связи с сокращением невозобновляемых энергетических ресурсов (природный газ, нефть, уголь и т.п.) жители Земли пришли к выводу, что нужно сокращать количество потребляемых ресурсов. В этом момент и появился термин "Энергосбережение". В постиндустриальных странах, где главенствует третичный сектор экономики - сфера услуг, в термин "энергосбережение" включают и рациональное сокращение экономических затрат при применении энергосберегающих технологий. В Российской Федерации энергосбережение уже отнесено к стратегическим задачам государства и одновременно является основным методом обеспечения энергетической безопасности [2]. Энергосберегающие мероприятия должны проводиться не только в зданиях гражданского назначения, но и на объектах коммунального хозяйства города. В данной работе будут рассмотрены различные способы снижения как теплового, так и общего энергопотребления здания канализационной насосной станции (КНС).

2. ПОТРЕБИТЕЛИ И ИСТОЧНИКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КНС

Канализационная насосная станция представляет собой сооружение как промышленного, так и гражданского назначения. Основную часть здания составляют машинный зал и грабельное отделение (промышленный блок). Они могут занимать до 75 % всего объема здания. Остальная часть (гражданский блок) состоит из офисных помещений, диспетчерской, душевых и помещений обеспечения технологического процесса КНС [3]. Такой состав помещений в данном сооружении не дает проектировщикам широкие возможности для проектирования как инженерных систем поддержания микроклимата, так и энергосберегающих мероприятий, а также других энергетическим систем.

В КНС потребителей можно разделить на две большие группы: потребители электрической энергии и потребители тепловой энергии. Каждую группу по режиму работы также можно разделить на активных и пассивных потребителей. К активным потребителям электрической энергии можно отнести насосное оборудование перекачивающее сточные воды и сопутствующие системы, без которых технологический процесс КНС не возможен, например, дренажная система. Другие активные потребители - это инженерные системы поддержания микроклимата здания, а также бытовые потребители. К пассивным системам следует отнести режимы ожидания различных систем безопасности. Например, системы аварийной и противодымной вентиляция. К активным потребителям тепловой энергии относятся также системы поддержания микроклимата, инженерные системы поддержания технологического процесса и бытовые потребители. К пассивным следует относить систему холодного водоснабжения, т.к. в проектировании принято, что температура холодной воды в трубопроводах равна 5 °С. Хотя и влияние данной системы не велико (около 2% [4]) её тоже следует учитывать. В таблице 1 для упрощения представлена данная классификация в табличном виде.

Таблица 1. Классификация потребителей тепловой и электрической энергии в КНС

Потребители электрической энергии	
Активные	Пассивные
Технологический процесс (Насосное оборудование и иные системы поддержания технологического процесса)	Система безопасности технологического процесса
Инженерные системы поддержания микроклимата здания (Системы: отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха)	
Бытовые нужды сооружения (Охранные системы, освещение, бытовые приборы, система холодного водоснабжения, система горячего водоснабжения)	Режим ожидания прочих систем безопасности (Аварийная вентиляция, аварийное отопление, противодымная вентиляция, система пожаротушения)
Потребители тепловой энергии	
Активные	Пассивные
Инженерные системы для поддержания технологического процесса (Совмещенная система вентиляции машинного зала и охлаждения электродвигателя насосного агрегата)	Система холодного водоснабжения
Инженерные системы для поддержания микроклимата остальной части здания (Системы: отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха)	
Бытовые нужды сооружения (Бытовые приборы системы горячего водоснабжения)	

Наиболее близким по составу потребителей сооружением является насосная станция (НС) системы холодного водоснабжения. Основными отличиями являются лишь перекачиваемая среда (холодная вода) и система очистки вентиляционных выбросов сооружения.

Основным источником электрической энергии как в КНС, так и в НС является городская электрическая сеть. Иногда используются собственная комбинированная мини-ТЭЦ или возобновляемые источники электрической энергии (ВИЭ). Наиболее распространенным ВИЭ является солнечная панель,

ветрогенератор. В источниках тепловой энергии для КНС и НС есть различия. В канализационной насосной станции в качестве альтернативного источника тепловой энергии может использоваться сточная вода с тепловым насосом. В насосной станции системы водоснабжения такого источника нет. Общими источниками тепловой энергии для КНС и НС являются городская тепловая сеть и собственная мини-ТЭЦ. В таблице 2 представлены источники тепловой и электрической энергии для КНС с их положительными и отрицательными особенностями работы.

Таблица 2. Классификация источников тепловой и электрической энергии в КНС

Тип источника энергии	Положительные особенности	Отрицательные особенности
Электрическая энергия		
1. Городская сеть	1. Быстрое устранение аварий на сети; 2. Иногда стоимость энергии ниже чем от прочих источников электрической энергии	1. Неравномерная работа сетей, вследствие, некорректной работы оборудования у абонентов; 2. Аварийность сетей; 3. Иногда высокая стоимость энергии
2. Мини-ТЭЦ	1. Независимость от внешних систем; 2. Стоимость выработанной энергии ниже чем от городских сетей	1. Зависимость от подводящих энергосистем (например, газовых); 2. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
3. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ):	1. Независимость от аварийности и неравномерной работы внешних систем; 2. Экологичность; 3. Низкая стоимость выработанной энергии.	1. Высокая стоимость оборудования; 2. Дополнительное размещение громоздкого оборудования; 3. Непредсказуемость погодных условий; 4. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
3.1 Солнечные модули		

3.2 Ветрогенераторы	1. Независимость от внешних систем; 2. Экологичность; 3. Низкая стоимость выработанной энергии.	1. Высокая стоимость оборудования; 2. Дополнительное размещение громоздкого оборудования; 3. Непредсказуемость погодных условий; 4. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
3.3 Прочие ВИЭ (в т.ч. топливные элементы)	1. Независимость от внешних систем; 2. Низкая стоимость выработанной энергии.	1. Высокая стоимость оборудования; 2. Дополнительное размещение громоздкого оборудования; 3. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
Тепловая энергия		
1. Городская тепловая сеть	1. Быстрое устранение аварий на сети; 2. Иногда стоимость энергии ниже чем от прочих источников электрической энергии	1. Неравномерная работа сетей, вследствие, некорректной работы оборудования у абонентов; 2. Аварийность сетей; 3. Иногда высокая стоимость энергии
2. Собственная Мини-ТЭЦ	1. Независимость от внешних систем; 2. Стоимость выработанной энергии ниже чем от городских сетей	1. Зависимость от подводящих энергосистем (например, газовых); 2. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
3. Возобновляемые источники энергии:		
3.1 Сточные воды с тепловым насосом	1. Независимость от внешних систем; 2. Низкая стоимость выработанной энергии.	1. Высокая стоимость оборудования; 2. Дополнительное размещение громоздкого оборудования; 3. Непредсказуемость условий работы станции; 4. Увеличение затрат на обслуживание оборудования
3.2 Прочие ВИЭ	1. Независимость от внешних систем; 2. Низкая стоимость выработанной энергии.	1. Высокая стоимость оборудования; 2. Дополнительное размещение громоздкого оборудования; 3. Непредсказуемость погодных условий; 4. Увеличение затрат на обслуживание оборудования

Примечание:

- На сооружениях КНС часто наблюдается использование ВИЭ (тепловые насосы) только для выработки тепловой энергии.

3. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ В КНС

Для составления списка энергосберегающих мероприятий, проектировщик обязан знать назначение здания и распределение проектного энергопотребления по инженерным системам. На данный момент как в России, так и в мире нет единой точной методики для подсчета энергопотребления здания, но некоторые ученые занимаются данной проблемой. В Российской Федерации этой проблемой занимаются В.И. Прохоров, Ю.А. Табунщиков. В ряде работ В.И. Прохорова описывается методика расчета удельной тепловой и электрической характеристики здания, в которые входят показатели энергопотребления инженерных систем поддержания микроклимата здания [5,6]. В работах Ю.А. Табунщикова исследовано

энергопотребление системы вентиляции с локальными рециркуляционными диффузорами, а также разработана собственная методика экспресс оценки эффективности энергосберегающего оборудования и т.п. [7,8].

Энергосберегающие мероприятия в канализационной насосной станции схожи с такого рода мероприятиями в насосных станциях для систем холодного водоснабжения населенного пункта. Наиболее эффективным способом снижения общих затрат энергии в высоковольтных станциях является снижение затрат энергии технологического процесса. В данном случае это использование частотных регуляторов на насосном оборудовании. В работе В.А. Хохлова приведен пример снижения расхода энергии на насосных станциях для мелиоративных нужд за счет

регулирования расхода воды [9]. В таблице 3 приведены различные мероприятия для снижения капитальных и эксплуатационных затрат с помощью различных энергосберегающих технологий. Данный

список полностью учитывает особенности строения КНС т.е. наличие гражданского и промышленного блоков.

Таблица 3. Классификация энергосберегающих мероприятий в КНС

№	Наименование мероприятия	Подробное описание	Итоги применения	Дополнительные особенности
1	Увеличение сопротивления теплопередачи наружных ограждающих конструкций	1. Установка новых низкоэмиссионных окон с ПВХ переплетами; 2. Увеличение толщины утеплителя у различных ограждающих конструкций (наружные стены; перекрытия пола или чердака); 3. Установка новых дополнительных ограждающих конструкций (НФС)	1. Снижение потребляемой энергии системы отопления здания; 2. Снижение мощности системы отопления; 3. Общее снижение эксплуатационных затрат на тепловую энергию	1. Увеличение капитальных затрат; 2. Иногда увеличение эксплуатационных затрат за счет замены материала утеплителя или иных элементов; 3. Снижение естественной инфильтрации воздуха за счет неплотностей в светопрозрачных конструкциях
2	Автоматизация инженерных систем поддержания микроклимата	1. Установка частотных регуляторов на различных системах; 2. Установка терморегуляторов на системе отопления	Снижение дополнительных затрат энергии из-за неравномерности технологического процесса	1. Иногда увеличение эксплуатационных затрат за счет замены составляющих системы АСУ; 2. Иногда увеличение эксплуатационных затрат электрической энергии за счет режима ожидания
3	Автоматизация иных инженерных систем	Установка частотных регуляторов на различных системах	Снижение дополнительных затрат энергии из-за неравномерности работы инженерной системы	1. Увеличение нагрузки на системы энергообеспечения; 2. Иногда увеличение эксплуатационных затрат электрической энергии за счет режима ожидания
4	Автоматизация технологического процесса	1. Установка плавного пуска насосных агрегатов; 2. Установка частотных регуляторов на насосных агрегатах; 3. Иные способы повышения к.п.д. насосных агрегатов	Снижение затрат энергии из-за неравномерности работы технологического процесса	1. Увеличение нагрузки на системы энергообеспечения; 2. Иногда увеличение эксплуатационных затрат электрической энергии за счет режима ожидания
5	Установка оборудования, работающего на ВИЭ	1. Установка тепловых насосов, работающих на низкопотенциальных источниках теплоты (холода) - сточные воды / воздух. 2. Установка солнечных панелей	Снижение потребляемой энергии здания	Увеличение капитальных затрат за счет установки дополнительного оборудования
6	Иные способы	Изменение материала трубопровода в инженерных системах	Снижение потребляемой энергии здания	1. До конца не исследовано влияние различных материалов на человека; 2. Увеличение капитальных затрат за счет перестройки систем
7	Установка Мини-ТЭЦ	Установка собственной ТГУ	1. Снижение дополнительных затрат энергии из-за длины трубопровода; 2. Независимость от внешних сетей	Увеличение капитальных затрат за счет установки дополнительного оборудования

8	Переход от электрического подогрева на водяное теплоснабжение	1. Установка водяной системы отопления; 2. Подогрев воды на нужды ГВС за счет тепловой сети.	Снижение эксплуатационных затрат на обеспечение тепловой энергией здания	Увеличение капитальных затрат за счет перестройки теплопотребляющих систем
9	Использование различных отходов от КНС в инженерных системах поддержания микроклимата	1. Использование теплоты от системы охлаждения электродвигателей; 2. Использование отходов от вентиляционных выбросов; 3. Использование отходов от грабельных решеток	Снижение эксплуатационных затрат на обеспечение тепловой энергией здания	Увеличение капитальных затрат за счет перестройки теплопотребляющих систем; Увеличение эксплуатационных затрат за счет установки дополнительного оборудования

Существует еще один способ снижения энергопотребления здания - замена одного вида топлива на другой [10]. Помимо номинального снижения расхода топлива, вследствие изменения теплофизических характеристик топлива (изменение теплоты сгорания топлива), возможен и экологический эффект, т.е. снижение эмиссии вредных выбросов. В работах В.В. Клименко и В.Г. Гагарина приведен пример расчета количества вредных выбросов от различных видов топлива [11,12].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приведен обширный круг мероприятий для снижения энергопотребления здания канализационной насосной станции. Некоторые мероприятия из данной работы также возможно использовать и для насосных станций систем водоснабжения населенных пунктов и насосных станций для мелиоративных нужд. Данный список представляет собой полный оконченный список мероприятий для снижения потребления как тепловой, так и электрической энергии современного развития техники и технологий на такого рода сооружениях.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КНС — сокращенное наименование канализационной насосной станции;
 ВИЭ — сокращенное наименование термина возобновляемые источники энергии;
 НФС — сокращенное наименование навесной фасадной системы;
 ПВХ — сокращенное наименование поливинилхлорида;
 ТЭЦ — сокращенное наименование теплоэлектроцентрали;
 ТГУ — сокращенное наименование теплогенерирующей установки;
 АСУ — сокращенное наименование термина автоматизированные системы управления;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусейнова Ж. О. Научно-техническая революция и проблемы окружающей среды // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Общественные науки, 2010. №6. С. 22-26;
2. Самарин О. Д., Бызов Н. И., Лушин К. И. Технико-экономическое обоснование энергосбережения в общественных зданиях за счёт теплоутилизации в системах вентиляции // Журнал С. О. К., 2018. №1. С. 100-102.
3. Прохоров В.И., Разаков М.А., Чернова Р.В. Актуальная методика расчета теплопотребления городской канализационной насосной станции // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2019. № 10 (142). С. 36-40;
4. Khokhlov V., Razakov M., Razakova R. Energy consumption of water supply systems utilities in building // В сборнике: JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 22027;
5. Prokhorov V. Method of systematic determination of specific thermal characteristics of building // В сборнике: MATEC Web of Conferences. 2016. С. 04068;
6. Prokhorov V.I. Calculation method of heat consumption for buildings life support systems // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. С. 022023;
7. Kapko D.V., Shkarpet V.E., Kochariante K.V., Tabunshchikov I.A., Brodach M.M. Calculation method of energy efficiency assessment of ventilation systems with local recirculation diffusers // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 20. С. 10257-10263;
8. Табушников Ю.А., Шилкин Н.В., Миллер Ю.В. Экспресс оценка эффективности энергосберегающего оборудования, технологий и мероприятий // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 6 (654). С. 57-63;
9. Khokhlov V.A., Khokhlov A.V., Titova J.O. Energy saving and safe operating modes of the large irrigative pumping stations // В книге: Handbook of Research on Renewable Energy and Electric Resources for Sustainable Rural Development. Сер. "Advances in Environmental Engineering and Green Technologies" Hershey, Pennsylvania, 2018. С. 176-203.
10. Разаков М.А., Рымаров А.Г., Чернова Р.В. Методы мониторинга изменения выбросов CO₂ с учетом применяемых видов топлива для крупных экономик мира // В сборнике: Труды Международной научной конференции молодых ученых и специалистов "Экология энергетики - 2017". 2017. С. 60-62;
11. Клименко В.В. Влияние климатических и географических условий на уровень потребления энергии // Доклады академии наук. 1994. Т. 339. № 3. С. 319-322;
12. Гагарин В. Г. Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы, 2010. №3. С. 8-16.

О.А. Чехранова

Национальный исследовательский университет
«МЭИ», Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КРАСНОЯРСК

АННОТАЦИЯ

В данной статье приведен анализ текущей ситуации теплоэнергетического комплекса города Красноярск. Разработаны мероприятия по совершенствованию источников теплоснабжения, определения перспективных источников и расчет их теоретического и практического теплового потенциала с учетом экономической целесообразности.

Проведен комплексный анализ и увязка нагрузок потребителей систем теплоснабжения Красноярска и источников, использующих вторичное и низкопотенциальное тепло.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для полноценного развития страны необходимо обеспечивать урбанизацию городов, которая характеризуется расширением и улучшением социальной сферы, строительных, наукоемких и промышленных отраслей, а также стратегически важным является развитие энергетики 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 электроэнергетических систем и теплоснабжения [2].

За все время существования теплоснабжения в России, система стала самой масштабной в мире, порядка 40% от мировой доли приходится на Российское централизованное производство тепла.

Централизованное теплоснабжение в России состоит из 55 тысяч локальных и 20 тысяч обслуживаемых систем и предприятий. За 2018 г. потребление тепловой энергии составило порядка 800 млн. Гкал, из них 5% приходится на горячее водоснабжение, 45% на отопление, и половину составляет промышленность. [3]

Таким образом, развитие теплоэнергетики является важной задачей для России. В Федеральном законе «О теплоснабжении» установлено, что развитие осуществляется через утвержденные схемы теплоснабжения и инвестиционные программы теплоснабжающих организаций. План развития должен включать программу: энергосбережение, экологичность, экономичность, также его необходимо разрабатывать индивидуально для каждого города и предприятия. Для осуществления энергосбережения и повышения уровня экологической безопасности теплоснабжения города необходимо при разработке программы развития теплоснабжения рассматривать поиск решений по использованию на предприятии новых более совершенных технологий. В частности, использование в системе водоснабжения низкопотенциального тепла в теплонасосных установках (ТНУ) и различных ВЭР, что, в свою очередь, даст экономическую выгоду. Помимо этого, необходимо рассматривать использование энергии городом от других источников, например, внедрение возобновляемых источников энергии, наличие большого водоема дает возможность использования низкопотенциальной тепловой энергии воды.

Проведен анализ систем энергоснабжения города Красноярск, выявлены ключевые особенности, проблемы и тепловой потенциал. Красноярск - крупный промышленный город, имеющий большой потенциал для совершенствования теплоснабжения, для внедрения энергоэффективных технологий и ввода низкопотенциальных источников с практически нулевыми выбросами. Такими источниками, по мнению автора, являются крупная река Енисей, которая не замерзает круглый год, сбросное тепло от теплоэлектростанций и тепловые потери от крупного промышленного предприятия Красноярский алюминиевый завод (КрАз).

2. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ КРАСНОЯРСКА

2.1. Общие сведения

В городе Красноярск функционирует множество промышленных предприятий, которые в процессе производства теряют до 60% тепловой энергии. Из

них наиболее крупным является Красноярский алюминиевый завод. Несмотря на то, что теплоснабжение города осуществляется преимущественно от ТЭЦ, в городе присутствует большое количество котельных.

Общая площадь жилого фонда составляет 26 тыс. м². В среднем на одного жителя Красноярска приходится 20 м², что соответствует норме.

Экологическая обстановка Красноярска крайне тяжелая, ежемесячно фиксируются превышения ПДК атмосферного воздуха, порядка на 20%.

Основными источниками выбросов являются предприятия промышленного комплекса, теплоэнергетические предприятия и автотранспорт.

Из-за географического расположения Красноярск имеет перспективный низкопотенциальный источник - реку Енисей. Оценка целесообразности использования вод Енисея будет проведена в следующих разделах.

2.2. Источники низкопотенциального тепла

Основными источниками низкопотенциального тепла является крупная река Енисей, которая не замерзает весь год. Теоретический потенциал Енисея составляет 60-100 млн Гкал. Крупными источниками сбросного тепла являются Красноярские ТЭЦ. Ежегодно на ТЭЦ-1 и на ТЭЦ-2 сбрасывается порядка 4 млн Гкал, а на ТЭЦ-3 порядка 1 млн Гкал. В городе расположено крупное промышленное предприятие - Красноярский алюминиевый завод, его ежегодное потребление составляет 13 млн Гкал, из них 8 млн Гкал сбрасывается в атмосферу.

Тепловые электростанции имеют большие ресурсы для использования низкопотенциального тепла в системе водооборотного охлаждения. На сегодняшний день технически возможно утилизировать до 50% низкопотенциального тепла, что составляет порядка 10% от количества отпускаемой теплоты. Для утилизации применяют теплонаносные установки.

В данной работе рассмотрены три варианта использования низкопотенциального тепла, представленные в таблице 1. В качестве низкопотенциального источника была выбрана охлаждающая вода технического водоснабжения. Выбор такого источника низкопотенциального тепла даст следующие преимущества:

- Сокращения сбросного тепла;
- Снижение температуры воды на входе в паровую турбину (ТП);
- Повышение экологической эффективности.

Стоит подчеркнуть, что необходимым условием для нормальной работы теплового насоса является температурный режим. Разница между температурой испарения t_i и температурой воды после конденсатора турбины должна быть не менее 5°C ($\Delta=5^\circ\text{C}$), t_i должна быть ниже на Δ . А разница между темпера-

турой конденсации рабочего вещества t_k и нагреваемой сетевой водой должна быть также не менее 5 °С, t_k должна быть выше на Δ .

Температурный уровень подпиточной воды на Красноярских ТЭЦ усредненно составляет 35°C, перед деаэратором, расход пропиточной воды в среднем составляет 2200 т/ч, что позволяет установить ТНУ большой мощности в диапазоне от 1 до 100 МВт. Таким образом, учитывая все выше сказанное, предполагается включение ТНУ в тепловую схему ТЭЦ после конденсаторов турбин.

Результаты расчета экономии топлива, относительно трех вариантов, показали, что наибольшую экономию даст второй вариант. Также внедрение ТНУ дает значительное сокращение УРУТ на станциях. Но при внедрении ТНУ увеличиваются затраты электроэнергии на собственные нужды. От тарифа на электроэнергию зависит срок окупаемости данного мероприятия, в среднем он составляет от 3-6 лет.

Самым мощным источником энергии является Енисей, и в условиях города наиболее эффективным источником могут стать теплонаносные установки, использующие теплоту речной воды. Тепловые насосы большой мощности распространены в Швеции и в Финляндии. В настоящее время производство отечественных парокомпрессионных тепловых насосов большой мощности осуществляется в г. Новосибирске, тепловая мощность достигает 3 МВт. Производство с центробежными компрессорами организовано в г. Казань, тепловой мощности порядка 11,5 МВт.

Для подогрева речной воды используется подогреватель, в котором греющим теплоносителем является обратная сетевая вода. При снижении температуры воды в реке, расход сетевой воды будет возрастать. Таким образом, теплопроизводительность теплонаносной установки будет зависеть от температуры воды в реке. Так, например, охлаждение воды от 15 до 2 градусов Цельсия, приводит к снижению теплопроизводительности на 68%.

Для снижения нагрузки в первой ступени компрессоров используется промежуточный сосуд, который осуществляет сепарацию. Во вторую ступень компрессора фреон поступает из сепаратора. Коэффициент трансформации зависит от температуры речной воды линейно. Чем выше температура, тем выше эффективность. Для исключения такой зависимости предусматривают схемы с предварительным подогревом воды, однако такой вариант решения имеет свой недостаток - увеличивается расход электроэнергии. Помимо представленного варианта, возможно рассматривать комбинированную выработку тепла и холода. Охлаждаемая вода подается в испаритель в летний период, и ТНУ производит холод для системы кондиционирования.

Таблица 1. Варианты использования ТНУ на ТЭЦ

Вариант	Пояснение
1. Использование ТНУ для дополнительного производства электрической энергии	Достигается за счет снижения нагрузок теплофикационных отборов паровых турбин. Отпуск теплоты от ТЭЦ и расход топлива остается без изменения
2. Увеличение отпуска теплоты от ТЭЦ	Суммарная электрическая нагрузка на ТЭЦ и суммарный расход топлива не меняется
3. Снижение расхода топлива	Суммарная выработка электроэнергии и отпуск тепла от ТЭЦ остается неизменным

Холодопроизводительность составляет от 9,5 до 10,1 МВт.

Срок окупаемости сильно зависит от коэффициента трансформации и тарифов на тепловую и электрическую энергию, поэтому варьируется от 6 до 15 лет.

Применяемый в тепловом насосе фреон не влияет на озоновый слой, но воздействует на парниковый эффект с GWP = 1340 по сравнению с CO₂. [4]

Еще одним, крупным источником является КрАз. Завод ежегодно производит более 1 млн тонн алюминия, производство которого высокоэнергоёмкое. Основным источником энергии является Красноярская ГЭС. Потребление энергии на производство алюминия составляет примерно 13,5 млн Гкал. Для минимизации потерь тепла и дальнейшего его использования, предполагается в процессе электролиза устанавливать воздушные теплообменные аппараты. Энергетический эффект от данных мероприятий составляет снижение потерь тепла более чем в 1,5 раза, которые составляют уже не 60%, а 40%.

3. УВЯЗКА ИСТОЧНИКОВ С СИСТЕМОЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА

Для повышения эффективности теплоснабжения необходимо модернизировать оборудование и использовать более эффективные методы получения энергии, например, получение тепла от низкопотенциальных источников. По классификации Е.Г. Гаши [1], Красноярск относится к 3 категории по удельному показателю энергопотребления, выше средних показателей 12 тт/чел. И по параметрам модели выделения приоритетов в энергоэффективном развитии региональных теплоснабжающих систем (ТС), Красноярск будет относиться к третьей группе, где модельное представление должно выглядеть согласно формуле:

$$\sum V^i < V \quad (1)$$

Перспективный объём V^i потребления ресурсов должен быть ниже текущего V . В приоритете группы должна быть комплексная модернизация всех энергоёмких производств, применение всех ресурсов и

использование энергоресурсов более высокого качества.

Проанализировав состояние котельных города, были определены котельные с самым высоким удельным расходом условного топлива (УРУТ), их планируется заменить на ТНУ-ТЭЦ. Это приведет к снижению негативного воздействия на окружающую среду, снижению удельной себестоимости производства тепловой энергии.

Также за счет ТНУ Енисей и КрАз планируется обеспечение тепловой энергией новой застройки. Данное мероприятие снизит негативное воздействие на окружающую среду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ систем теплоснабжения и экологической обстановки в городе Красноярск. Красноярск - крупный промышленный город, с множеством предприятий промышленного типа. В теплоснабжении города преобладает доля ТЭЦ. В городе большое количество неэффективных котельных, работающих с УРУТ больше 240 кг у.т./Гкал. Ежегодно в Красноярске фиксируется множество случаев превышения ПДК, что является показателем неблагоприятной экологической обстановки. Поскольку город Красноярск по удельному энергопотреблению относится к категории выше среднего, и энергопотребление составляет 10 тт/чел, стратегия развития системы теплоснабжения была выбрана из того, что будущий объём потребления ресурсов должен быть ниже существующего, это можно достичь, применяя более совершенные технологии и методы.

В работе были рассмотрены мероприятия с использованием низкопотенциального и вторичного тепла. Выявлены наиболее перспективные с точки зрения повышения энергоэффективности объекты. крупнейший источник низкопотенциального тепла река Енисей, теоретически рассчитанное производство тепловой энергии составляет 100 млн Гкал; ТЭЦ и Красноярский алюминиевый завод, которые также являются источниками низкопотенциального и вторичного тепла.

Таблица 2. Экономия топлива, экологическая эффективность использования ТНУ и ВЭР

Объект	Сокращение сжигания топлива, ΔВ тыс. т/год	Сокращение выбросов ΔW, %
ТЭЦ-ТНУ	145	4
КрАз	829	Выбросы от производства 20%, сокращение выбросов от ТЭЦ 25%
Енисей	400 в зависимости от мощности и количества ТНУ	68

Были проведены расчеты увязки новых более совершенных источников с городской системой теплоснабжения. Они показали, что на первом этапе наиболее перспективным мероприятием будет замена неэффективных котельных и перевод их тепловой нагрузки на ТЭЦ, с применением ТНУ. Это приведет к снижению выбросов от котельных, срок окупаемости такого мероприятия составляет 6 лет.

Вместе с этим, был проведен расчет по обеспечению тепловой энергией объектов нового строительства за счет новых источников: ТНУ, использующих низкопотенциальное тепло от Енисея и КрАз, использующего вторичное тепло. Расчеты показали, что использование ВЭР может закрыть потребность города в тепловой энергии в объеме 3 млн Гкал, и вместе с этим сократить вредные выбросы КрАз на 60%. Использование низкопотенциального тепла от Енисея является наиболее перспективным и выгодным как с точки зрения энергоэффективности, так с точки зрения улучшения экологической безопасности. Но существует ряд ограничений для внедрения таких технологий:

- в настоящее время в России нет производства ТНУ большой мощности;
- возникает потребность в строительстве хранилища для обеспечения бесперебойной работы;
- зависимость от тарифов на электроэнергию.

Расчеты показали, что срок окупаемости ТС сильно зависит от тарифов на электроэнергию. Так, при использовании электроэнергии от ТЭЦ срок окупаемости составляет 9 лет с учетом реконструкции теплосетей.

Таким образом, выбирая интеграцию источников в схему энергоснабжения города, необходимо ориентироваться на полученные эффекты от них. В таблице 2 представлены результаты расчетов экономии топлива и экологического эффекта от применения ТЭЦ-ТНУ, использования ВЭР на КрАз и использования низкопотенциальной теплоты вод Енисея. Сокращение расхода топлива за счет использования теплоты вод Енисея определялось относительно угольной котельной, сокращение расхода топлива на КрАз определялось сокращением расхода топлива на ТЭЦ с учетом снижения тепловой мощности КрАз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гашо Е.Г.** Разработка методологии совершенствования промышленных и коммунальных теплоэнергетических систем [Рукопись] : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.04 / Евгений Геннадьевич Гашо. - М., 2018. - 39 с. - Библиогр.: с. 36-392.
2. Энергетическая стратегия России на период 2035 [Электронный ресурс].- Режим доступа http://www.bigpowernews.ru/photos/0/0_Dyed1PNxWKh4jYgNJ7rfdXtgpk2vEt4r.pdf -(Дата обращения: 25.03.2020)
3. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации [Электронный ресурс].- Режим доступа <https://www.economy.gov.ru/material/file/d81b29821e3d3f5a8929c84d808de81d/energyefficiency2019.pdf> - (Дата обращения: 1.04.2020)
4. **Султангузин И.А., Потапова А.А.**, Высокотемпературные тепловые насосы большой мощности для теплоснабжения Журнал «Новости теплоснабжения» №10,2010.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПОТРЕБЛЕНИИ ЭНЕРГИИ

A.S. Zhumabekov, A.R. Baibassarova

THE ROLE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF MEAT AT NEGATIVE STORAGE TEMPERATURES IN THE CHOICE OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES.....9

Р.О. Алексеев, Т.С. Березина, Г.П. Власенко, А.Н. Сабанова, Е.Н. Сабанова, Т. Тепель

АНАЛИЗ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ СЕМЯН ДИКОРАСТУЩЕЙ ТРАВЫ..... 12

А.А. Арбатский, В.С. Глазов, С.И. Поляков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННИКОВ УТИЛИЗАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОС.....18

А.А. Арбатский, А.В. Ладовский, С.И. Поляков

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ..... 22

Д.В. Бекназарян, Г.Е. Каневец, К.В. Строгонов

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ.....25

Е.П. Валугева, В.С. Зюкин

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ РАЗВИВАЮЩЕМСЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ЛАМИНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ В КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ОБЛАСТИ.....32

Д.А. Долинин, Ву Си Ки, Давлатов Р.К.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК..... 37

А.И. Егорова, Г.П. Власенко, Н.С. Нечепуренко, А.В. Антипов, Д.Е. Попов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРНОЙ СУБЛИМАЦИОННОЙ СУШКИ И АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ..... 44

А.В. Катасонов, Е.В. Цепляева, М.В. Горелов

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АККУМУЛЯЦИИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПУТЁМ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ АККУМУЛЯТОРА..... 49

О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, Е.В. Гусев, А.А. Малов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОЛУЧЕННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ОСТАТКА ПИРОЛИЗА КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ..... 53

А.В. Коровяковский, С.К. Попов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СТЕН ВАРОЧНОГО БАССЕЙНА.....59

В.А. Петров, В.Ю. Чайкин, Б.А. Христенко, И.Д. Савицкий, И.А. Султангузин,

Е.А. Демидов, А.Н. Нечаев, А.В. Скоробатюк
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА..... 66

М.О. Пузин, Е.В. Цепляева, М.В. Горелов

СРАВНЕНИЕ ВАРИАНТОВ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗАГОРОДНОГО ДОМА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ.....73

М.С. Пурдин

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В АККУМУЛЯТОРАХ ТЕПЛОТЫ С МНОЖЕСТВОМ ФАЗ И СВОБОДНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ФАЗОВЫХ ГРАНИЦ..... 77

<i>М.С. Пурдин, Е.А. Павлова, А.Н. Николаева, Р.Э. Муртазин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОДНОФАЗНОМ АККУМУЛЯТОРЕ ТЕПЛОТЫ ПРИ КОЛЕБЛЮЩЕМСЯ ГРАНИЧНОМ УСЛОВИИ ПЕРВОГО РОДА.....	82
<i>Е.С. Рекуненко, А.Б. Гаряев</i> МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРЕБРЕННЫХ РАДИАТОРОВ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ.....	88
<i>П.С. Соколов, М.В. Козлова, А.В. Банников</i> О ПРИМЕНЕНИИ И РЕАЛИЗАЦИИ ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕСНЕНИЯ ДЛЯ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ МОРСКИХ И СОЛОНОВАТЫХ ВОД.....	93
<i>К.В. Строгонов, А.А. Здравов</i> ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВА.....	99
<i>И.В. Яковлев, Н.В. Авдокунин.</i> УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ..	104
<i>И.В. Яковлев, Д.В. Смоляков.</i> КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ В СИСТЕМАХ МИКРОКЛИМАТА ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ.....	110
Секция 2. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ЭНЕРГИИ	
<i>Е.Г. Гашио, Е.Ю. Каткова, Д.Е. Попов</i> РАЗРАБОТКА И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ.....	119
<i>А.С. Демиденко, Г.В. Шведов</i> СУТОЧНЫЕ ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ДОМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ.....	123
<i>С.А. Дронов, А.В. Федюхин, В.Э. Панарин, А.С. Черных, Ю.В. Яворовский, В.Г. Хромченков, А.В. Мартынов</i> РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГРП МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ ДГА В СРЕДЕ ASPEN HYSYS.....	128
<i>Я.А. Загороднев, Г.В. Шведов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЖИЛОГО ДОМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАЧНОСТИ.....	135
<i>Д.А. Кругликов, И.А. Султангузин,</i> РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ПОТОЛОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИПСОКАРТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ.....	138
<i>С.А. Куделина, Г.В. Шведов</i> АНАЛИЗ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ.....	142
<i>С.С. Маринина, Ю.В. Яворовский, И.А. Султангузин</i> СОЛНЕЧНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	146
<i>Т.А. Матухнов, О.Д. Матухнова, М.Ю. Юркина, Н.В. Хомченко</i> ОЦЕНКА ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ СОЛЕЙ ЖЕСТКОСТИ НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ГВС ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ.....	151
<i>О.С. Мусорина, Г.В. Шведов</i> АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10КВ.....	154

<i>Г.А. Парфенов, Г.В. Шведов</i> ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ НА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ КВАРТИРЫ.....	158
<i>Р.Р. Перепелица, К.Д.Сергеева</i> ЭЛЕМЕНТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЗДАНИЙ И ГОРОДОВ.....	163
<i>Е.Н. Сметанина, Ю.В. Яворовский</i> ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ РФ.....	170
<i>Б.А. Христенко, Д.А. Кругликов, В.Ю. Чайкин, В.А. Петров, И.А. Султангузин</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРА И ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМУ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ.....	173
<i>А.С. Щепотин, Г.В. Шведов, О.С. Мусорина</i> РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	180

Секция 3. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

<i>Д.Д. Голдобин, С.Н. Петин, А.В. Бурмакина</i> ОБЗОР ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ НА ТЭС ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ.....	189
<i>С.В. Захаров, И.Л. Байдаков</i> ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИК РАСЧЁТА КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ДИСПЕРСНО- КОЛЬЦЕВОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА.....	194
<i>С.В. Захаров, И.Л. Байдаков</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ С ЗАВИХРИТЕЛЯМИ.....	199
<i>В.О. Киндра, И.Б. Капланович, М.В. Смирнов, В.Ю. Наумов, А.С. Зонов</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЗАМКНУТОГО ЦИКЛА С КИСЛОРОДНЫМ СЖИГАНИЕМ ТОПЛИВА.....	206
<i>А.А. Коршикова, С.П. Печенкин, П. Н. Борисова</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НА ТЭЦ.....	213
<i>А.М. Латыпов</i> АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ СИСТЕМ ГИБРИДНОГО И СУХОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЭС И АКТУАЛЬНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ.....	218
<i>С.Н. Петин, А.А. Коршикова</i> ОСНОВЫ МЕТОДИКИ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТОВ ГЕНЕРАЦИИ В СОСТАВЕ МУЛЬТИГЕНЕРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЯХ ИХ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	224
<i>А.С. Сураев, В.М. Котов, М.К. Скаков, Р.А. Иркимбеков</i> КОНЦЕПЦИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ АЭС С ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ.....	229

Секция 4. ТЕХНОЛОГИИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

<i>N.A. Ivanova, D.D. Spasov</i> INVESTIGATION OF THE OPEN BIFUNCTIONAL CATHODE FOR UNITIZED REVERSIBLE FUEL CELL: COMPOSITION AND PERFORMANCE.....	239
---	-----

<i>Д.В. Блинов, А.В. Бездудный, В.И. Борзенко, А.Н. Казаков, В.Н. Кулешов, В.И. Порембский</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАЛЫХ РАСХОДОВ ВОДОРОДА ПРИ ПОМОЩИ МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО РЕАКТОРА, ОХЛАЖДАЕМОГО/НАГРЕВАЕМОГО ЗА СЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА.....	245
<i>Д.О. Дуников, В.И. Борзенко</i> КРИЗИС ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЗАРЯДКЕ МЕТАЛЛОГИДРИДНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ВОДОРОДОМ.....	250
<i>А.Н. Казаков, В.Ю. Бодиков, Д.В. Блинов</i> ВЛИЯНИЕ МАССОВОГО СООТНОШЕНИЯ ПОРОШКОВ КАРБОНИЛЬНОГО НИКЕЛЯ И СПЛАВА $La_{0.6}Ce_{0.2}Nd_{0.2}Ni_4Co_{0.4}Mn_{0.3}Al_{0.3}$ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО ЭЛЕКТРОДА.....	255
<i>В.Н. Кулешов, С.В. Курочкин, Н.В. Кулешов, Д.В. Блинов, О.Ю. Григорьева</i> ЭЛЕКТРОДНО – ДИАФРАГМЕННЫЕ БЛОКИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С ЩЕЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ.....	260
<i>В.Н. Кулешов, С.В. Курочкин, Н.В. Кулешов, Е.Я. Удрис</i> КОАКСИАЛЬНАЯ ЩЕЛОЧНАЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНАЯ БАТАРЕЯ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	266
<i>С.Н.Петин, Т.А. Высочина, П.Н. Григорьев, С.К. Попов</i> ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАЗОВЫХ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	269
<i>А.С. Пушкарев, И.В. Пушкарева, С.В. Акелькина, М.В. Козлова, С.А. Григорьев, Н.В. Кулешов, Д.Г. Бессарабов</i> ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ВОДЫ С ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ.....	276
<i>А.А. Федотов, А.Б. Тарасенко, Д.А. Каранова</i> ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АНОДНОГО ГАЗОДИФфуЗИОННОГО СЛОЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА.....	282
Секция 5. ДИАГНОСТИКА, МОНИТОРИНГ, ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ	
<i>Ю.И. Солуянов, А.И. Фдотов, А.Р. Ахметшин, В.А. Халтурин</i> МОНИТОРИНГ И АКТУАЛИЗАЦИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК МНОГОКВАРТИРНЫХ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ.....	287
<i>В.Ю. Чайкин, В.А. Петров, И.А. Султангузин, А.А. Басалаев, А.Н. Нечаев, Н.Н. Капитонов</i> ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДОМА.....	291
Секция 6. МАЛАЯ ЭНЕРГЕТИКА, НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ВТОРИЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ	
<i>П.Н. Анисимов, А.А. Медяков</i> ПАРАМЕТРЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ДВИГАТЕЛЕМ НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕСОСЕЧНЫХ МАШИН.....	301
<i>И.М. Бернадинер, П.В. Хорева, В.А. Екимова</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД.....	307
<i>В.Д. Ванюшкин, С.К. Попов, А.А. Валинеева</i> РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОКСОВОГО ОСТАТКА ДЛЯ СОЗДАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ.....	314

<i>Е.Г. Гаши, А.И. Киселева, Г.А. Романов</i> ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОНАХ.....	320
<i>И.А. Дядиченко, И.Ф. Самсон</i> ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПАРИТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ЛЬДА В СХАТ.....	326
<i>В.М. Зайченко, Ю.М. Фалеева</i> ДВУХСТАДИЙНАЯ ПИРОЛИТИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ КОФЕЙНОЙ ШЕЛУХИ И ПЕРГАМЕНТА В СИНТЕЗ-ГАЗ.....	329
<i>Д.М. Ильин, Т.А. Шестопалова, А.Г. Васьков</i> МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ.....	333
<i>Ф.В. Молотов, А.Г. Васьков, Т.А. Шестопалова</i> УПРАВЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫМ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОМ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ.....	338
<i>А.И. Сажнёв, С.Е. Смирнов</i> РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ДИРИЖАБЛЯ.....	341
<i>А.А. Сысоев</i> УЧЕБНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПЛАНИРОВАНИЮ РЕЖИМА РАБОТЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....	346
<i>Р.П. Шевердиев</i> ГИБРИДНЫЙ ЭНЕРГОКОМПЛЕКС ГАРАНТИРОВАННОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ.....	351
Секция 7. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ	
<i>В.Н. Андреев, А.В. Кулаков</i> МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ПО ЭКОЛОГИИ В РОССИЙСКИХ ТЭК (НА ПРИМЕРЕ ПАО «ИНТЕР РАО»).....	359
<i>Д.Ю. Батова, Д.А. Смирнова</i> АЛГОРИТМ ВЫЯВЛЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	365
<i>Е.А. Зинчук, Д.Э. Мусаева</i> МОДЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СПРОСОМ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ.....	369
<i>Д. Кривая, Д.В. Никифорова</i> ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОВЛЕЧЕНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭНЕРГОБАЛАНС ЮЖНОГО РЕГИОНА РОССИИ.....	372
<i>Е.Е. Крыленко</i> ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	376
<i>В.Р. Леус, Д.А. Смирнова</i> ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ SMART GRID В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ ФИЛИАЛОВ ПАО «МРСК ЮГА» – РОСТОВЭНЕРГО».....	379

<i>А.А. Павленок, Е.В. Каленская, Д.А. Фрей</i> ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НВИЭ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛИЩНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.....	383
<i>Н.А. Сабайкин, Д.А. Смирнова, В.А. Щевьёва, М.Г. Киселев</i> ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ СЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕТЬ.....	387
<i>П.М. Савченков</i> ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА МОДУЛЬНЫХ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ.....	394
<i>Д.А. Смирнова, Д.Г. Шувалова</i> КОНЦЕССИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ТАРИФНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ.....	398
<i>В.Ю. Шведова</i> УЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ ТАРИФОВ НА ПЕРЕДАЧУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	404
<i>Д.Г. Шувалова, А.И. Королькова</i> ОЦЕНКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОДПРОЦЕССАМИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОКОМПАНИЙ.....	409
Секция 8. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В КОМПЛЕКСЕ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА	
<i>Н.А. Малахов, В.С. Глазов</i> БАЗА ДАННЫХ ПО СТРОИТЕЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ И ПРИМЕР ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОТТЕДЖА С ТЕРМОСИФОНАМИ.....	415
<i>М.А. Разаков, В.А. Хохлов</i> ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ГОРОДСКОЙ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ НАСОНОЙ СТАНЦИИ.....	420
<i>О.А. Чехранова</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СХЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КРАСНОЯРСК.....	425

Научное издание

Энергосбережение – теория и практика

Труды Десятой Международной школы-семинара
молодых ученых и специалистов

Верстка *М.С. Пурдина*

Редактор *Горохов А.А.*
Компьютерная верстка и макет *Горохов А.А.*

ISBN 978-5-907356-27-6



Подписано в печать 20.09.2020 г.
Формат 60x84 1/8, Бумага офсетная
Уч.-изд. л. 50,3 Усл. Печ. л. 45,9 Тираж 100 экз. Заказ № 1047
Юго-Западный государственный университет
305040, г. Курск, ул. 50-лет Октября, д.94

Отпечатано в типографии
Закрытое акционерное общество "Университетская книга"
305018, г. Курск, ул. Монтажников, д.12
ИНН 4632047762 ОГРН 1044637037829 дата регистрации 23.11.2004 г.
Телефон +7-910-730-82-83 www.nauka46.ru