

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

*Научно-технический
и производственный журнал*

(25) 5 / 2023

**POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY**

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Журнал выходит на русском языке с января 1999 года
Периодичность - 6 раз в год (сдвоенными номерами)

| | |
|---------------------------------------|-------------------|
| Главный редактор | АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю. |
| Второй главный редактор | АХМЕТОВА И.Г. |
| Заместитель главного редактора | STANIMIR VALTCHEV |
| Ответственный секретарь | ГРАЧЕВА Е.И. |
| Научный редактор | КАЛИНИНА М.В. |

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

РИНЦ:

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

| | |
|---|---|
| Свидетельство о регистрации СМИ: | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи , информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) - ПИ ФС 77-83199 от 31.03.2022г. |
| Подписка: | Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740 |
| Сайт: | https://www.energyret.ru/ |
| Издатель: | Казанский государственный энергетический университет |
| Адрес издателя: | 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
| Адрес редакции: | 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51 |
| Тел./факс: | +7 (843) 527-92-76 |
| Email: | problems_ener@mail.ru |
| Типография: | ООО "ФОЛИАНТ" |
| Адрес типографии: | 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Профсоюзная, 17 в |

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2023
Т.25, № 5
Сентябрь – Октябрь
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

Журнал освещает фундаментальные и прикладные исследования, а также дискуссионные вопросы по проблемам энергетики и связанными с ней отраслями производства и науки.

В Журнале публикуются результаты открытых научных исследований, выполняемых учеными научных учреждений, высших учебных заведений, иных организаций и граждан, ведущих научные исследования в порядке личной инициативы.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.
АРАКЕЛЯН Э.К.
БОРУШ О.В.
БОЧКАРЕВ И.В.
БРЯКИН И.В.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ГОЛЕНИЦЕВ-КУТУЗОВ А.В.
ГРАЧЕВА Е.И.
ДМИТРИЕВ А.В.
ДОВГУН В.П.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ИВШИН И.В.
КАЛАЙДА М.Л.
КАСИМОВ В.А.

КОРНИЛОВ В.Ю.
ЛАПТЕВ А.Г.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
НИКОЛАЕВА Л.А.
ПЕТРОВ Т.И.
САФИН А.Р.
СУСЛОВ К.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ЯКИМОВ Н.Д.
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAEL

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-83199 от 31.03.2022 г.

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV
Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA
Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

The Journal publishes the results of open scientific research carried out by scientists of scientific institutions, higher educational institutions, other organizations and citizens conducting research in the form of a personal initiative. The following materials are accepted for publication: original articles; scientific reviews; reviews; short messages; reference materials.

Sections:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS, PRODUCTS,
SUBSTANCES AND PROPANE MEDIA
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
ECOLOGICAL SAFETY

Editorial board:

| | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| AKHMETOVA IRINA | IVSHIN IGOR | YAKIMOV NIKOLAY |
| ARAKELYAN EDIK | KALAJDA MARINA | KOLCUN MICHAIL |
| BORUSH OLESYA | KASIMOV VASIL | ILIYA K. ILIEV |
| BOCHKAREV IGOR | KORNILOV VLADIMIR | ION V. ION |
| BRYAKIN IGOR | LAPTEV ANATOLY | PENTIUC RADU DUMITRU |
| VANKOV YURY | MESHCHERYAKOV VIKTOR | STANIMIR VALTCHEV |
| GRACHEVA ELENA | MINGALEEVA GUZEL | |
| VAFIN DANIL | NIKOLAEVA LARISA | |
| GOLENISHCHEV-KUTUZOV ALEXANDER | SUSLOV KONSTANTIN | |
| DMITRIEV ANDREY | SAFIN ALFRED | |
| DOVGUN VALERY | SHCHINNIKOV PAVEL | |
| ZVEREVA ELVIRA | FEDOTOV ALEXANDER | |

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation
Tel./fax: +7 (843) 527-92-76
Printing House: LLC «FOLIANT»
**Address of the printing
house** 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V
Email: problems_ener@mail.ru
Site: <https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ,
ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

| | |
|---|----|
| ГАРИФУЛЛИН М.Ш., СЛОБОДИНА Ю.Н., БИКЗИНУРОВ А.Р., ГИНИАТУЛЛИН Р.А., ЧЕРНЫШОВ В.А. Исследование содержания непредельных углеводородов в трансформаторных маслах с помощью ИК спектроскопии..... | 3 |
| ЗАРИПОВ Д.К., НАСИБУЛЛИН Р.А., ЗАКИРОВ Д.Ф., ЗАХАРОВ А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом..... | 20 |

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

| | |
|--|----|
| БЕКIROV Э.А., ВОСКРЕСЕНСКАЯ С.Н., РАМАЗАНОВА З.У., БЕКИРОВ О.С. Методики расчета выработки электрической энергии ветроэнергетическими установками и влияние на них скорости ветра..... | 30 |
|--|----|

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

| | |
|--|----|
| ЛЕСС В.М., ЛЮБЧЕНКО В.Я., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А. Анализ энергоэффективности энергетических объектов с применением методов ранжирования..... | 42 |
| ШУШПАНОВ И.Н., ПЕРМЯКОВА Д.Н., КОНЮХОВ В.Ю., ОПАРИНА Т.А. Необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей..... | 59 |
| ЧЕТОШНИКОВА Л.М., СМОЛЕНЦЕВ Н.И., ТОМСКИХ Н.В., ГИМГИНА Д.А., ЛАВРЕНТЬЕВА Д.А. Управление потоками мощности в локальных сетях. . . | 74 |

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

| | |
|--|-----|
| НАСИРОВ Ш. Применение современных технологий для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности в энергетических системах Азербайджана..... | 83 |
| ЗАКИРОВ Р.Н., ЧИЧИРОВА Н.Д., ФИЛИМОНОВА А.А., ЧИЧИРОВ А.А. Нормативно-техническая документация по промышленной безопасности при производстве водорода..... | 91 |
| АЛЬ-ОКБИ А.К., ВАНЬКОВ Ю.В. Парокомпрессионная система кондиционирования воздуха с солнечным тепловым коллектором..... | 101 |

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

| | |
|---|-----|
| АГАПОВ Д.С., КАРТОШКИН А.П., КАЛЮТИК А.А., КОНДРАШОВ А.В. Совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учётом их локализации..... | 115 |
| ВАФИН Д.Б., ВАНЬКОВ Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводородов с несимметричным расположением настенных горелок. . | 126 |

C O N T E N T S

METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING
MATERIALS, ARTICLES, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

| | |
|---|----|
| GARIFULLIN M.SH., SLOBODINA Y.N., BIKZINUROV A.R., GINIATULLIN R.A., CHERNYSHOV V.A. Investigation of the content of unsaturated hydrocarbons in transformer oils using IR spectroscopy. | 3 |
| ZARIPOV D.K., NASIBULLIN R.A., ZAKIROV D.F., ZAKHAROV A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination | 20 |

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

| | |
|--|----|
| BEKIROV E.A., VOSKRESENSKAYA S.N., RAMAZANOVA Z.U., BEKIROV O.S. Methods of calculating electric power generation by wind turbines and their influence on wind speed. | 30 |
|--|----|

ELECTRICITY

| | |
|--|----|
| LESS V.M., LYUBCHENKO V.Y., PAVLYUCHENKO D.A. Energy efficiency analysis of energy facilities using ranking methods. | 42 |
| SHUSHPANOV I.N., PERMYAKOVA D.N., KONYUKHOV V.YU., OPARINA T.A. The need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and trans-Siberian highways. | 59 |
| CHETOCHNIKOVA L.M., SMOLENTSEV N.I., TOMSKICH N.V., GIMGINA D.A., LAVRENTIEVA D.A. Local power flow control. | 74 |

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

| | |
|---|-----|
| SHAMSI NASIROV Application of modern technologies to ensure operational reliability and safety in energy systems of Azerbaijan. | 83 |
| ZAKIROV R.N., CHICHIROVA N.D., FILIMONOVA A.A., CHICHIROV A.A. Normative and technical documentation on industrial safety in the production of hydrogen. | 91 |
| AL-OKBI A.K., VANKOV YU.V. Vapor compression air conditioning system with solar heat collector. | 101 |

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

| | |
|---|-----|
| AGAPOV D.S., KARTOSHKIN A.P., KALUTIK A.A. KONDRASHOV A.G. Improvement of pinch technology for the possibility of integration of non-stationary thermal processes, taken into account of their localization. | 115 |
| VAFIN D.B., VANKOV Y.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with a non-symmetric arrangement wall-mounted burners. | 126 |

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19

ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НЕПРЕДЕЛЬНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЛАХ С ПОМОЩЬЮ ИК СПЕКТРОСКОПИИ

Гарифуллин¹ М.Ш., Слободин¹ Ю.Н., Бикзинуров¹ А.Р., Гиниатуллин² Р.А., Чернышов³ В.А.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

³Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>, g_marsels@mail.ru

yulya_slobodina@mail.ru, mr.azat780@mail.ru, g_ruslan7@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5955-5540>, blackseam78@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Проанализировать современные представления о непредельных углеводородах с двойными С=С связями в минеральных трансформаторных маслах и оценить эффективность современных методов контроля содержания этих соединений в маслах. Разработать инструментальный способ контроля непредельных соединений в минеральных маслах с помощью ИК спектроскопии. Исследовать изменение содержания непредельных углеводородов в маслах в процессе термодеструкции. Исследовать эффективность процесса адсорбционной очистки масел для удаления из масел непредельных соединений. *МЕТОДЫ.* Для определения содержания в минеральных маслах непредельных углеводородов использовалась ИК спектроскопия в ближней ИК области спектра. Искусственная термодеструкция масел осуществлялась при температурах 100 и 150 °С. Для адсорбционной очистки масел использовались силикагели марки КСКГ, АС230Ш, а также адсорбент Фуллера Земля. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Выбран спектральный диапазон 4750÷4500 см⁻¹ и способ преобразования ИК спектров, позволяющего осуществлять контроль содержания непредельных соединений с двойными С=С связями в масле. В результате модельных экспериментов наглядно продемонстрировано, что с увеличением степени термодеструкции масел содержание непредельных углеводородов увеличивается. Показано, что адсорбционная очистка обладает низкой эффективностью в отношении непредельных соединений. Предложен алгоритм дифференциации свежих минеральных трансформаторных масел, произведенных по технологии гидрокрекинга, от регенерированных масел. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Наибольшее содержание непредельных соединений содержится в минеральных маслах, производимых технологиям, отличным от гидрокрекинга. Термоокислительное воздействие на масло в процессе его эксплуатации ведет к увеличению содержания в масле непредельных углеводородов. Содержание непредельных углеводородов в минеральном трансформаторном масле характеризует невосстанавливаемую при регенерации степень деструкции его углеводородной основы.

Ключевые слова: Минеральное трансформаторное масло; непредельные углеводороды; инфракрасная (ИК) спектроскопия; регенерация; адсорбционная очистка

Для цитирования: Гарифуллин М.Ш., Слободин Ю.Н., Бикзинуров А.Р., Гиниатуллин Р.А., Чернышов В.А. Исследование содержания непредельных углеводородов в трансформаторных маслах с помощью ИК спектроскопии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 3-19. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19.

INVESTIGATION OF THE CONTENT OF UNSATURATED HYDROCARBONS IN TRANSFORMER OILS USING IR SPECTROSCOPY

Garifullin¹ M.Sh., Slobodina¹ Y.N., Bikzinurov¹ A.R., Giniatullin² R.A., Chernyshov³ V.A.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>, g_marsels@mail.ru

yulya_slobodina@mail.ru, mr.azat780@mail.ru, g_ruslan7@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5955-5540>, blackseam78@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To analyze the current understanding of unsaturated hydrocarbons with double C=C bonds in mineral transformer oils and evaluate the effectiveness of modern methods of controlling the content of these compounds in oils. Develop an instrumental way to control unsaturated compounds in mineral oils by means of IR spectroscopy. Study the change in the content of unsaturated hydrocarbons in oils during thermal degradation. Study the effectiveness of the adsorption purification of oils to remove unsaturated compounds from oils. *METHODS.* To determine the content in mineral oils of unsaturated hydrocarbons used IR spectroscopy in the near infrared spectral region. Artificial thermal degradation of oils was carried out at temperatures of 100 and 150 °C. For adsorption purification of oils silica gels brands KSKG, AS230SH, as well as Fuller's Earth adsorbent were used. *RESULTS.* Spectral range 4750÷4500 cm⁻¹ and method of IR spectra transformation were chosen to control the content of unsaturated compounds with double C=C bonds in the oil. As a result of model experiments, it is clearly demonstrated that the content of unsaturated hydrocarbons increases with increasing degree of thermal degradation of oils. It is shown that adsorption purification has a low efficiency with respect to unsaturated compounds. An algorithm for differentiation of fresh mineral transformer oils produced by hydrocracking technology from the regenerated oils is proposed. *CONCLUSION.* The highest content of unsaturated compounds is contained in mineral oils produced by technologies other than hydrocracking. Thermo-oxidative impact on oil during its operation leads to an increase in the content of unsaturated hydrocarbons in the oil. The content of unsaturated hydrocarbons in the mineral transformer oil characterizes the degree of degradation of its hydrocarbon base that cannot be recovered during regeneration.

Keywords: Mineral transformer oil; unsaturated hydrocarbons; infrared (IR) spectroscopy; regeneration; reclaiming; adsorption purification.

For citation: Garifullin M.Sh., Slobodina Y.N., Bikzinurov A.R., Giniatullin R.A., Chernyshov V.A. Investigation of the content of unsaturated hydrocarbons in transformer oils using IR spectroscopy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5):3-19. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19.

Введение (Introduction)

Силовой трансформатор является одним из важнейших элементов в любой электроэнергетической системе. Способность работать на высоких мощностях обусловлена использованием жидкого диэлектрика, которое эффективно отводит тепло от активной части трансформатора во внешнюю среду. Традиционным видом трансформаторного масла, использовавшимся еще в самых первых маслонеполненных трансформаторах, является минеральное трансформаторное масло, производимое из нефтяного сырья [1].

Воздействие на масло неблагоприятных эксплуатационных факторов ведет к образованию в нем продуктов старения, которые не только ухудшают эксплуатационные характеристики масла, но и увеличивают скорость деградации твердой изоляции.

Если качество масла не соответствует требуемым нормативам, оно может быть заменено на новое. Однако основным мероприятием является процедура очистки или же полного восстановления масла. При очистке из масла удаляются различные мехпримеси, вода, производится дегазация. Восстановление (регенерация) предполагает удаление из масла всех нежелательных компонентов, доведение нормируемых показателей качества – кислотное число, влагосодержание, цвет, $tg\delta$, $U_{\text{ПР}}$ и др. – до требуемых значений, а также стабилизацию соответствующими присадками [2]. Следует отметить, что в данной работе

оба этих термина – восстановленное и регенерированное – используются как синонимы. В библиографическом списке приведены оригинальные термины, которые были использованы авторами.

Помимо восстановления эксплуатационных параметров, регенерированное масло визуально (по цвету и мутности) приобретает такой же вид, как у свежего масла [3]. Поскольку возможное количество процедур регенерации никак не регламентируется, производители различных установок по регенерации заявляют, что ресурс трансформаторного масла может продлеваться неограниченно долго [4]. При этом специалистами уже давно отмечено, что по скорости деградации регенерированные масла уступают свежему маслу [5].

Также было выявлено, что при сравнительной деградации свежего и регенерированного масел под воздействием электрических разрядов, степень окисления у регенерированного масла также оказалась существенно выше, нежели у свежего масла [6].

С учетом изложенного необходимо обратить внимание на продукты деградации, образующиеся в масле при его старении в силовом трансформаторе. Также необходимо подробнее рассмотреть особенности процедуры очистки масла от этих соединений.

Углеводородную основу всех трансформаторных минеральных масел составляют нафтеновые и парафиновые соединения. Одной из главных причин деградации углеводородной основы масел принято считать термоокисление [7].

Необходимо отметить, что изменения химического состава и электрофизических характеристик трансформаторных масел также происходят под воздействием высокой напряженности электромагнитных полей и электрических разрядов различной интенсивности. Образующиеся при этих процессах продукты деструкции, а также изменения показателей качества масел остались за рамками данного исследования. В качестве процесса деградации масел в данной работе выступала термоокислительная деструкция.

В процессе термодеструкции образуются различные продукты окисления – перекиси, спирты, кетоны, кислоты. При этом также в масле увеличивается содержание полиароматических и смолисто-асфальтеновых соединений [8]. Исходя из того, что не все молекулы углеводородной основы масла вступают во взаимодействие с кислородом, либо превращаются в сложные полиароматические соединения, принято считать, что удаление таких соединений приводит к восстановлению углеводородного состава трансформаторного масла [9].

Углеводородные молекулы всех рассмотренных продуктов деградации минерального масла обладают полярным характером. Для удаления из масел этих продуктов старения традиционно используются природные и искусственные адсорбенты, которые обладают развитой поверхностью и избирательно поглощают соединения полярного характера [5, 10]. Природными сорбентами являются некоторые разновидности глин, трепела, опоки, диатомиты, бокситы [11]. Наиболее известными примерами могут служить «Зикеевская опока» и «Фуллерова Земля». В качестве синтетических адсорбентов традиционно используются силикагель, окись алюминия, алюмосиликатный катализатор и др. [5, 12].

Эффективность процесса регенерации масел в первую очередь ассоциируется со снижением кислотного числа масел. Поэтому именно кислотное число фигурирует в большинстве диаграмм и таблиц, иллюстрирующих эффективность регенерации различными сорбентами. Такой подход, наиболее вероятно, связан с тем, что кислотное число на практике считается не только показателем окисленности масла, но и одним из маркеров степени его состаренности [5]. Также на основе кислотного числа делаются попытки оценивать не только состояние, но и ресурс масла [13]. Кроме того, кислотное число является обязательным нормативным показателем качества товарных, свежих, эксплуатационных, регенерированных, а также находящихся на хранении масел.

Однако кислотное число, а также содержание в масле продуктов окисления, являются не полной характеристикой степени деградации углеводородной основы масла. Помимо рассмотренных выше продуктов старения, в масле образуется ненасыщенные углеводороды – в основном непредельные углеводороды с двойной связью $C=C$, а также с тройной связью $C\equiv C$. Далее под непредельными углеводородами в минеральных трансформаторных маслах будут подразумеваться соединения с двойной $C=C$ связью – алкены и циклоалкены. Этому классу углеводородов и будут посвящены следующие разделы данной работы.

Минеральные масла являются продуктом нефтепереработки. В ряде зарубежных нефтей, а также нефтей Восточной Сибири, Татарии и других районов России содержание алкенов может достигать до 20 % от массы нефти [14]. В настоящее время для удаления из нефтепродуктов непредельных соединений на нефтеперерабатывающих предприятиях

применяется технология гидрокрекинга. Аналогичная технология, называемая гидроочисткой, разработана и для регенерации отработанных масел, однако на практике используется исключительно редко, поскольку экономически оправдана только для крупных предприятий с большими объемами перерабатываемого масла [15].

Основная причина удаления непредельных углеводородов заключается в повышенной реакционной способности ненасыщенных связей. Наличие в углеродной цепочке двойной связи способствует ее перекисидации [9]. Кроме того, непредельные углеводороды склонны к полимеризации, что способствует увеличению шламообразования, поэтому их не должно быть в свежих трансформаторных маслах [9].

Появление в трансформаторном масле непредельных углеводородов обусловлено термоокислением и разрядными процессами в электрооборудовании. В отличие от продуктов окисления, большая часть непредельных углеводородов являются неполярными соединениями. Как было отмечено выше, способность адсорбентов удерживать в своих порах продукты старения масла основана на полярном характере окисленных, а также ароматических углеводородов. Исходя из этого, можно предположить, что большая часть непредельных углеводородов должна беспрепятственно проходить сквозь слой адсорбента, оставаясь в итоге в очищенном (регенерированном) масле. В дальнейшем эти соединения становятся продуктами окисления масла и потенциальным шламом.

Несмотря на негативное влияние, содержание непредельных углеводородов в трансформаторном масле, в отличие от многих других видов нефтепродуктов, в настоящее время не регламентируется и не контролируется. Это обуславливает актуальность исследований, направленных на определение содержания в трансформаторных маслах этих соединений. Научный интерес представляет исследование процесса изменения содержания непредельных углеводородов в маслах в процессе их деградации, в частности, при термодеструкции. Практическую значимость при этом имеет разработка инструментального метода контроля содержания непредельных углеводородов, который можно использовать на практике и получать воспроизводимые результаты в различных лабораториях энергетических предприятий.

Материалы и методы (Materials and methods)

Используемые на практике методы количественного определения содержания непредельных углеводородов в жидких углеводородах основаны на реакциях присоединения различных веществ к этим углеводородам по месту двойной связи. Наибольшее распространение нашли методы, основанные на реакциях йода или брома. О степени непредельности судят по величине бромного или йодного числа [16]. Этим методам присущи такие недостатки традиционного химического анализа, как трудоёмкость, длительность и высокая стоимость проводимых исследований. Для оценки целесообразности использования указанных методов были определены значения йодных чисел в 3-х образцах трансформаторного масла: свежем марки ВГ; свежем марки ТКп; регенерированном масле. Определение йодных чисел проводилось согласно ГОСТ 2070-82 в двух независимых аккредитованных лабораториях нефтехимических предприятий: 1) АО «Танеко», г. Нижнекамск («Лаб. 1»); 2) ПАО «Оргсинтез», г. Казань (Лаб. 2).

В таблице 1 представлены полученные значения йодных чисел, а также показатели, характеризующие воспроизводимость получаемых результатов. Для наглядности на рисунке 1 приведено сопоставление результатов измерений двумя лабораториями.

Таблица 1
Table 1

Результаты измерения йодного числа трансформаторных масел в двух лабораториях
The results of measuring the iodine number of transformer oils in two laboratories

| Образец масла | Йодное число, г. йода /100 г. масла | | | Расхождение | Относительное расхождение, % | Коэффициент вариации, % |
|------------------|--|--------|---------|-------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | Лаб. 1 | Лаб. 2 | Среднее | | | |
| ВГ, свежее | 0,128 | 0,09 | 0,109 | 0,038 | 34,9 | 24,7 |
| ТКп, свежее | 0,649 | 0,39 | 0,52 | 0,259 | 49,9 | 35,3 |
| Регенерированное | 0,704 | 1,30 | 1,002 | 0,596 | 59,5 | 42,1 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

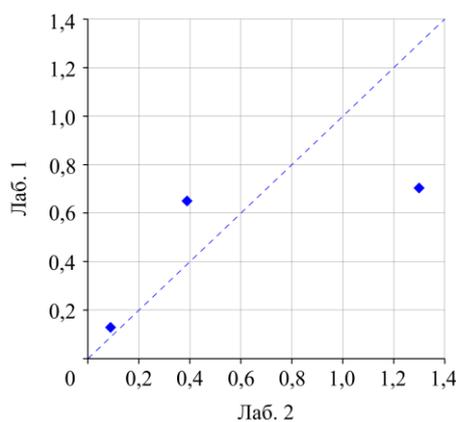


Рис. 1. Сопоставление значений йодного числа трансформаторных масел, измеренных в двух лабораториях (согласно табл. 1)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленные результаты демонстрируют низкую воспроизводимость определения значения йодного числа в различных лабораториях. Кроме того известно, что этот метод завышает результаты измерений применительно к образцам окисленных нефтепродуктов. Поэтому погрешность определения йодного числа, обусловленная окисленностью масел, также всегда будет различной.

Таким образом, можно заключить, что метод йодного числа не может быть использован в качестве инструмента оценки содержания непредельных С=C групп в углеводородных молекулах минеральных трансформаторных масел.

Альтернативным способом определения содержания в маслах непредельных углеводородов являются спектральные методы, в частности, методы оптической спектроскопии. В данной работе для определения изменения содержания в минеральном масле непредельных углеводородов с двойными С=C связями измерялись спектры поглощения в ближней инфракрасной (ИК) области спектра в диапазоне волновых чисел 4750÷4500 см⁻¹.

Для демонстрации принципа такого анализа на рисунке 2 представлен спектр поглощения минерального масла в спектральном диапазоне 4800÷4000 см⁻¹, измеренный в кювете толщиной 0.4 мм (толщина слоя масла). На спектре можно видеть интенсивные пики около 4330 и 4260 см⁻¹ относящиеся к метиленовым -CH₂- группам углеводородов масла. Характерный перегиб (плечо) в районе 4386 см⁻¹, относится к метильным -CH₃ группам.

На фоне интенсивных полос поглощения выделенная красным цветом на рисунке 2 область в диапазоне волновых чисел 4750 ÷ 4500 см⁻¹ почти неотличима от фонового поглощения, и на первый взгляд не представляет никакого интереса. Однако именно в этой области расположены характерные полосы поглощения, относящиеся к непредельным углеводородам [17].

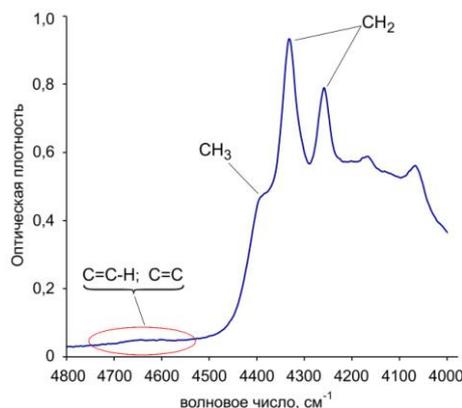


Рис. 2. ИК спектр поглощения минерального масла в диапазоне 4800÷4100 см⁻¹. Толщина кюветы 0.4 мм

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для практического использования данной области спектра требуется увеличение толщины кюветы до такой величины, при которой интенсивность соответствующих полос поглощения будет приемлемой для количественного и качественного анализа. Эмпирическим путем было получено, что оптимальное значение толщины кюветы находится в диапазоне $5 \div 10$ мм.

На рисунке 3 (слева) представлен спектр поглощения в интересующей нас области спектра при толщине кюветы 10 мм. В качестве аналитических выступают полосы поглощения с пиками около 4665 и 4600 см^{-1} , которые относятся к колебаниям $=\text{C}-\text{H}$ и $\text{C}=\text{C}$ групп непредельных углеводородов [17].

Для последующего анализа из измеренного ИК спектра необходимо вычесть фоновое поглощение (показано на рис. 3 красной пунктирной линией), которое является крылом полосы поглощения метильных $-\text{CH}_3$ групп (рис. 2). Данное фоновое поглощение аппроксимируется функцией Гаусса. Итоговый спектр поглощения непредельных соединений представлен справа на рисунке 3.

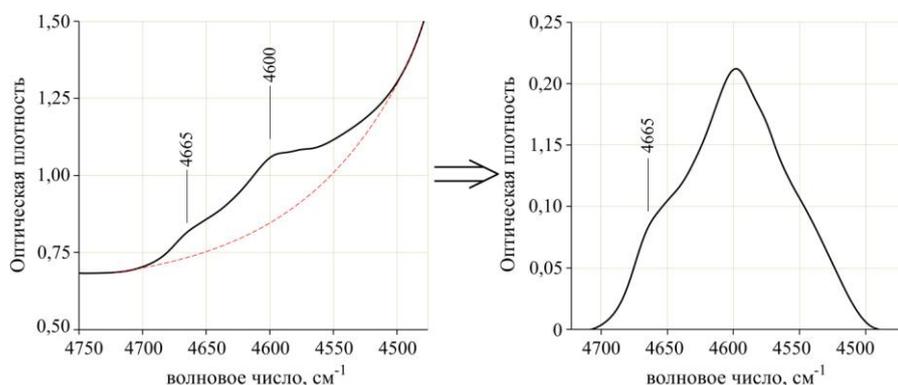


Рис. 3. ИК спектры минерального трансформаторного масла в области $4750 \div 4500$ см^{-1} . Слева – исходный (измеренный) ИК спектр поглощения масла, справа – спектр поглощения непредельных соединений после удаления фонового поглощения (красная пунктирная линия). Толщина кюветы 10 мм

Fig. 3. Infrared spectra of mineral transformer oil in the range of $4800 \div 4100$ cm^{-1} . Left - original (measured) IR absorption spectrum of oil, right - absorption spectrum of unsaturated compounds after removal of background. Thickness of the cuvette is 10 mm

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует отметить, что для поиска аппроксимирующей кривой фонового поглощения, как правило, используется какой-либо математический пакет. При этом на процесс поиска аппроксимирующей кривой, именуемого фитингом (от «*curve fitting*» – подгон кривой), оказывает влияние не только используемый алгоритм в конкретном программном продукте, но и субъективный фактор. Последнее, в частности, обусловлено тем, что фитинг нелинейной функции является итерационным процессом, завершение которого зачастую определяется не автоматически, а субъективно. В результате этого итоговый спектр поглощения, построенный различными исследователями и в различных программных продуктах, может иметь некоторые различия. Это становится заметным при низкой интенсивности полос поглощения в области 4665 и 4600 см^{-1} .

Для решения описанной проблемы фитинга нелинейной кривой фонового поглощения вместо нахождения истинных спектров поглощения можно использовать так называемые Дифференциальные («разностные») спектры поглощения. Для построения такого спектра фоновое поглощение аппроксимируется прямой линией. Алгоритм получения дифференциального спектра поглощения представлен на рисунке 4. Точки, через которые проводится аппроксимирующая прямая, обозначенная на рисунке как «Базовая линия», задаются заранее. Таким образом, в процедуре построения дифференциального спектра отсутствует проблема неопределённости, что решает проблему воспроизводимости результатов, получаемых различными исследователями в разных лабораториях.

Для построения Базовой линии предлагается использовать точки, соответствующие волновым числам 4700 и 4550 см^{-1} , как это показано на рисунке 4 слева. Справа на рисунке 4 показан получаемый после процедуры вычитания дифференциальный спектр.

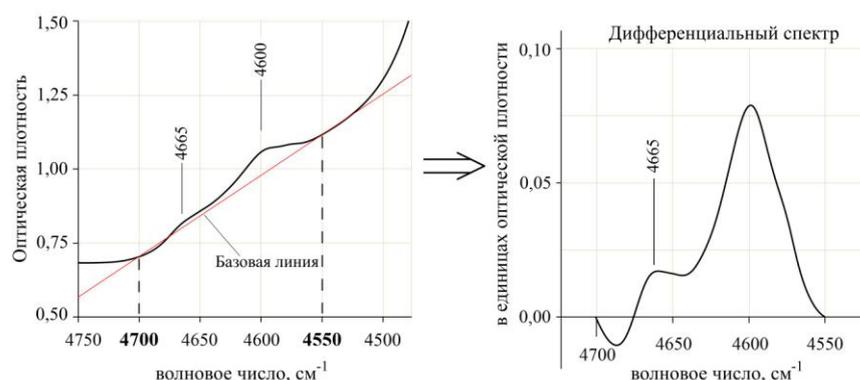


Рис. 4. Алгоритм получения Дифференциального спектра из исходного (измеренного) ИК спектра. Базовая линия проводится через точки, соответствующие волновым числам 4700 и 4550 см^{-1} . Исходный (измеренный) спектр соответствует спектру на рис. 3

Fig. 4. Algorithm of obtaining a differential spectrum from the initial (measured) IR spectrum. The baseline is drawn through the points corresponding to wave numbers 4700 and 4550 cm^{-1} . The initial (measured) spectrum corresponds to the spectrum in Fig. 3

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Следует отметить, что на дифференциальных спектрах характерные пики в районе 4665 и 4600 см^{-1} , проявляются более явно, нежели на обычных спектрах поглощения. Другой особенностью является появление на спектре областей, где оптическая плотность принимает отрицательные значения. Это связано с тем, что Базовая линия, как это можно видеть из сравнения рисунков 3 и 4, всегда проходит выше истинного фонового поглощения, обусловленного крылом полосы поглощения $-\text{CH}_3$ групп молекул масла. Чем меньше интенсивность характерных пиков в районе 4665 и 4600 см^{-1} , тем более глубоко в отрицательную область будет опускаться кривая дифференциального спектра. Как будет показано далее, для некоторых трансформаторных масел с низким содержанием непредельных углеводородов дифференциальные спектры полностью располагаются в отрицательной области.

Отрицательное значение оптической плотности не имеет физического смысла, однако наличие на спектрах таких областей не влияет на проведение сравнительного анализа дифференциальных спектров различных масел.

Для количественного анализа содержания ненасыщенных $\text{C}=\text{C}$ связей в углеводородной основе трансформаторных масел необходимо сопоставление результатов спектрального анализа с результатами исследований масел методом йодного числа. Однако, как уже было рассмотрено выше, метод йодного числа обладает большой погрешностью и низкой воспроизводимостью. В связи с этим в данной работе представлены результаты исследования содержания непредельных углеводородов в минеральных маслах, основанные только на анализе их ИК спектров.

Следует отметить, что важным достоинством использования спектрального диапазона 4750 ÷ 4500 см^{-1} является отсутствие в этой области полос поглощения других соединений минерального масла, как это можно видеть из рис. 1. Например, в области 2000 ÷ 1400 см^{-1} , которую также можно использовать для контроля изменения содержания непредельных углеводородов в трансформаторном масле [18, 19], расположены интенсивные полосы поглощения карбонильных $\text{C}=\text{O}$ групп различных продуктов окисления масла (альдегиды, кетоны, кислоты), а также полосы поглощения ароматических соединений, что в совокупности затрудняет проведение анализа.

Экспериментальная часть

В 1-й Части работы исследовано влияние термоокислительной деструкции на изменение содержания в минеральном трансформаторном масле непредельных углеводородов с двойной связью $\text{C}=\text{C}$.

В реальных условиях эксплуатации процесс окисления идет очень медленно, в течение многих лет, поскольку температура масла внутри трансформатора не превышает 90 °С. Кроме того, во все минеральные трансформаторные масла добавляется ингибитор окисления. Традиционным ингибитором окисления является соединение из класса пространственно-затрудненных фенолов [20], из которых наиболее широкое распространение получил 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол, именуемый в отечественной литературе присадкой ионол [20]. Таким образом, для ускорения процесса термоокислительной деструкции масла можно как повысить температуру окисления, так и

удалить либо снизить в масле концентрацию присадки ионол.

Необходимо отметить, что чем выше температура масла при модельном окислении, тем сильнее будет отличие от окисленного в реальных условиях эксплуатации масла, как по составу, так и по количеству образующихся продуктов деградации. В этой связи исследование влияния процесса термодеструкции минерального масла на динамику изменения содержания в нём непредельных углеводородов проводилось при двух температурах: 1) 150 °С – ускоренное термоокисление; 2) 100 °С – термоокисление, приближенное к реальным условиям эксплуатации.

1) Термоокисление масел при 150 °С осуществлялось согласно ГОСТ 981-75 с помощью аппарата АПСМ-1 в масляной бане. Время окисления – 14 часов. Использовался катализатор – медная пластинка, скорость подачи кислорода – 200 мл/мин.

Снижение степени термоокислительного воздействия в этом эксперименте моделировалось путем уменьшения в окисляемом масле начальной концентрации присадки ионол. Было подготовлено 4 образца масел с исходной концентрацией ионола 0.2 %, 0.1 %, 0.05 % и 0 % (масс.). Для приготовления этих образцов в качестве базового масла использовалось масло марки ВГ, не содержащее ионола. Масло данной марки производится с использованием современной технологии гидрокрекинга, благодаря чему содержит низкое исходное содержание непредельных углеводородов.

2) Термоокисление масла при 100 °С осуществлялось в масляной бане в течение 200 часов с промежуточным отбором образцов масел через 70 и 140 часов. Для окисления также использовалось масло марки ВГ, не содержащее ионола. Катализатор и барботаж масла кислородом отсутствовали.

Во 2-й части работы исследовалась эффективность удаления из минеральных масел углеводородных соединений с двойными С=С связями с помощью искусственных и природных адсорбентов.

Для исследования были использованы четыре образца старых трансформаторных масел. Три образца, получившие обозначение I, II и III, были отобраны из силовых трансформаторов с длительным сроком эксплуатации. Образец IV был получен с предприятия по переработке (регенерации) отработанных трансформаторных масел. В таблице 2 приведено исходное кислотное этих образцов.

Таблица 2

Table 2

Кислотное число образцов масел состарившихся в условиях эксплуатации

The acidic number of oil samples aged under operating conditions

| Образец эксплуатационного масла | Кислотное число, мг КОН/г |
|---------------------------------|---------------------------|
| I | 0,04 |
| II | 0,08 |
| III | 0,14 |
| IV | 0,02 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Образцы масел I, II и III очищались искусственными адсорбентами, в качестве которых использовались два вида силикагелей:

a) силикагель марки КСКГ (крупный силикагель крупнопористый гранулированный, производство – ООО «Салаватский катализаторный завод», г. Стерлитамак, Россия), являющийся основным видом адсорбента, используемым на практике при регенерации масел [21].

b) силикагель марки АС230Ш (алюмосиликатный адсорбент, производство – ОАО «Химический завод им. Л.Я. Карпова», г. Менделеевск, Россия), рекомендуемый ведущими российскими специалистами для регенерации трансформаторных масел [22].

Процедура адсорбционной очистки масел силикагелями осуществлялась путем отстаивания масел в закрытой емкости, наполненной одним из видов силикагелей, в течение 100 часов без перемешивания. Соотношение массы масла к массе силикагелей – 2 : 1. Образцы масел I, II и III, очищенные силикагелем марки КСКГ, получили обозначение Ia, IIa и IIIa. Соответственно, образцы масел, очищенные силикагелем марки АС230Ш, получили обозначение Ib, IIb и IIIb.

Образец масла IV был очищен природным адсорбентом – Фуллеровой Землей. Адсорбционная очистка осуществлялась с помощью регенерационной установки компании Globe Core [4] на предприятии по регенерации отработанных трансформаторных масел. Регенерированное Фуллеровой Землей масло получило обозначение – IVc.

Для всех образцов минеральных масел – исходных, подвергнутых термодеструкции,

очищенных адсорбентами – были измерены их ИК спектры. Измерения проводились с помощью ИК-Фурье спектрометра *Tensor-27 (Bruker)* со спектральным разрешением 1 см^{-1} . Для записи спектров использовалась кювета толщиной 10 мм, материал окон – CaF_2 .

Для анализа изменения содержания в маслах непредельных углеводородов с двойными $\text{C}=\text{C}$ связями использовались как «классические» ИК спектры поглощения (см. рис 3), так и дифференциальные ИК спектры, построенные согласно алгоритму, приведенному на рис. 4.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Часть 1. Влияние термоокислительной деструкции масел на изменение содержания в них непредельных углеводородов.

В таблице 3 представлены значения кислотного числа образцов масел, окисленных при температуре 150°C при различной исходной концентрации ингибитора окисления. Можно видеть, что кислотное число масел, подвергнутых термоокислению, последовательно увеличивается при снижении исходной концентрации ионола. Таким образом, образцы этих масел представляют собой серию с последовательно увеличивающейся степенью термоокислительной деструкции.

Таблица 3
Table 3

Кислотное число образцов масел, окисленных при температуре 150°C
The acidic number of oil samples oxidized at a temperature of 150°C

| Исходная концентрация ионола, % | Кислотное число, мг КОН/г масла |
|---------------------------------|---------------------------------|
| 0,20 | 0,02 |
| 0,10 | 5,29 |
| 0,05 | 19,59 |
| 0 | 25,4 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 5 представлены ИК спектры поглощения (слева) и дифференциальные спектры (справа) окисленных образцов масел, а также свежего масла.

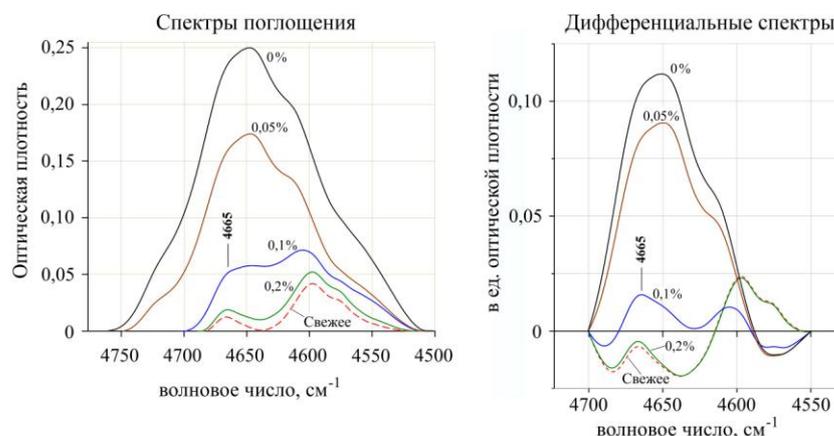


Рис. 5. ИК спектры поглощения и дифференциальные спектры образцов окисленных масел. Цифрами указаны исходное процентное содержание ионола в маслах (согласно табл. 3). Температура окисления – 150°C . Время окисления – 14 ч

Fig. 5. IR absorption spectra and differential spectra of oxidized oil samples. Figures indicate initial percentage of ionol in oils (according to Table 3). Oxidation temperature - 150°C . Time of oxidation - 14 h

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ спектров поглощения показывает, что с ростом степени термодеструкции масел интенсивность характерных полос поглощения с пиками при 4665 и 4600 см^{-1} , относящихся к ненасыщенным $\text{C}=\text{C}$ связям, увеличивается. Это позволяет утверждать, что интенсивная термоокислительная деструкция ведет к увеличению содержания в минеральных маслах непредельных углеводородов.

При этом по мере увеличения степени термоокислительной деструкции масла интенсивность полосы поглощения с пиком около 4665 см^{-1} растёт быстрее по сравнению с полосой поглощения 4600 см^{-1} . Такой характер соотношения интенсивностей полос поглощения $\text{C}=\text{C}$ групп характерен для ненасыщенных жиров, в молекулах которых

содержатся карбонильные С=О группы [23]. Данную особенность в спектрах сильно окисленных масел объясняется тем, что в модельных условиях ускоренной термодеструкции масел сочетались 2 фактора: барботация масел кислородом и низкое содержание ингибитора окисления – ионола. В таких условиях значительная часть углеводородных молекул, содержащих ненасыщенные связи, становится окисленной. Об этом, в частности, свидетельствуют очень высокие значения кислотных чисел для образцов масел с низкой исходной концентрацией ионола (менее 0.02 %) – (табл. 3). Появление С=О групп в углеводородных молекулах, содержащих непредельные С=С связи, и привело к изменению соотношения интенсивностей пиков при 4665 см^{-1} и 4600 см^{-1} поглощения в ИК спектрах. В реальных условиях эксплуатации степень окисления углеводородной основы масел существенно ниже [9], поэтому в старых эксплуатационных маслах, как будет продемонстрировано далее, пик в области 4600 см^{-1} всегда является более интенсивным.

Обратим внимание, что в спектре поглощения свежего масла присутствуют оба характерных пика поглощения, что свидетельствует о присутствии некоторого количества непредельных углеводородов и в свежих минеральных маслах. Также следует обратить внимание, что хотя ионол в количестве 0.2 % сильно затормозил процесс образования непредельных соединений в масле, однако не остановил его полностью.

Дифференциальные спектры, представленные справа на рисунке 5, также как и спектры поглощения, отражают процесс увеличения содержания непредельных соединений в масле по мере роста степени его термодеструкции. При этом характерным является уменьшение интенсивности пика в районе 4600 см^{-1} на этапе увеличения содержания непредельных соединений в масле при изначально низком их содержании. Такое «аномальное» поведение интенсивности, также как и области с отрицательными значениями оптической плотности, связано, как было отмечено выше, с особенностями алгоритма построения дифференциального спектра. По мере увеличения содержания в масле содержания непредельных углеводородов интенсивность этого пика на дифференциальных спектрах также начинает увеличиваться. Форма дифференциальных спектров при этом также начинает приближаться к форме кривых спектров поглощения непредельных соединений в масле. Что касается пика при 4665 см^{-1} , то его интенсивность в дифференциальных спектрах неизменно увеличивается в процессе термодеструкции масел. Это позволяет использовать его в качестве основного критерия содержания непредельных углеводородов в минеральном масле, особенно при их низком содержании в масле.

Таким образом, на основе анализа полученных спектральных данных можно сделать вывод, что при высокотемпературной термоокислительной деградации минерального масла содержания непредельных углеводородов в масле увеличивается. Однако, как было отмечено ранее, в реальных условиях эксплуатации температура масла в трансформаторном электрооборудовании существенно ниже 150 °C . В этой связи интересным представлялось исследование изменения содержания в масле непредельных углеводородов в процессе его длительного старения при температуре, приближенной к условиям эксплуатации.

На рисунке 6 представлена динамика изменения дифференциального ИК спектра масла в процессе длительной деградации при температуре 100 °C без принудительной барботации масла кислородом. Для ускорения процесса деградации термодеструкция осуществлялась без добавления в исходное масло ионола.

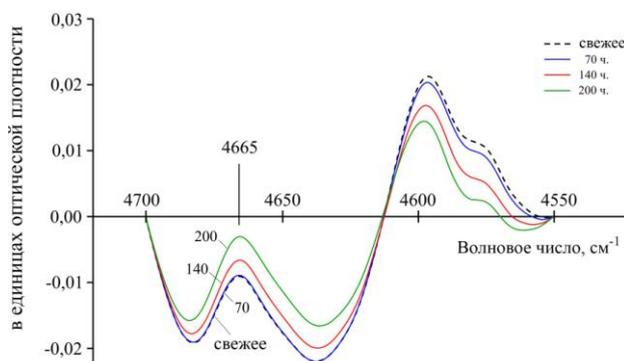


Рис. 6. Динамика изменения дифференциального спектра минерального масла в процессе термодеструкции при 100 °C . Цифрами указана длительность термодеструкции: 70, 140 и 200 часов

Fig. 6. Dynamics of differential spectrum change of mineral oil during thermal destruction at 100 °C . Numbers indicate duration of thermal degradation: 70, 140 and 200 h

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Видно, что интенсивность пика полосы поглощения в районе 4665 см^{-1} в процессе низкотемпературного старения непрерывно увеличивается. Таким образом, длительное низкотемпературное воздействие на минеральное трансформаторное масло также ведет к увеличению содержания в масле непредельных углеводородов.

Часть 2. Эффективность адсорбционной очистки для удаления из масел непредельных углеводородов.

Следующая часть работы была посвящена исследованию влияния адсорбционной очистки на изменение содержания непредельных углеводородов в минеральных маслах. Для проведения исследования были использованы образцы старых эксплуатационных масел I ÷ IV, которые были очищены различными адсорбентами.

Для исходных и очищенных образцов масел было определено кислотное число, величина которого традиционно используется для контроля эффективности процесса регенерации [5]. В результате адсорбционной очистки кислотное число всех масел снизилось до величины менее 0.01 мг КОН/г масла, то есть, до уровня погрешности изменения стандартным титрометрическим методом – таблица 4.

Таблица 4

Table 4

Кислотные числа (КЧ) исходных и очищенных адсорбентами образцов масел

Acid numbers (KCN) of the initial and adsorbent-purified oil samples

| Исходные масла | | Используемый для очистки масел адсорбент | | | | | |
|----------------|--------------|--|--------------|--------------------|--------------|-----------------|--------------|
| | | Силикагель КСКГ | | Силикагель АС-230Ш | | Фуллерова земля | |
| Образец | КЧ, мг КОН/г | Образец | КЧ, мг КОН/г | Образец | КЧ, мг КОН/г | Образец | КЧ, мг КОН/г |
| I | 0.04 | Ia | <0.01 | Ib | <0.01 | – | – |
| II | 0.08 | IIa | <0.01 | IIb | <0.01 | – | – |
| III | 0.14 | IIIa | <0.01 | IIIb | <0.01 | – | – |
| IV | 0.02 | – | – | – | – | IVc | <0.01 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Цвет всех масел в процессе очистки изменился от темно-коричневого до светло-желтого, что свидетельствует об удалении из масел большей части полиароматических углеводородов (ПАУ). Таким образом, и силикагели, и Фуллерова Земля эффективно удаляют из масла полярные соединения, к которым относятся различные продукты окисления масла и ПАУ, а также коллоидные структуры масла.

Можно видеть, что дифференциальные спектры всех образцов масел практически полностью расположены выше оси абсцисс. Кроме того, сравнение этих спектров с дифференциальными спектрами искусственно окисленных масел (рис. 5 справа) показывает, что интенсивность полос поглощения при 4665 см^{-1} и 4600 см^{-1} намного выше, нежели в дифференциальных спектрах искусственно окисленных масел. Из этого следует, что содержание непредельных углеводородов в них также существенно выше. Основной причиной этого является то, что старые трансформаторные масла в своё время были произведены по технологиям кислотно-щелочной и селективной очистки. Эти технологии, в отличие от современной технологии гидрокрекинга, не позволяли эффективно удалять из масел непредельные углеводороды. Именно такие трансформаторные масла в настоящее время поступают на регенерацию.

Анализ изменения спектров образцов масел I, II и III показывает, что интенсивность полос поглощения непредельных соединений после очистки силикагелями снижается в среднем менее чем на 25 %. На основе полученного результата можно сделать вывод, что после адсорбционной очистки минерального масла большая часть непредельных соединений, как и предполагалось, остается в очищенных маслах. В отечественной практике большинство силовых трансформаторов снабжено термосифонными или адсорбционными фильтрами, заполняемых адсорбентами марки КСКГ [21]. При этом масса используемого адсорбента по отношению к массе масла в трансформаторе несоизмеримо меньше, нежели чем в проведенных экспериментах. Исходя из представленных результатов, можно утверждать, что такие устройства не способны избавить трансформаторные масла от непредельных углеводородов.

На рисунке 7 представлены дифференциальные ИК спектры исходных и очищенных различными адсорбентами масел.

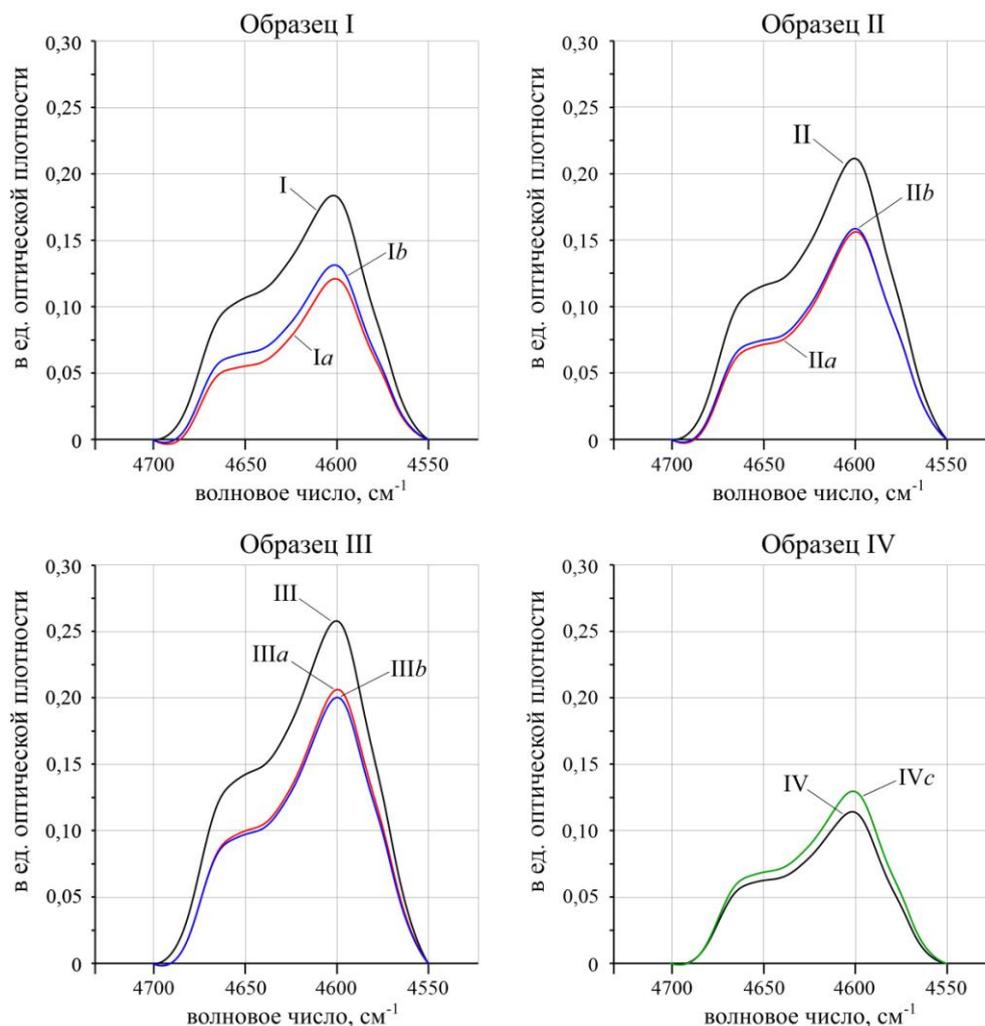


Рис. 7. Дифференциальные ИК спектры поглощения эксплуатационных и очищенных различными видами адсорбентов образцов минеральных масел. Обозначение образцов масел согласно таблице 3. Виды адсорбентов: *a* – КСКГ; *b* – АС230Ш; *c* – Фуллерова Земля

Fig. 7. Differential infrared absorption spectra of operational and cleaned by different types of adsorbents samples of mineral oils. Designation of samples of oils according to the table 3. Types of adsorbents: *a* - KSCG; *b* - AS230Sh; *c* - Fuller's Earth

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе регенерации масла Фуллеровой Землей в заводских условиях содержание непредельных соединений не только не уменьшилось, но и несколько увеличилось – образцы IV и IVc на рисунке 7. Такое anomальное изменение содержания непредельных соединений в очищенном масле можно объяснить технологическими потерями масла в регенерационной установке, которые, по данным специалистов завода по регенерации масел, доходят до 10 %. Поскольку непредельные углеводороды в основной массе являются неполярными соединениями, можно предположить, что их потери в регенерационной установке оказались в процентном выражении незначительными. Из этого можно сделать вывод, что относительное содержание непредельных углеводородов в процессе регенерации масла может даже увеличиваться.

В целом, результаты проведенных исследований наглядно демонстрируют, что термоокислительное старение минеральных трансформаторных масел всегда сопровождается процессом образования в маслах непредельных углеводородов с двойными С=C связями. На скорость этого процесса большое влияние оказывают температура и концентрация ингибитора окисления в масле.

Также показано, что процедура адсорбционной очистки масел, предназначенная для удаления из состаренных масел продуктов его деградации, в отношении непредельных углеводородов обладает низкой эффективностью.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что содержание непредельных соединений может служить в качестве дополнительного критерия качества масла, а также характеризует степень деградации его углеводородной основы.

Необходимо отметить, что проблема непредельных углеводородов наиболее остро стоит для масел, произведенных без использования технологии гидрокрекинга. Такими маслами заполнена большая часть эксплуатируемого трансформаторного оборудования. Эти же масла в перспективе могут быть подвергнуты процедуре регенерации и повторно использованы. В данной работе не ставилась цель разработки критерия критического содержания в масле непредельных соединений. Также не изученным является вопрос влияния исходного структурно-группового состава минерального масла на его устойчивость к образованию непредельных соединений. На основе результатов исследований, представленных в [24], а также теории окисления углеводородов [25], можно предположить, что масла, имеющие изопарафиновую основу, окажутся более стабильными, нежели нафтеновые масла.

В настоящее время представляется целесообразным осуществлять регулярный контроль содержания этих соединений в эксплуатационных трансформаторных маслах по интенсивности одного из характерных пиков в районе 4665 см^{-1} либо 4600 см^{-1} в ИК спектрах масел. При относительно высоком содержании в масле непредельных углеводородов также целесообразно использовать площадь под кривой дифференциального спектра.

Полученные результаты исследования также позволяют в большинстве случаев дифференцировать свежие минеральные трансформаторные масла, произведенные по технологии гидрокрекинга, от старых регенерированных масел. Такая задача имеет практическое значение, поскольку регенерированное масло намного дешевле свежего, а потребитель на основе анализа нормируемых показателей качества (цвет, кислотное число, пробивное напряжение и пр.) не имеет возможность определить, какое масло предоставил поставщик. В условиях устойчивого тренда на переход к экономике замкнутого цикла с повторным использованием всех составляющих силового трансформатора [26], и в первую очередь трансформаторного масла, актуальность этой проблемы будет только увеличиваться.

Суть метода дифференциации масел заключается в различии содержания непредельных соединений в свежих и старых регенерированных маслах. Для решения этой задачи производится построение дифференциальных ИК спектров по представленному в данной работе алгоритму. В качестве иллюстрации метода на рисунке 8 приведены исходные (измеренные) ИК спектры различных минеральных масел (слева), а также дифференциальные спектры тех же образцов масел (справа) [27].

На рисунке образцы 1÷3 – свежие масла марки ГК, ВГ и Nytro 11GX, произведенные по технологии гидрокрекинга. Образцы 4, 5 – старые окисленные трансформаторные масла; образец 6 – регенерированное масло.

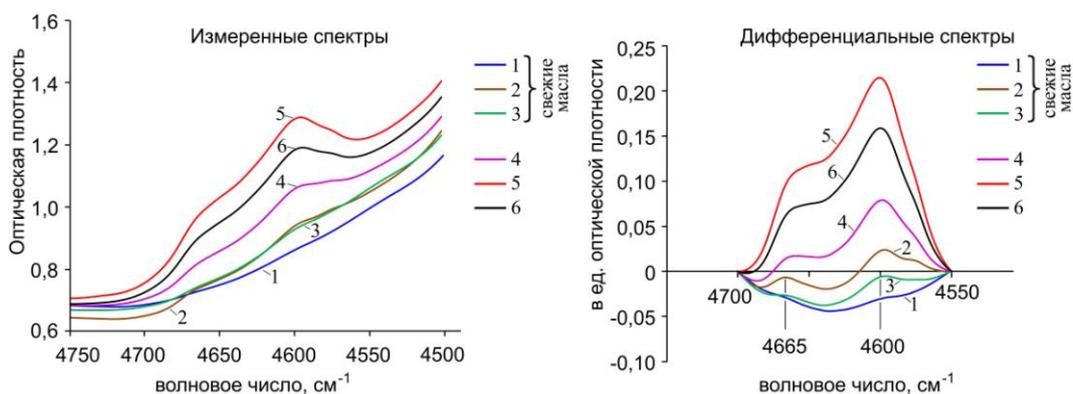


Рис. 8. Исходные (слева) и дифференциальные (справа) ИК спектры различных масел. Толщина кюветы – 10 мм. 1, 2, 3 – свежие масла ГК, ВГ и Nytro 11GX, соответственно; 4, 5 – окисленные трансформаторные масла; 6 – регенерированное масло

Fig. 8. Initial (left) and differential (right) IR spectra of different oils. The thickness of the cuvette is 10 mm. 1, 2, 3 - fresh GK, VG and Nytro 11GX oils, respectively. 4, 5 - old transformer oils; 6 - regenerated oil

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Можно видеть, что на дифференциальных ИК спектрах, соответствующих свежим маслам, пик полосы поглощения в районе 4665 см^{-1} располагается ниже оси абсцисс. В спектрах состаренных (4, 5) и регенерированного (6) масел указанный пик располагается выше оси абсцисс. Таким образом, положение пика 4665 см^{-1} выше оси абсцисс в

дифференциальном спектре исследуемого масла будет свидетельствовать о том, что анализируемое масло не является свежим.

Следует обратить внимание, что если минеральное масло было произведено не по современной технологии гидрокрекинга, а с использованием какой-либо устаревшей технологии (например, кислотно-щелочная или селективная очистка), то даже в образце свежего масла будет наблюдаться повышенное содержание непредельных углеводородных соединений. Примером таких масел являются масла марки Т-750, Т-1500У, ТКп и др. Для дифференциации свежих масел этого типа от регенерированных масел потребуется корректировка с точки зрения интенсивности пика в районе 4665 см^{-1} на ИК спектрах. Однако с каждым годом доля этих марок на рынке трансформаторных масел неуклонно снижается.

Заключение (Conclusions)

В настоящее время сформировано достаточно полное представление о процессах старения минерального трансформаторного масла в электрооборудовании и образующихся при этом продуктах его деградации. Содержание некоторых из них регулярно контролируется, поскольку они образуются в значительном количестве и оказывают заметное влияние на эксплуатационные характеристики масла. Например, регулярно определяется кислотное число масла, содержание в масле ароматических соединений, общее содержание растворенных в масле коллоидных соединений и т.д. На этом фоне непредельные углеводороды, содержащие двойные С=С связи, остаются вне поля зрения эксплуатационного персонала. Однако негативное влияние этих соединений на технические характеристики масла заставляет обратить внимание и на этот класс углеводородов.

В работе продемонстрировано, что определение содержания непредельных углеводородов в трансформаторных маслах методом йодного числа имеет большую погрешность и низкую воспроизводимость. В качестве альтернативы йодному числу предложено использовать ИК спектроскопию в ближней ИК области спектра. В качестве аналитических выбраны характерные полосы поглощения непредельных соединений с пиками в районе 4665 см^{-1} и 4600 см^{-1} . Для практического использования предложен алгоритм преобразования исходного измеренного ИК спектра в Дифференциальный ИК спектр, что позволяет получать воспроизводимые результаты.

С помощью ИК спектроскопии наглядно продемонстрирован рост содержания непредельных соединений в минеральном трансформаторном масле по мере увеличения интенсивности и длительности термоокислительной деструкции масла. Результаты модельных экспериментов также показывают, что современные способы очистки и регенерации трансформаторных масел, основанные на использовании технологии адсорбционной очистки, могут удалить из масел лишь незначительную часть непредельных углеводородных молекул.

Таким образом, общее содержание непредельных углеводородов в минеральном трансформаторном масле в определённой мере характеризует невозможность восстановления степени деструкции углеводородной основы масла. Для контроля глубины этого вида деградации масел возможно использование как интенсивности характерных полос поглощения непредельных углеводородов, так и площади под кривой дифференциальных ИК спектров масел.

В настоящее время повышенное содержание непредельных углеводородов характерно в первую очередь для старых эксплуатационных масел, при производстве которых не использовалась технология гидрокрекинга. Обладая относительно невысокой стабильностью к деградации, именно такие масла в основном поступают на повторную переработку. При этом проблема высокого содержания непредельных соединений становится актуальной уже для регенерированных масел, которые по формальным признакам и нормируемым показателям качества являются свежими трансформаторными маслами. На основе полученных результатов предложен способ дифференциации свежих минеральных трансформаторных масел, произведенных по технологии гидрокрекинга, от регенерированных масел.

Литература

1. Electrical insulating materials: International issues / Marcelo M. Hirschler, editor. ASTM: STP 1376. 2000.
2. Татур И.Р., Митин И.В., Спиркин В.Г., и др. Энергетические Масла. Часть II. Трансформаторные, кабельные и конденсаторные масла /Под ред. И.Р. Татура. М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2021. 218 с.
3. N'Cho J.S., Fofana I., Beroual A., et al. Aged Oils Reclamation: Facts and Arguments Based

on Laboratory Studies // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012. 19(5). pp. 1583-1592. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6311504.

4. Merkmale und unterschiede in der transformatorölgeregeneration in MCU- und CMM-R GlobeCore-anlagen. Доступно по: <https://globecore.de/publikationen/merkmale-und-unterschiede-der-transformatorölgeregeneration-mcu-und-cmm-r-globecore-anlagen/>. Ссылка активна на 15 июня 2023.

5. Брай И.В. Регенерация трансформаторных масел. М.: Химия, 1972, 168 с.

6. Safiddin L., Boucherit A., Zafour A.H.-Z., et al. Comparative study of the degradation rate of new and regenerated mineral oils following electrical stress // IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(21), pp. 5891-5897. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6077

7. Oumert L., Hadj-Ziane Zafour A., Fofana I., et al. Transformer Oil Regeneration by Combining Several Strategies Enhanced by the Use of Four Adsorbents // IET Generation, Transmission & Distribution. 2017. Vol. 11, Iss. 11, p. 2912-2920. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1995.

8. Туранов А.Н. Анализ методов диагностики доли ароматических групп в составе трансформаторных масел // Электричество. 2022. № 4. С. 72-77.

9. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983, 296 с.

10. Лосиков Б.В. Физико-химические основы регенерации масел. Москва-Ленинград: Гостоптехиздат, 1945, 140 с.

11. Иванов В.С., Фридман С.М. Справочник химика-энергетика. Т. 2. Энергетические масла и смазочные материалы / под общей ред. С.М. Гурвича. М.: Энергия, 1972. 280 с.

12. Львова М.М., Комаров В.Б., Кулюхин С.А., и др. Исследование эффективности применения силикагелевых сорбентов в фильтрах непрерывной очистки масла силовых трансформаторов // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 2 (29). С. 49-54.

13. Высокорец С.П. Разработка методики экспресс-анализа параметра качества изоляционного масла // Надежность и безопасность энергетики, 2018, Т. 11, № 1, с. 41-47.

14. Boreham C.J., Jinadasa N., Sohn J., et al. Characterisation of radiogenic monoalkenes in Australian oils and condensate // Organic Geochemistry. 2022. Vol. 163, 104332. doi.org/10.1016/j.orggeochem.2021.104332

15. Станьковски Л., Дорогочинская В.А., Тонконогов Б.П., Молоканов А.А. Промышленные технологии переработки отработанных масел // Мир нефтепродуктов. 2021. № 1, С. 44-57.

16. Саблина З.А., Широкова Г.Б., Ермакова Т.И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. М.: Химия, 1978. 240 с.

17. Крищенко В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. М.: КРОНА-ПРЕСС, 1997. 638 с.

18. Elele U., Nekahi A., Arshad A., et al. Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review // *Sensors*. 2022. 22(20):7923. <https://doi.org/10.3390/s22207923>

19. Georgiev A., Karamancheva I., Topalova L. Determination of oxidation products in transformer oils using FT-IR spectroscopy // *Journal of Molecular Structure*. 2008. 872(1).pp. 18-23. DOI: 10.1016/j.molstruc.2007.02.014.

20. Application of IR spectroscopy to control oxidation inhibitor (ionol) concentration in mineral transformer oils / M. S. Garifullin, A. R. Bikzinurov, Y. N. Solobodina [et al.] // E3S Web of Conferences, Kazan, 21–26 сентября 2020 года. Vol. 216. – Kazan: EDP Sciences, 2020. – P. 01056. – DOI 10.1051/e3sconf/202021601056. – EDN VSNXMM.

21. Garifullin M.Sh., Solobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 216, 01055. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601055>

22. Татур И.Р., Спиркин В.Г., Шуварин Д.В., и др. Регенерация отработанных трансформаторных масел с применением алюмосиликатов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2017. №2. С. 17-21.

23. Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К. Особенности диагностики и мониторинга силового трансформаторного оборудования, наполненного жидким диэлектриком на основе натуральных сложных эфиров // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2013. №9-10. С. 59-68.

24. Lukenda N. Not all mineral oils are equal // *Transformers Magazine*. 2019. Vol. 6, №4, pp. 112-117.

25. Уотерс У.А. Механизм окисления органических соединений, М.: Мир, 1966. 175 с.

26. Wachter B.D., Jezdinsky T. The circularity of medium-power electrical transformers // *Transformers Magazine*. 2022. Vol. 9, Issue 1. pp. 84-89.

27. Гарифуллин М.Ш., Слободин Ю.Н., Бикзинуров А.Р. Способ дифференциации свежего минерального трансформаторного масла от регенерированного. Патент РФ на изобретение

Авторы публикации

Гарифуллин Марсель Шарифьянович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Слободина Юлия Николаевна – магистр, выпускник кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Бикзинуров Азат Рашитович – магистр, выпускник кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гиниатуллин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривода и электротехники» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ)

Чернышов Вадим Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры "Электрооборудование и энергосбережение" Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева).

References

1. Electrical insulating materials: International issues / Marcelo M. Hirschler, editor. ASTM: STP 1376. 2000.

2. Tatur I.R., Mitin I.V., Spirkin V.G.; editors Tatur I.R. *Ehnergeticheskie Masla. Chast' II. Transformatornye, kabel'nye i kondensatornye masla*. М.: RGU nefti i gaza (NIU) im. IM Gubkina, 2021. (In Russ).

3. N'Cho J.S., Fofana I., Beroual A., et al. Aged Oils Reclamation: Facts and Arguments Based on Laboratory Studies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012. 19(5): pp. 1583-1592. DOI: 10.1109/TDEI.2012.6311504.

4. Merkmale und unterschiede in der transformatorölnregeneration in MCU- und CMM-R GlobeCore-anlagen. Available at: <https://globecore.de/publikationen/merkmale-und-unterschiede-der-transformatoroenolregeneration-mcu-und-cmm-r-globecore-anlagen/>. Accessed 15 June 2023.

5. Brai I.V. *Regeneratsiya transformatornykh masel*. М.: Khimiya; 1972. (In Russ)

6. Safiddin L., Boucherit A., Zafour A.H.-Z., et al. Comparative study of the degradation rate of new and regenerated mineral oils following electrical stress. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. 12(21): 5891-5897. DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6077

7. Oumert L., Hadj-Ziane Zafour A., Fofana I., et al. Transformer Oil Regeneration by Combining Several Strategies Enhanced by the Use of Four Adsorbents. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 11, Iss. 11: 2912-2920. DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1995.

8. Turanov A.N. Analiz metodov diagnostiki doli aromatcheskikh grupp v sostave transformatornykh masel. *Ehlektrichestvo*. 2022. № 4: 72-77.

9. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. *Transformatornoe maslo*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1983. (In Russ).

10. Losikov B.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy regeneratsii masel*. Moskva-Leningrad: Gostoptekhizdat, 1945. (In Russ).

11. Ivanov V.S., Fridman S.M.; Gurvich S.M., editors. *Spravochnik khimika-ehnergetika. T. 2. Ehnergeticheskie masla i smazochnye materialy*. Moscow: Ehnergiya, 1972. (In Russ).

12. Lvova M.M., Komarov V.B., Kulukhin S.A., et al. Issledovanie ehffektivnosti primeneniya silikagelevykh sorbentov v fil'trakh nepreryvnoi ochistki masla silovykh transformatorov. *Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki*. 2015, 29(2): 49-54.

13. Vysogorets S.P. Razrabotka metodiki ehkspres-analiza parametra kachestva izolyatsionnogo masla. *Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki*. 2018. 1: 41-47.

14. Boreham C.J., Jinadasa N., Sohn J., et al. Characterisation of radiogenic monoalkenes in Australian oils and condensate. *Organic Geochemistry*. 2022. Vol. 163, 104332. doi.org/10.1016/j.orggeochem.2021.104332

15. Stan'kovski L., Dorogochinskaya V.A., Tonkonogov B.P., et al. Promyshlennyye tekhnologii pererabotki otrabotannykh masel. *Mir nefteproduktov*. 2021. № 1: 44-57.

16. Sablina Z.A., Shirokova G.B., Ermakova T.I. *Laboratornye metody otsenki svoistv motornykh*

i reaktivnykh topliv. Moscow: Khimiya; 1978. (In Russ).

17. Krishchenko V.P. *Blizhnyaya infrakrasnaya spektroskopiya*. Moscow: KRONA-PRESS; 1997. (In Russ).

18. Elele U., Nekahi A., Arshad A., et al. Towards Online Ageing Detection in Transformer Oil: A Review. *Sensors*. 2022; 22(20):7923. <https://doi.org/10.3390/s22207923>

19. Georgiev A., Karamancheva I., Topalova L. Determination of oxidation products in transformer oils using FT-IR spectroscopy. *Journal of Molecular Structure*. 2008. 872(1): 18-23. DOI: 10.1016/j.molstruc.2007.02.014.

20. Garifullin M.Sh., Lyutikova M.N., Kuchkarova A.R., Bikzinurov A.R., Solobodina Y.N. Application of IR spectroscopy to control oxidation inhibitor (ionol) concentration in mineral transformer oils // E3S Web of Conferences 216, 01056 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601056>

21. Garifullin M.Sh., Solobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 216, 01055. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601055>

22. Tatur I.R., Spirkin V.G., Shuvarin D.V., et al. Regeneratsiya otrabotannykh transformatornykh masel s primeneniem alyumosilikatov. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse*. 2017; 2:17-21.

23. Garifullin M.Sh., Kozlov V.K. Features of diagnostics and monitoring of power transformer equipment filled with liquid dielectric on the basis of natural esters. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*, 2013. № 9-10: 59-68.

24. Lukenda N. Not all mineral oils are equal. *Transformers Magazine*. 2019. Vol. 6, №4:112-117.

25. Waters W.A. *Mechanism of oxidation of organic compounds*. New York: Wiley, 1964. (Russ. ed.: Uoters U.A. Mekhanizm okisleniya organicheskikh soedinenii. Moscow: Mir Publ., 1966; 175 p.).

26. Wachter B.D., Jezdinsky T. The circularity of medium-power electrical transformers // *Transformers Magazine*. 2022. Vol. 9, Issue 1. pp. 84-89.

27. Garifullin M.Sh., Slobodina Yu.N., Bikzinurov A.R. *Sposob differentsiatsii svezhego mineral'nogo transformatornogo masla ot regenerirovannogo*. Patent RUS № 2775165. 10.7.2022. Byul. №19. Available at: <https://fips.ru/EGD/bb086f39-089b-4d6e-819d-fed59106397c>. Accessed: 15 June 2023. (In Russ).

Authors of the publication

Marsel Sh. Garifullin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yulia N. Slobodina - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat R. Bikzinurov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ruslan A. Giniatullin - Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Vadim A. Chernyshov - Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено

15.06.2023 г.

Отредактировано

03.10.2023 г.

Принято

01.11.2023 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ПОЛИМЕРНОГО ИЗОЛЯТОРА ПРИ УВЛАЖНЕНИИ ИСКУССТВЕННЫМ ТУМАНОМ

Зарипов¹ Д.К., Насибуллин² Р.А., Закиров¹ Д.Ф., Захаров¹ А.В.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

dzaripov@list.ru, nasrus@yandex.ru, qwerty2014dinar@gmail.com, koktel42@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Подвесные изоляторы, техническое состояние которых в значительной мере определяет надёжность электроснабжения потребителей различных категорий, являются одним из наиболее повреждаемых элементов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) [1-2]. Это связано в первую очередь с тем, что в процессе своей эксплуатации, изоляторы подвергаются воздействию различных климатических условий, оказывающих прямое влияние на их изоляционные свойства. Причем, наибольшее влияние атмосферные осадки, такие как дождь, туман или роса оказывают именно в сочетании с различными твердыми, жидкими и газообразными частицами, оседающими на поверхности изолятора из воздуха, и образующими слой поверхностного загрязнения. Увлажнение этого слоя повышает электропроводимость всей изоляционной конструкции ВЛЭП и уменьшает ее изоляционную способность. Изучение влияния увлажнения загрязненной поверхности подвесной изоляции на их разрядные характеристики является актуальной научной задачей и по сей день. Решение данной задачи позволит развить существующие представления о механизмах формирования и развития разрядов на загрязненной и увлажненной поверхности изоляции и сформулировать соответствующие диагностические признаки, применимые для осуществления контроля состояния подвесных изоляторов ВЛЭП. ЦЕЛЬ. Провести лабораторные исследования, направленные на изучение поведения подвесных высоковольтных полимерных изоляторов воздушных линий электропередачи при их увлажнении. Сформулировать соответствующие диагностические признаки, применимые для осуществления контроля состояния подвесных изоляционных конструкций воздушных линий электропередачи в процессе их эксплуатации. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись экспериментальные методы исследования, заключающиеся в моделировании работы загрязнённого полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана с применением специальной экспериментальной установки, разработанной авторами данной статьи. РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате проведенных лабораторных исследований, путем непрерывной регистрации значений токов утечки, а также сигналов, поступающих с дистанционного датчика, были выявлены характерные при увлажнении загрязненной изоляции особенности, которые можно использовать в качестве диагностических признаков в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; подвесные полимерные изоляторы; разрядные характеристики; увлажнение изоляции; диагностические признаки.

Для цитирования: Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 20-29. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.

STUDY OF OPERATION OF A POLYMER INSULATOR UNDER UNIFORM AND NON-UNIFORM CONTAMINATION

Zaripov¹ D.K., Nasibullin² R.A., Zakirov¹ D.F., Zakharov¹ A.V.

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²PJS Company «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

dzaripov@list.ru, nasrus@yandex.ru, qwerty2014dinar@gmail.com, koktel42@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Suspended insulators, the technical condition of which largely determines the reliability of power supply to consumers of different categories, are one of the most damaged elements of overhead power transmission lines [1-2]. This is primarily due to the fact that during their operation, insulators are exposed to various climatic conditions that have a direct impact on their insulating properties. Moreover, precipitation, such as rain, fog or dew, has the greatest impact precisely in combination with various solid, liquid and gaseous particles deposited on the insulator surface from the air, and forming a layer of surface contamination. Wetting this layer increases the electrical conductivity of the entire overhead line insulation structure and reduces its insulating capacity. Study of influence of dampening of contaminated surface of suspended insulation on their discharge characteristics is an urgent scientific task. The solution of this task enables to develop the existing understanding of the mechanisms of formation and development of discharges on the contaminated and wetted surface of insulation and to formulate the appropriate diagnostic attributes applicable to control the condition of the overhead power line insulators. *OBJECTIVE.* To carry out laboratory research aimed at studying the behavior of suspended high-voltage polymer insulators of overhead power lines when they are moistened. To formulate appropriate diagnostic attributes applicable for control of condition of suspended insulators of overhead power lines during their operation. *METHODS.* At the solution of the posed problem experimental methods of research, consisting in simulation of work of the contaminated polymeric insulator in the atmosphere of a pure fog with application of the special experimental installation developed by the authors of this article were applied. *RESULTS.* As a result of laboratory research, by continuous registration of leakage current values, as well as signals coming from the remote sensor, characteristic features of contaminated insulator humidification were revealed, which can be used as diagnostic signs in the process of their operation.

Keywords: *overhead transmission lines; suspended polymer insulators; discharge characteristics; insulation wetting; diagnostic signs.*

For citation: Zaripov D.K., Nasibullin R.A., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 20-29. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29.

Введение (Introduction)

Надежность электроснабжения потребителей различных категорий зависит от состояния воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), а также от состояния, установленного на них оборудования, такого как изоляторы, линейная арматура, разрядники и прочее. Согласно информационной бюллетени, выпущенной Исполнительным комитетом Электроэнергетического Совета СНГ [1], за 2020 год в ЕЭС России было зафиксировано 16 215 технологических нарушений, 57,4% из которых были вызваны аварийными отключениями ЛЭП напряжением 110 кВ и выше. В период с января по сентябрь 2021 года количество аварийных отключений ЛЭП увеличилось на 4% по сравнению с прошлым годом и составило 61,4% [2]. При этом одним из наиболее повреждаемых элементов ВЛЭП оказались высоковольтные изоляторы. Их повреждение или перекрытие стали причиной 17,3% аварийных отключений в 2020 году.

Сегодня многие энергетические предприятия предпочитают использовать некерамические (полимерные) изоляторы вместо традиционных керамических (фарфоровых, стеклянных). Причины расширения использования некерамических изоляторов заключаются в сочетании усовершенствованных конструкций изделий, все более благоприятного опыта эксплуатации и ценовых преимуществ по сравнению с традиционными керамическими аналогами. Полимерные изоляторы, демонстрируя длительное сохранение гидрофобности, показывают значительно лучшие результаты в электрической прочности чем гидрофильные керамические. Для гидрофобного изолятора процесс смачивания намного сложнее, так как поверхностная вода имеет тенденцию коагулировать в отдельные изолированные области, что препятствует формированию непрерывного пути тока утечки. Кроме того, если материал представляет собой силиконовый каучук, низкомолекулярные цепи полимерного материала достаточно подвижны чтобы диффундировать с поверхности материала в слой загрязнения, а сам поверхностный слой оставаться гидрофобным. Сопротивление слоя зависит от воды, которая мигрирует в нижележащий загрязняющий слой, и растворимости солей. Совместное воздействие омического нагрева в слое и приложенного электрического поля на

капли воды приводит к образованию нитей высокого сопротивления на поверхности изолятора. Точечные разряды, исходящие из нитей, вызывают локальную потерю гидрофобности, увеличение длины нитей и, если результирующая напряженность электрического поля нитей превышает напряженность дуги, может произойти перекрытие электрической дугой всего изолятора [3].

Особенность полимерных подвесных изоляторов также заключается в том, что меньшее расстояние между навесами (юбками) по сравнению с керамическими линейными изоляторами облегчает перекрытие промежутка дугой. Расстояние между юбками керамических линейных изоляторов обычно составляет 15 см. Для некерамических линейных изоляторов оно меньше, обычно в диапазоне от 5 до 10 см. Более короткое расстояние между юбками некерамических изоляторов должно сделать их более благоприятными для перекрытия. Таким образом, может существовать по крайней мере еще один механизм, который может вызвать перекрытие в дополнение к обычному процессу.

Испытания на чистый туман вносит значительный вклад в представление о механизме перекрытия изоляторов в процессе эксплуатации. В частности, было доказано существование механизма, заключающегося в стримерном разряде, который пересекает несколько юбок изолятора и приводит к перекрытию [4]. Наличие сухой зоны (области высокого сопротивления) создает крайне неоднородное распределение напряжения вдоль поверхности, инициировав тем самым стримеры. Было показано, что накопленная емкостная энергия играет существенную роль в возникновении такого рода разряда. Важное практическое значение перекрытия, инициированного стримерным разрядом, заключается в том, что характеристики перекрытия нелинейно связаны с длиной пути утечки.

Неравномерное смачивание, приводящее к появлению областей с сильно различающимся поверхностным сопротивлением по длине изолятора, может возникать в процессе эксплуатации различными способами. Например, на длинном изоляторе разряды могут начаться в относительно сухих областях под навесами. Локализованные разряды могут также возникать на концах изолятора из-за высокого напряжения в этих областях. Известно, что концевая арматура изолятора может достигать температуры более 50°C из-за тока в несущем проводе [5]. Это вызывает повышение температуры поверхности части изолятора вблизи провода. Для предотвращения конденсации влаги при выпадении росы достаточно лишь небольшого изменения (1-2°C) температуры поверхности по сравнению с окружающей средой [6]. Известный механизм отключений в ранние утренние часы заключается в неравномерном смачивании гирлянды изоляторов туманом или росой. При нагреве нижних частей изоляционной конструкции они могут оставаться сухими и потенциал земли передается вниз по смоченной части и становится приложенным в основном к части, контактирующей с проводником тока. Эта часть перекрывается стримерами и может инициировать мокрое включение оставшейся части изоляции и привести к перекрытию всей изоляционной конструкции [4]. Другим фактором, который может привести к неравномерному смачиванию некерамических изоляторов, является сам материал полимера, на смачиваемость которого, как известно, в разной степени влияют выветривание и другие факторы (электрическое напряжение, разряды). Естественное смачивание изолятора в условиях ветрового напора или тумана может быть неравномерным из-за формы и наклона поверхностей.

В нормальных условиях эксплуатации изоляторы постоянно находятся под напряжением, и ожидается, что при значительных токах в проводах, возникновение любого внезапного смачивания может запустить механизм дугового перекрытия изоляционной конструкции такого типа.

Исследование работы полимерного изолятора при его увлажнении искусственным туманом вносит вклад в развитие существующих представлений о механизмах формирования и развития разрядов на загрязненной и увлажненной поверхности изоляции, что имеет важное научное значение. Практическая значимость данного исследования заключается в определении диагностических признаков, применимых в дальнейшем для контроля состояния изоляционных конструкций и разработке соответствующих им методов и средств диагностики, позволяющих определять текущее техническое состояние изоляторов, а также прогнозировать возможность возникновения разрядов, что является важным фактором в обеспечении надежной и эффективной эксплуатации высоковольтного оборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время основным методом диагностирования полимерных изоляторов на ВЛЭП является визуальный осмотр. Ограниченно применяются тепловизионные и

ультрафиолетовые камеры [7]. Общий недостаток перечисленных методов – периодичность контроля. Диагностирование выполняется днем, в сухую погоду, когда эффекты от загрязнения не проявляются. Здесь необходим постоянный контроль с помощью установленных на ВЛЭП датчиков.

Исследованию в лабораторных условиях поведения загрязненного полимерного изолятора при увлажнении путем непрерывной регистрации тока утечки и сигналов, установленного на удалении, емкостного датчика посвящена данная работа.

Моделирование работы загрязнённого полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана проводилось с применением экспериментальной установки, схема которой представлена на рисунке 1.

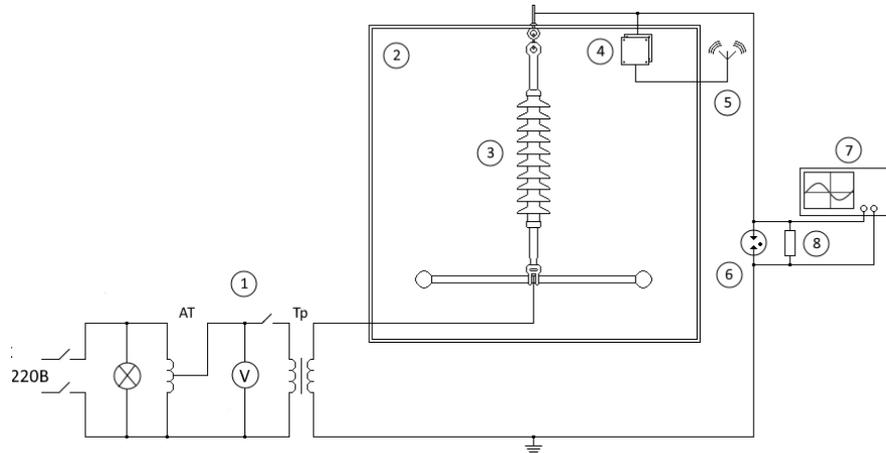


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – испытательная установка 110 кВ; 2 – климатическая испытательная камера (камера тумана); 3 – полимерный изолятор 4 – электрод емкостного датчика беспроводной системы контроля (СКИВЛ) [2]; 5 – передатчик СКИВЛ; 6 – разрядник; 7 – осциллограф; 8 – резистор (1000 Ом)

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup:

1 - 110 kV test setup; 2 - climatic test chamber (fog chamber); 3 - polymer insulator 4 - capacitive sensor electrode of wireless control system [2]; 5 - transmitter; 6 - discharge generator; 7 - oscilloscope; 8 - resistor (1000 Ohm)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Климатическая испытательная камера (рис. 1, 2) представляла собой куб со стенками, изготовленными из изоляционного материала с внутренним объемом 1 м³. В центре камеры устанавливался изолятор ЛК70/35 (рис. 1, 3), который подключался к испытательной установке (рис. 1, 1).

Туман, генерируемый пьезоэлектрическими элементами 2-х ультразвуковых увлажнителей, подавался внутрь камеры через два отверстия, находящиеся сверху и снизу задней стенки камеры. Скорость подачи пара для всех испытаний – 300 мл/ч. Температура и относительная влажность воздуха внутри испытательной камеры контролировалась датчиками.

Токи утечки по поверхности изолятора регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C, связанного с персональным компьютером (рис. 1, 7). Для защиты оборудования от перенапряжений применялся разрядник (рис. 1, 6) с импульсным током разряда 5 кА. Над объектом испытаний был закреплен электрод (рис. 1, 4) емкостного датчика беспроводной системы контроля изоляции воздушных линий (СКИВЛ) [8-12], предназначенного для непрерывной регистрации разрядной деятельности на изоляции.

Сигналы, регистрируемые датчиком, передавались через установленный снаружи камеры передатчик (рис. 1, 5) на приемный блок, подключенный к персональному компьютеру. Полученные данные отображались на экране в виде графиков высокочастотных и низкочастотных сигналов (ВЧС и НЧС).

Загрязнение изоляторов проводилось в соответствии с методом предварительного загрязнения (ПЗ), описанным в ГОСТ 10390–2015. В отличие от предварительного загрязнения керамических изоляторов, на чистый и сухой полимерный изолятор предварительно кистью наносился слой каолинового порошка.

Загрязнение изолятора производилось путем распыления водной суспензии загрязняющего вещества на его поверхность. В качестве загрязняющего вещества применялся водный раствор, содержащий 40 граммов каолинового порошка и 5–10 граммов

поваренной соли (NaCl) на 1 литр водопроводной воды. Удельная электропроводность воды составляла не более 200 мкСм/см. Полученная суспензия распылялась на поверхность изоляторов pulverизатором с расстояния не менее 30 см. Загрязнённый изолятор оставался подсыхать на срок от 24 до 36 часов. В результате, после высыхания, на поверхности изоляции образовывается достаточно прочный слой загрязнения.

Измеренная эквивалентная поверхностная плотность естественного солевого загрязнения изоляторов (ESDD) составляла 0,03–0,06 мг/см². Данный уровень характеризует слабое загрязнение.

Изолятор, подготовленный вышеописанным способом, помещался в климатическую испытательную камеру на время чуть более одного часа, включая несколько минут до и после часового увлажнения. Цель использования тумана в лаборатории заключается в имитации наиболее сильного смачивания, которому могут подвергаться загрязнённые изоляторы в процессе эксплуатации.

Исследования проводились длительным приложением к изолятору переменного напряжения 30 кВ с непрерывным увлажнением в камере до насыщения влагой слоя загрязнения. Температура окружающего воздуха в помещении при испытаниях была в пределах от 18°C до 24°C, относительная влажность воздуха составляла от 47 % до 64 %.

Для имитации неравномерности загрязняющего слоя участок изолятора под нижней юбкой оставался чистым. Подогрев нижней арматуры изолятора имитировался с помощью двух самонагревающихся грелок *Hand Warmer*, прикрепленных к нижнему оконцевателю изолятора.

Было проведено несколько экспериментов. Продолжительность увлажнения при каждом эксперименте составляла около 1 часа.

После завершения измерений тепловизором снимались термограммы изолятора.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Непрерывно в ходе экспериментов измерялись значения амплитуд синусоидальной составляющей и импульсов тока утечки, протекающего по поверхности равномерно и неравномерно загрязненной изоляции в ходе её увлажнения. Одновременно регистрировались сигналы, поступающие с датчика СКИВЛ.

Результаты измерений представлены в виде графиков, представленных на рисунках 2, 3 и 4.

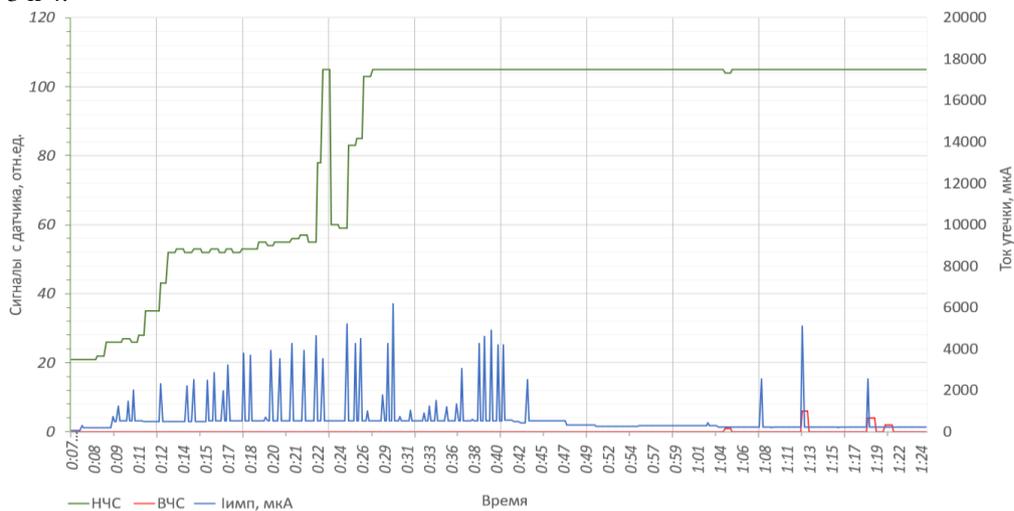


Рис. 2. Результаты измерений при равномерном загрязнении *Fig. 2. Measurement results with uniform contamination*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

При равномерном загрязнении (рис. 2) резкий рост амплитудных значений импульсов тока утечки (Имп) наблюдался на начальном этапе увлажнения изолятора. Максимальное амплитудное значение тока утечки при этом было около 6 мА. Высокочастотные сигналы (ВЧС) с датчика СКИВЛ не наблюдались, что говорит о малой частоте следования этих импульсов.

Появление импульсных токов утечки в начальный момент времени при равномерном загрязнении обусловлено неравномерностью увлажнения изолятора [13-15]. Слой загрязнения на изоляторе в этот момент времени ещё не достиг состояния насыщения, о чём может свидетельствовать график низкочастотных сигналов (НЧС). Полное насыщение слоя

загрязнения влагой происходит при уровне НЧС =105 (отн.ед.). Насыщение слоя загрязнения приводит к выравниванию распределения напряжения гирлянды и, как следствие, к снижению импульсного тока утечки на изоляторе. Позднее начинают работать редкие при слабом загрязнении периодические образования частичных дуг на поверхности, вызванные циклами подсыхания и увлажнения отдельных участков изолятора. Кроме того, как показали наблюдения, на краях юбок изолятора образуются водяные капли, вероятно, способствующие образованию стримеров с высокой частотой следования импульсов.

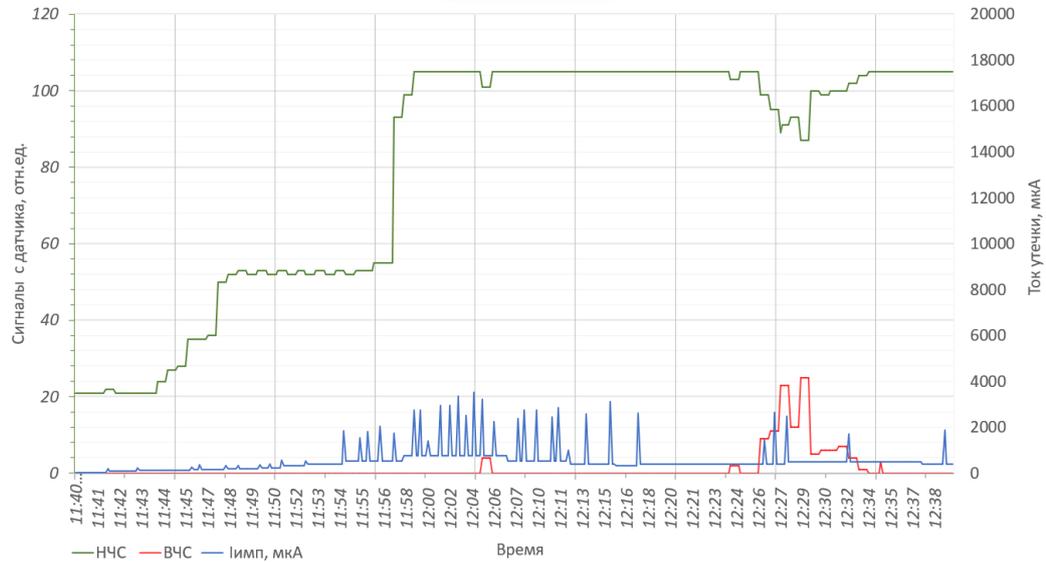


Рис. 3 – Результаты измерений при неравномерном загрязнении *Fig. 3 - Measurement results with non-uniform contamination*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

При неравномерном загрязнении (рис. 3) разрядная активность в начальный момент после подачи тумана не наблюдается и появляется по мере насыщения влагой загрязнения. В начале насыщения, из-за сохраняющейся неравномерности распределения напряжения над незагрязнённым участком изолятора с большим сопротивлением, на короткое время, вероятно, возникают часто следующие стримерные разряды. Они быстро пропадают и появляются большие по амплитуде с малой частотой следования импульсы от частичных дуг, вызванных циклами увлажнения и подсыхания под воздействием тока утечки отдельных участков изолятора. Позднее, из-за появления капель на краях юбок, появляются стримеры со значительно большей интенсивностью и частотой, чем при равномерном загрязнении (рис. 2).

В целом токи утечки при равномерном загрязнении выше, что косвенно подтверждается снимками с тепловизора, полученными примерно через 2 мин по завершении эксперимента (рис. 4). Температурные неоднородности на термограммах вызваны неодинаковым сопротивлением различных участков поверхности изолятора из-за неоднородности загрязнения и увлажнения. Температура на равномерно загрязненном изоляторе немного выше из-за большего тока утечки, как и ожидалось (рис. 5).

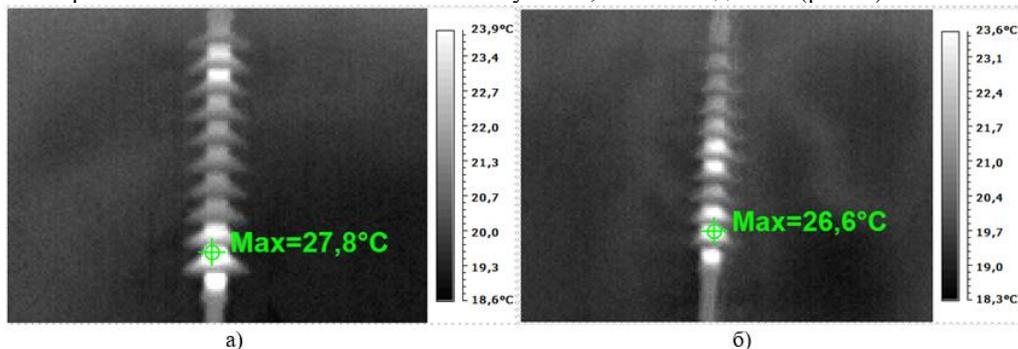


Рис. 4. Термограммы изолятора при равномерном (а) и неравномерном (б) загрязнении после окончания экспериментов *Fig. 4. Thermograms of the insulator at uniform (a) and non-uniform (b) contamination after the experiments*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

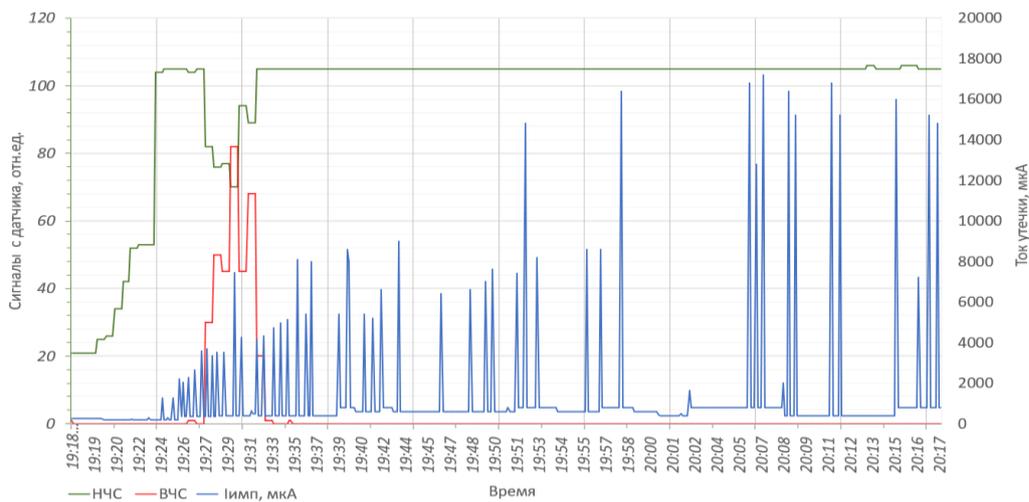


Рис. 5 – Результаты измерений при равномерном загрязнении с подогревом нижнего оконцевателя изолятора
 Fig. 5 - Results of measurements with uniform contamination with heating of the bottom insulator terminal

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Важным отличием графиков на рисунках 1 и 5 является появление высокочастотных сигналов, регистрируемых емкостным датчиком (ВЧС) через несколько минут после подачи пара и насыщения слоя загрязнения на изоляторе с подогревом. Это вызвано, вероятно, тем, что из-за подогрева (рис. 6 а) к тому моменту нижняя часть изолятора еще не смочилась и образовался большой градиент напряжения над сухим участком, что обусловило появление стримеров. Частота следования стримеров на порядки выше частоты следования импульсов тока утечки, вызванных загрязнением [16]. Далее, по мере смачивания сухого участка, напряжение вдоль изолятора выровнялось и ВЧ разряды пропали. Характер разрядов в обоих случаях стал схожим и соответствующим частичным разрядам на загрязненной и увлажненной поверхности. Можно отметить также, что интенсивность импульсов, регистрируемых осциллографом в эксперименте с подогревом, была выше. Нагрев поверхности протекающими токами утечки тоже был выше, чем в ситуации без подогрева, что связано с большей неравномерностью распределения напряжения, сохраняющегося в ходе второго эксперимента (рис. б).

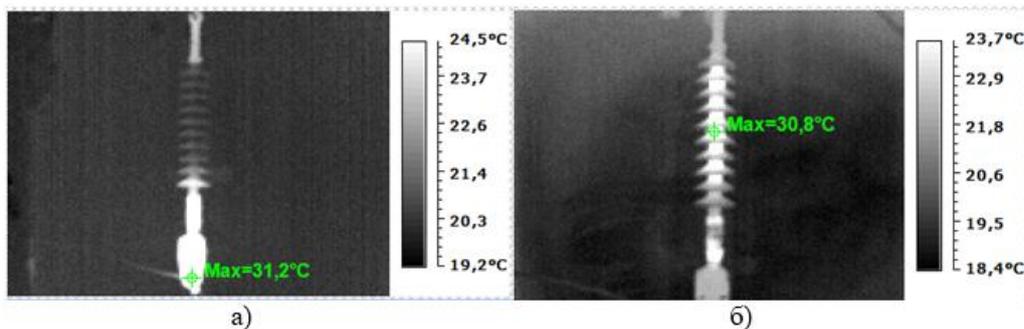


Рис. 6 – Термограммы с установленными нагревателями до начала (а) и после окончания (б) эксперимента
 Fig. 6 - Thermograms with heaters installed before (a) and after (b) the experiment

Заключение (Conclusions)

1. Впервые проведено комплексное исследование, с использованием различных устройств контроля, поведения загрязненного полимерного изолятора в процессе увлажнения.

2. Впервые проведенные исследования поведения неравномерно увлажняемого туманом полимерного изолятора дополняет представление о механизмах перекрытия изоляции в процессе эксплуатации. Сохранение в процессе увлажнения некоторое время сухой области (области высокого сопротивления) на поверхности изолятора создает крайне неоднородное распределение напряжения вдоль нее, инициировав тем самым стримерные

разряды существенно более высокой частоты, чем частичные дуги над сухими полосами в результате подсыхания участков токами утечки.

Важное практическое значение исследований перекрытия, инициированного стримерным разрядом, заключается в том, что характеристики перекрытия нелинейно связаны с длиной пути утечки в отличие от стандартного механизма перекрытия при образовании сухой полосы, служащего основой сегодня для выбора изоляции ВЛЭП. Перекрытие изоляции может происходить при меньших напряжениях. Проведенные исследования могут способствовать уточнению существующих стандартов.

3. Исследован новый механизм возникновения разрядной деятельности на изоляторе при увлажнении, вызванный токами, протекающими по несущему проводу. Значительные токи в проводе вызывают неравномерный нагрев изоляторов и, как следствие, образование сухой зоны в начальный момент при опускании тумана и выпадения росы, что может являться одной из причин внезапных коротких замыканий из-за перекрытия изоляционных конструкций на ВЛЭП. Таким образом, для предотвращения перекрытий необходимо своевременно выявлять данные факторы и принимать соответствующие меры в процессе эксплуатации изоляции.

4. Проведенные исследования показали, что характер разрядной деятельности на поверхности полимерного изолятора при загрязнении схож с таковым для гирлянды подвесных стеклянных изоляторов. Это связано с тем, что загрязнение поверхности полимерного изолятора приводит к частичной и вероятно временной потере гидрофобности. Однако, при таких же уровнях воздействующего напряжения и загрязнения у полимерного изолятора наблюдаются меньшие значения токов утечки и интенсивности разрядов по сравнению с гирляндой стеклянных изоляторов.

5. Представленная в статье методология и результаты могут быть использованы при разработке новых систем диагностики состояния изоляционных конструкций, а также новых методов обеспечения надёжности и эффективности эксплуатации высоковольтного оборудования.

Литература

1. Обзор аварийности и травматизма в электроэнергетических системах государств-участников СНГ за 2020 год: инф. бюллетень № 21. Исполнительный комитет Электроэнергетического совета СНГ, 2021. 141 с.
2. В России участились аварии на энергообъектах [Электронный ресурс] // Известия Iz: [сайт]. [2021]. URL: <https://iz.ru/1248071/2021-11-11/v-rossii-uchastilis-avarii-na-energoobektakh> (дата обращения: 25.11.2021).
3. A. C. Baker et al., "Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1633-1641, July 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2024666.
4. F. A. M. Rizk and S. I. Kamel, "Modelling of HVDC wall bushing flashover in nonuniform rain," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1650-1662, Oct. 1991, doi: 10.1109/61.97704.
5. L. a. Insulator, "Minimum Test Requirements for Non-Ceramic Insulators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2, pp. 882-890, Feb. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316947.
6. R. S. Gorur et al., "Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 1, pp. 79-87, Feb. 1997, doi: 10.1109/94.590870.
7. Learning from Service Experience with Composite Line Insulators [Электронный ресурс] // INMR Enriching Technical Knowledge of T&D Professionals: [сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/learning-from-service-experience-with-composite-line-insulators-2/>
8. Патент № 2517776 РФ, МПК G01R 31/08. Способ оптической дистанционной диагностики изолирующей конструкции / Зарипов Д.К.; заяв. и патентообл. Зарипов Д.К. № 2012151785/28; заявл. 03.12.2012; опубл. 27.05.2014, 6 с.5. Массомер CORIMASS 10G+ MFM 4085 K/F [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://cdn.krohne.com/dlc/MA_CORIMASS_G_ru_72.pdf.
9. Патент №2660754 РФ, МПК G01R 31/08. Световой индикатор состояния изолирующей конструкции /Зарипов Д.К. Насибуллин Р.А., Маргулис С.М., Ибрагимов Р.Р., Игтисамов М.Ч.; заявитель и патентообладатель ОАО «Сетевая компания» № 2017125424; заявл. 14.07.2017; опубл. 09.07.2018 Бюл. № 19, 10 с.
10. Патент № 2731169 С1 РФ, МПК G01R 31/08. Датчик для системы непрерывного контроля состояния изолирующих конструкций: № 2019145586; заявл. 30.12.2019; опубл. 31.08.2020 / Д. К. Зарипов, Р. А. Насибуллин, Р. Р. Ибрагимов, М. Ч. Игтисамов.

11. Зарипов, Д. К. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции / Д. К. Зарипов, Т. В. Лопухова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2006. – № 3-4. – С. 56-60. – EDN KFQJUT.

12. Зарипов, Д. К. Распределенная система контроля изоляции воздушных линий и подстанций на основе беспроводных датчиков емкостного типа / Д. К. Зарипов, Р. А. Насибуллин, Д. Ф. Закиров // . – 2022. – № 1. – С. 8-17. – DOI 10.25791/pribor.1.2022.1314. – EDN ABQNHUI.

13. Зарипов Д. К. Исследование возможности диагностирования изоляторов воздушных линий электропередачи в условиях увлажнения при равномерном загрязнении / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.

14. Зарипов Д. К. Исследование возможности диагностирования изоляторов воздушных линий электропередачи для предупреждения немотивированных отключений / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.

15. Зарипов, Д. К. Исследование возможности диагностирования гирлянды равномерно загрязнённых изоляторов в условиях увлажнения / Д. К. Зарипов, Д. Ф. Закиров, А. В. Петров // Актуальные проблемы транспорта и энергетики: пути их инновационного решения : Материалы X Международной научно-практической конференции, Нур-Султан, 17 марта 2022 года.

16. В. Ф. Тарасенко, В. С. Кузнецов, В. А. Панарин, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, Е. Х. Бакшт, "Роль стримеров в формировании коронного разряда при резко неоднородном электрическом поле", Письма в ЖЭТФ, 110:1 (2019), 72–77; JETP Letters, 110:1 (2019), 85–89

Авторы публикации:

Зарипов Дамир Камилевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова (ЭС), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Насибуллин Рустем Анасович - канд. техн. наук, ведущий инженер-электроник ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Закиров Динар Файзелханович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Захаров Артем Владимирович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

References

1. Obzor avarijnosti i travmatizma v elektroenergeticheskikh sistemah gosudarstv-uchastnikov SNG za 2020 god: inf. byulleten' № 21. Ispolnitel'nyj komitet Elektroenergeticheskogo soveta SNG, 2021. 141 s.

2. V Rossii uchastilis' avarii na energoob'ektakh [Elektronnyj resurs] // Izvestiya Iz: [cajt]. [2021]. URL: <https://iz.ru/1248071/2021-11-11/v-rossii-uchastilis-avarii-na-energoobektakh> (data obrashcheniya: 25.11.2021).

3. A. C. Baker et al., "Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 3, pp. 1633-1641, July 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2024666.

4. F. A. M. Rizk and S. I. Kamel, "Modelling of HVDC wall bushing flashover in nonuniform rain," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 4, pp. 1650-1662, Oct. 1991, doi: 10.1109/61.97704.

5. L. a. Insulator, "Minimum Test Requirements for Non-Ceramic Insulators," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2, pp. 882-890, Feb. 1981, doi: 10.1109/TPAS.1981.316947.

6. R. S. Gorur et al., "Sudden flashover of nonceramic insulators in artificial contamination tests," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 4, no. 1, pp. 79-87, Feb. 1997, doi: 10.1109/94.590870.

7. Patent № 2517776 RF, MPK G01R 31/08. Sposob opticheskoy distancionnoj diagnostiki izoliruyushchej konstrukcii / Zaripov D.K.; zayav. i patentoobl. Zaripov D.K. № 2012151785/28; zayavl. 03.12.2012; opubl. 27.05.2014, 6 s.5. Massomer CORIMASS 10G+ MFM 4085 K/F [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://cdn.krohne.com/dlc/MA_CORIMASS_G_ru_72.pdf.

8. Patent №2660754 RF, MPK G01R 31/08. Svetovoj indikator sostoyaniya izoliruyushchej konstrukcii /Zaripov D.K. Nasibullin R.A., Margulis S.M., Ibragimov R.R., Igtisamov M.CH.; zayavitel' i

patentobladatel' OAO «Setevaya kompaniya» № 2017125424; zayavl. 14.07.2017; opubl. 09.07.2018 Byul. № 19, 10 s.

9. Patent № 2731169 C1 RF, MPK G01R 31/08. Datchik dlya sistemy nepreryvnogo kontrolya sostoyaniya izoliruyushchih konstrukcij: № 2019145586; zayavl. 30.12.2019; opubl. 31.08.2020 / D. K. Zaripov, R. A. Nasibullin, R. R. Ibragimov, M. CH. Igtisamov.

10. Zaripov, D. K. Metod distancionnoj diagnostiki vysokovol'noy izoliruyushej konstrukcii / D. K. Zaripov, T. V. Lopuhova // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. – 2006. – № 3-4. – S. 56-60. – EDN KFQJUT.

11. Zaripov, D. K. Raspredeennaya sistema kontrolya izolyacii vozdushnyh linij i podstancij na osnove besprovodnyh datchikov emkostnogo tipa / D. K. Zaripov, R. A. Nasibullin, D. F. Zakirov // . – 2022. – № 1. – S. 8-17. – DOI 10.25791/pribor.1.2022.1314. – EDN ABQHUI.

12. Zaripov, D. K. «Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya izolyatorov vozdushnyh linij elektroperedachi v usloviyah uvlazhneniya pri ravnomernom zagryaznenii» / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda

13. Zaripov, D. K. Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya izolyatorov vozdushnyh linij elektroperedachi dlya preduprezhdeniya nemotivirovannyh otklyuchenij / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda.

14. Zaripov, D. K. Issledovanie vozmozhnosti diagnostirovaniya girlyandy ravnomerno zagryaznyonnyh izolyatorov v usloviyah uvlazhneniya / D. K. Zaripov, D. F. Zakirov, A. V. Petrov // Aktual'nye problemy transporta i energetiki: puti ih innovacionnogo resheniya : Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Nur-Sultan, 17 marta 2022 goda.

15. V. F. Tarasenko, V. S. Kuznecov, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, E. H. Baksht, “Rol' strimerov v formirovanii koronnogo razryada pri rezko neodnorodnom elektricheskom pole”, Pis'ma v ZHETF, 110:1 (2019), 72–77; JETP Letters, 110:1 (2019), 85–89

Authors of the publication

Damir K. Zaripov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Rustem A. Nasibullin - Public Joint Stock Company «Krasnogorskij zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

Dinar F. Zakirov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Artem V. Zakharov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Получено

09.06.2023 г.

Отредактировано

14.07.2023 г.

Принято

08.09.2023 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-30-41

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ И ВЛИЯНИЕ НА НИХ СКОРОСТИ ВЕТРА

Бекиров¹ Э.А., Воскресенская¹ С.Н., Рамазанова² З.У., Бекиров¹ О.С.

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского,
г. Симферополь, Россия

²ООО «КРЫМ-ИРЕЙ», г. Симферополь, Россия

Bekirov.e.a@cfuv.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в анализе влияния указания интервала скорости ветра на расчет выработки электроэнергии определенными ветроэнергетическими установками, используемыми в Крыму. ЦЕЛЬ. Анализ методик, которые могут быть использованы для оценки выработки электроэнергии ветроэнергетическими установками в различных случаях, а также оценка влияния на точность прогноза интервала указания скорости при использовании «полуагрегированных» данных. МЕТОДЫ. В ходе исследования использовались аналитические и расчетные методы, в частности, метод замены переменной, распределение Рэля, методика Милевского. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены методики расчета выработки электроэнергии для трех случаев. В первом случае используются первичные данные наблюдений, поэтому он применим только, когда непосредственно в данной местности присутствует метеостанция. Второй случай описывает ход вычислений при частичной затенённости датчиков характеристик ветра, когда рельеф местности более сложный. Здесь необходимо классифицировать степень открытости датчика скорости ветра. Если площадка расположена вдали от метеостанций или метеопостов, используется третья методика. При этом выбор узлов интерполяции показателей потенциальной выработки электроэнергии может быть достаточно сложным. Также проведена оценка влияния скорости ветра на выработку электроэнергии ветроэнергетической установкой. При этом менялось количество интервалов агрегирования и сам интервал агрегирования, а результаты найдены для двух ветроэнергетических установок USW56-100 и T600-48, распространенных в Крыму. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Ветроэнергетика является одним из перспективных направлений, но часто из-за отличий прогнозных данных от фактических возникают сложности при интегрировании в общую энергосистему. Поэтому важно развивать методики оценки выработки и точность при их использовании.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; скорость ветра; выработка; мощность; относительная погрешность; метеостанция.

Для цитирования: Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Рамазанова З.У., Бекиров О.С. Методики расчета выработки электрической энергии ветроэнергетическими установками и влияние на них скорости ветра // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 30-41. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-30-41.

METHODS OF CALCULATING ELECTRIC POWER GENERATION BY WIND TURBINES AND THEIR INFLUENCE ON WIND SPEED

Bekirov E.A.¹, Voskresenskaya S.N.¹, Ramazanova Z.U.², Bekirov O.S.¹

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

²Limited Liability Company «CRIMEA-IREY», Simferopol, Russia

Bekirov.e.a@cfuv.ru

Abstract: RELEVANCE of the study lies in the analysis of the influence of specifying the wind speed interval on the calculation of electricity generation by certain wind turbines used in the Crimea. PURPOSE. Analysis of techniques that can be used to estimate electric power generation by wind turbines in various cases, as well as an assessment of the impact on the accuracy of the forecast of the speed indication interval when using "semi-aggregated" data. METHODS. Analytical and computational methods were used in the study, in particular, the variable substitution method, Rayleigh distribution, and the Milewski method. RESULTS. In the article the methods of calculating the electric power generation for three cases are considered. The first case uses primary observational data, so it is applicable only when a weather station is directly present in the area. The second case describes the course of calculations when the wind characteristics sensors are partially shaded and when the terrain is more complex. Here it is necessary to classify the degree of openness of the wind speed sensor. If the site is located far from weather stations or weather posts, the third method is used. In this case, the choice of interpolation nodes of the indicators of potential power generation can be quite complex. We also evaluated the effect of wind speed on electricity generation by a wind turbine. The number of aggregation intervals and the aggregation interval itself were changed, and the results were found for two wind turbines USW56-100 and T600-48, common in the Crimea. CONCLUSIONS. Wind energy is one of the promising areas, but often because of the differences between the forecast data and the actual, there are difficulties in integrating into the overall energy system. Therefore, it is important to develop methods for estimating the generation and accuracy in their use.

Keywords: wind turbine; wind speed; generation; power; relative error; meteorological station.

For citation: Bekirov E.A., Voskresenskaya S.N., Ramazanova Z.U., Bekirov O.S. Methods of calculating electric power generation by wind turbines and their influence on wind speed. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (5): 30-41. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-30-41.

Введение (Introduction)

В последнее время в связи с уменьшением запасов органического топлива во всем мире, по мере возможности, начали более широко внедрять возобновляемые источники энергии. Одним из таких источников является ветер. Скорость и направление ветра невозможно предсказать с высокой точностью на длительный период времени, хотя для выявления этих данных и существуют многочисленные методики: численное прогнозирование погоды (NWP модели) [1, 2]; использование статистических моделей [1, 2]; метод фильтров Калмана [2]; с помощью интегрированной модели авторегрессии (скользящего среднего) для анализа временных рядов ARIMA и ее разновидностей [2]; с помощью сети Байеса [2]; использование нечеткой системной модели [1, 2]; использование нейронных сетей [1, 2]; комбинированная модель, основанная на модифицированной модели Трансформера и вариационных методах разложения [3, 4]; метод выбора характеристик с помощью пакета *Boruta* при машинной обработке данных [5] и др. В связи с этим затрудняется прогнозирование генерации электрической энергии ветроэнергетическими установками (ВЭУ). Погрешности прогнозирования могут иметь существенные значения и необходимо проводить их оценку.

Методики оценки непосредственно наблюдаемых скоростей и направлений ветра также могут быть различными и основываться: на измерениях с помощью анемометров [6]; на использовании нечеткой регрессионной модели [7 – 9]; на использовании усредненных данных и адаптивных компактных нейронных сетей для краткосрочного прогнозирования [10, 11]; на использовании метода Чебышева, заключающегося в разложении ряда данных по полиномам [12], а также методов Адамса, Геминга и Милна (формулы «предиктор-корректор») [13]; на использовании спутниковой съемки и дальнейшей цифровой обработке изображений [14] и др.

Следующим этапом является определение выработки электроэнергии, которая может быть получена в определенных условиях на рассматриваемой площадке расчетными методами [15, 16], в том числе с использованием специальных программ [17]. Эти значения могут быть использованы в процессе диспетчеризации для управления работой ветроэлектростанции и реализации электроэнергии на рынках мощности и энергии.

Целью исследования является анализ методик, которые могут быть использованы для оценки выработки электроэнергии ветроэнергетическими установками в различных

случаях. При этом учитывается влияние интервалов указываемых скоростей ветра на точность прогноза.

Научная значимость заключается в обобщении и анализе существующих методик и выведении рекомендаций для конкретных рассмотренных случаев. Практическая значимость заключается в том, что исследование имеет привязку к местности и определенным типам ветроэнергетических установок, поэтому можно провести сравнение и просчитать погрешности при выборе разных интервалов скоростей ветра метеопрогноза.

Материалы и методы (Materials and methods)

1. Методика оценки годовой выработки электроэнергии ВЭУ по первичным данным наблюдений метеостанции

Расчётная выработка электроэнергии ВЭУ за год в данном случае определяется следующим образом:

$$E = \sum_{i=0}^{2919} E_i, \quad (1)$$

где E_i — выработка электроэнергии ВЭУ (в кВт·час) за i -й интервал времени между замерами скорости ветра на метеостанции (МС), интервал начинается с $(i-1)$ замера.

В том случае, если каждое слагаемое в формуле (1) определять для трехчасового интервала времени, то выработка электроэнергии за этот интервал определяется по формуле

$$E_i = 3 \cdot \bar{P}_i, \quad (2)$$

где \bar{P}_i — средняя мощность (кВт), генерируемая ВЭУ за i -й интервал времени (длительность интервала составляет три часа).

В настоящее время чаще в формулу (2) вместо средней мощности подставляют мощность, соответствующую скорости ветра, замеренной в начальный момент интервала. Это соответствует предположению о постоянстве скорости ветра на протяжении всего трёхчасового интервала.

Для проверки этого предположения сделаны выборки из данных, зарегистрированных автоматизированными электронными приборами, записывающими в свою память средние скорости ветра за каждые десять минут. Таким образом, за три часа осуществляется 18 записей. Характерный график для такого рода выборки приведен на рисунке 1.

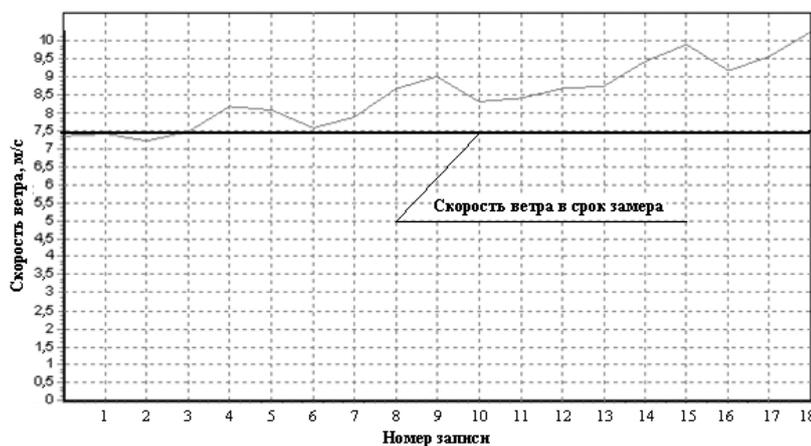


Рис. 1. Характерный график набора скорости ветра за трёхчасовой интервал Fig. 1. Typical plot of wind speed gain over a three-hour interval

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 1 видно, что имеет место постепенный набор (в противном случае — постепенное снижение) скорости ветра. Поэтому использование лишь постоянной скорости ветра для оценки выработки ВЭУ за трёхчасовой интервал может приводить к значительным погрешностям.

В действительности же, мощность, генерированная ВЭУ — это случайная величина, которая является детерминированной функцией другой случайной величины — скорости ветра на высоте оси ротора, т.е. $P = P(v)$. Согласно теории вероятностей, среднее значение (математическое ожидание) такой случайной величины на интервале $[v_i, v_{i+1}]$ определяется по формуле

$$\bar{P}_i = \int_{v_i}^{v_{i+1}} P(v) \cdot f_i(v) dv, \quad (3)$$

где $f_i(v)$ — функция плотности распределения скорости ветра на i -м интервале времени.

Анализ данных автоматизированных электронных приборов показал, что внутри трёхчасовых интервалов времени скорости ветра распределены по закону, который в первом приближении можно считать равномерным. Функция плотности распределения случайной величины v , равномерно распределённой на интервале $[v_i, v_{i+1}]$, имеет вид:

$$f_i(v) = \begin{cases} \frac{1}{v_{i+1} - v_i}, & \text{если } v \in [v_{i+1}, v_i], \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Тогда формула для средней генерированной мощности (3) конкретизируется:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{v_{i+1} - v_i} \int_{v_i}^{v_{i+1}} P(v) dv. \quad (5)$$

Таким образом, окончательная формула расчёта годовой выработки электроэнергии ВЭУ имеет вид:

$$E = \sum_{i=0}^{2919} E_i = 3 \sum_{i=0}^{2919} \bar{P}_i = 3 \sum_{i=0}^{2919} \frac{1}{v_{i+1} - v_i} \int_{v_i}^{v_{i+1}} P(v) dv. \quad (6)$$

Для определения первообразной логистической функции (7).

$$P(v) = \frac{a}{1 + be^{-c \cdot v}}, \quad (7)$$

где v — скорость ветра;

P — генерированная мощность ВЭУ;

a, c — параметры ($a > \max P$);

b — числовое значение, получаемое при решении дифференциального уравнения зависимости мощности от скорости ветра,

применяемой для моделирования характеристики мощности ВЭУ Т600-48, воспользуемся методом замены переменной, а именно:

$$P(v) = \int \frac{a}{1 + be^{-c \cdot v}} dv \equiv \begin{cases} t = 1 + be^{-c \cdot v}, \\ dv = -\frac{1}{bc} e^{c \cdot v} dt \\ e^{c \cdot v} = \frac{b}{t-1}, \\ dv = -\frac{1}{c} \frac{dt}{t-1} \end{cases} = -\frac{a}{c} \int \frac{dt}{t(t-1)} = \quad (8)$$

$$= -\frac{a}{c} \left(\int \frac{dt}{(t-1)} - \int \frac{dt}{t} \right) = -\frac{a}{c} \ln \left(1 - \frac{1}{t} \right) = -\frac{a}{c} \ln \left(1 - \frac{1}{1 + be^{-c \cdot v}} \right)$$

С учётом (8) формула (5) конкретизируется в виде:

$$\bar{P}_i = \frac{1}{v_{i+1} - v_i} [P(v_{i+1}) - P(v_i)] = \frac{a}{c(v_{i+1} - v_i)} \ln \frac{1 - \frac{1}{1 + be^{-c \cdot v_i}}}{1 - \frac{1}{1 + be^{-c \cdot v_{i+1}}}}. \quad (9)$$

Формулы (5) и, соответственно, (9) имеют место в случае, если $v_{out} > v_i > v_{in}$. Если $v_{in} \in [v_i, v_{i+1}]$, то нижний предел интегрирования в (5) следует заменить на v_{in} . Если же $v_{out} \in [v_i, v_{i+1}]$, то верхний предел интегрирования в (5) следует заменить на v_{out} . Соответствующим образом корректируется и формула (9).

2. Методика оценки потенциальной выработки электроэнергии ВЭУ при частичной затенённости датчиков характеристик ветра

В метеорологии существует ряд методик учёта затенённости датчика скорости ветра, среди которых наибольшее распространение в последнее время получила методика

Милевского. Она состоит в следующем. Степень открытости датчика скорости ветра классифицируется согласно табл. 1 [18].

Поправочный коэффициент скорости ветра рассчитывается по формуле

$$k = \frac{K_0}{K_f}, \quad (10)$$

где K_0, K_f — классы месторасположения метеостанции (верхняя часть табл. 1) и степени затенённости датчика скорости ветра (нижняя часть табл. 1).

Если фактические условия открытости метеостанции хуже, чем условия открытой ровной местности в данной локализации ($K_f < K_0$), то поправочный коэффициент $k > 1$, то есть, скорректированная скорость ветра будет выше исходной.

К недостаткам применения данной методики для целей ветроэнергетики следует отнести то, что с её помощью предусмотрена корректировка среднегодовой скорости ветра, которой метеорологи чаще всего характеризуют ветровой потенциал территории. Однако данный показатель для ветроэнергетики является слишком грубым, может привести к ошибочным оценкам. Кроме того, классификация затенённости местности осуществляется на основе визуальной оценки, что приводит к неоднозначности и погрешности корректировки скорости ветра.

В статье предложена методика объективной оценки выработки электроэнергии ВЭУ на площадке в условиях её частичной затенённости. Эта методика состоит в выполнении следующих шагов:

1. Сбор «срочных» данных наблюдений характеристик ветра для всех метеостанций региона (желательно, не менее чем за десятилетний период).

Таблица 1
Table 1

Классификация месторасположения метеостанции и степени затенённости датчика скорости ветра по Милевскому
Classification the location of the weather station and the degree of shading of the wind speed sensor according to Milevsky

| Степень открытости датчика скорости ветра | Форма рельефа | | |
|---|---------------|---------|----------|
| | выпуклая | плоская | вогнутая |
| Близ водных поверхностей | | | |
| Открытое побережье: | | | |
| океана или открытого (внешнего) моря | 12 | 11 | 10 |
| закрытого (внутреннего) моря | 11 | 10 | 9 |
| залива или большого озера | 10 | 9 | 8 |
| большой реки | 9 | 8 | 7 |
| Вдали от водных поверхностей | | | |
| Ниже датчика скорости ветра: | | | |
| нет никаких элементов затенения | 8 | 7 | 6 |
| отдельные элементы затенения | 7 | 6 | 5 |
| среди элементов затенения | 6 | 5 | 4 |
| Выше датчика скорости ветра: | | | |
| среди элементов затенения | 4 | 4 | 4 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

2. Обследование МС, построение роз затенений датчиков характеристик ветра, уточнение хронологии формирования препятствий.

3. Если исходная площадка МС затенена более, чем по двум секторам направлений ветра, то следует собрать данные за период, предшествующий возникновению препятствий. Такие данные, как правило, хранятся в виде гистограмм скорости ветра. Если данные за период, предшествующий возникновению препятствий, отсутствуют, то оценка выработки электроэнергии ВЭУ считается не определённой и данная МС исключается из рассмотрения. Если площадка затенена по одному или двум секторам направлений ветра, то следует перейти к следующему пункту 4.

4. Расчёт среднегодовой выработки электроэнергии ВЭУ для ветров, преобладающих в каждом секторе направлений, и формирование энергетической розы ветров. Для расчёта используются данные «срочных» измерений характеристик ветра. Соответствующая методика расчёта среднегодовой выработки электроэнергии ВЭУ описана выше, ее следует применить для данных каждого сектора направлений ветра в отдельности.

5. Следует найти близлежащую МС или другой источник данных о ветре, датчики характеристик ветра которого открыты в направлениях, затенённых у исходной площадки. Такой близлежащий источник данных должен находиться с «затенённой» МС в одинаковых условиях формирования ветрового режима. Если такие источники данных имеются, то следует рассчитать выработку электроэнергии ВЭУ за счёт ветров этих направлений. Если ближайшим источником данных о характеристиках ветра является МС, то расчёт осуществляется по вышеизложенной методике; если это метеопост электронной регистрации характеристик ветра, то для расчёта целесообразно использовать метод, предложенный в [19]. Затем необходимо заменить выработку электроэнергии ВЭУ в «затенённых» секторах МС на выработку, рассчитанную для этих секторов у близлежащей МС, и пересчитать суммарную среднегодовую выработку ВЭУ. Если у близлежащих источников к исходной площадке эти сектора также затенены, то оценка выработки электроэнергии ВЭУ считается не определённой и данная МС исключается из рассмотрения.

3. Методика оценки показателей потенциальной выработки электроэнергии ВЭУ в произвольном пункте региона

Для получения оценки потенциальной выработки ВЭУ в произвольном пункте региона, отличном от пункта расположения источника информации о характеристиках ветра (узла интерполяции), предлагается следующая методика.

Предварительно задаётся целое положительное число m — количество узлов интерполяции, используемых при расчёте показателя в произвольном пункте.

В качестве оценки значения показателя в произвольном пункте территории региона принимается средневзвешенное значение оценок соответствующего показателя в узлах интерполяции. В качестве весов принимаются величины, обратные расстояниям между пунктом, для которого выполняется интерполяция, и узлами интерполяции. Тогда:

$$p = \sum_{i=1}^m w_i \cdot p_i, \quad (11)$$

$$w_i = \frac{1}{d_i} / \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (12)$$

где p — значение показателя потенциальной выработки электроэнергии ВЭУ в пункте, в котором отсутствует источник информации о характеристиках ветра;

d_i — расстояние от данного пункта до i -го узла интерполяции ($i = 1, \dots, m$);

p_i — оценка показателя ПВЭ ВЭУ для i -го узла интерполяции ($i = 1, \dots, m$).

Выбор узлов интерполяции показателей потенциальной выработки электроэнергии ВЭУ для произвольного пункта предлагается осуществлять одним из двух методов: методом «ближайших соседей» и методом триангуляции.

В первом методе отбираются m узлов, ближайших к данному пункту. Во втором методе в качестве узлов интерполяции отбираются три вершины треугольника, внутрь которого попадает данный пункт.

В любом случае для оценки мощности и выработки ВЭУ необходимы данные скорости ветра для конкретной площадки. Чем точнее будут эти данные, тем более эффективным является прогноз.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Оценка влияния скорости ветра на расчет выработки ВЭУ

В метеоархивах информация о скоростях ветра хранится и доступна на одном из трёх уровней агрегирования:

- первичные (не агрегированные) данные о скоростях и ветра («срочные» данные);
- «полуагрегированные» данные — повторяемости (гистограммы) скоростей ветра;
- «высокоагрегированные» данные — среднемесячные и среднегодовые скорости ветра.

Использование «высокоагрегированных» данных уменьшает сложность обработки, но и существенно снижает обоснованность оценки ветроэнергетического потенциала. Применение таких данных возможно лишь для первичной, очень приблизительной оценки возможностей ветроэнергетики в регионе.

В расчётах долгосрочного прогноза выработки электроэнергии ВЭУ, как правило, используются «полуагрегированные» данные о скорости ветра, хранящиеся в виде гистограмм. Метеостанции осуществляют регистрацию скорости ветра с точностью до 1 м/с. Затем первичные данные агрегируются и хранятся в архивах в виде гистограмм, интервалы которых, в основном, имеют длину 2 м/с.

Такие гистограммы скорости ветра организационно и коммерчески существенно доступнее первичных данных, их можно получить за весьма длительный период ретроспективы. Обработка гистограмм скорости ветра требует намного меньше трудозатрат, чем обработка первичных данных. В ряде случаев, например, при необходимости привлечения данных наблюдений за период более, чем десятилетней давности, «полуагрегированные» данные являются единственно доступными данными, пригодными для расчёта выработки электроэнергии ВЭУ. В то же время ясно, что любое агрегирование данных всегда приводит к определённой погрешности расчёта выработки электроэнергии ВЭУ.

В связи с этим возникают вопросы:

- является ли точность регистрации скорости ветра на МС достаточной для выполнения на основе этих данных расчёта ветроэнергетических показателей?
- не приводит ли агрегирование (в виде гистограмм) данных о скорости ветра к значительным искажениям в ветроэнергетических расчётах?

Ответы на данные вопросы необходимы для оценки обоснованности использования указанных («полуагрегированных») данных МС в практических ветроэнергетических расчётах.

Непосредственное решение данной проблемы на базе анализа фактических данных невозможно, поскольку хранящиеся в архивах гистограммы наблюдаемых скоростей ветра привязаны к фиксированной системе интервалов. По этим данным не могут быть пересчитаны количества случаев для более узких интервалов с тем, чтобы сравнить затем результаты расчётов выработки электроэнергии ВЭУ, полученные на основании данных разных способов агрегирования.

Требуемые оценки точности можно получить для использования определённого теоретического распределения скоростей ветра. В качестве такого распределения можно выбрать распределение Рэля, которое довольно часто используется для моделирования распределения скорости ветра. Функция распределения Рэля имеет вид:

$$R(v) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где \bar{v} — среднее значение скорости ветра.

Графики плотности распределения Рэля для различных средних скоростей ветра представлены на рисунке 2.

Расчёт выработки электроэнергии ВЭУ при условии, что на высоте датчика скорость ветра является случайной величиной, имеющей распределение Рэля, состоит в выполнении следующей последовательности действий.

1) Расчёт коэффициента учёта высоты ВЭУ согласно формуле пересчёта скорости ветра на высоте (формула Хеллмана):

$$k = \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^\alpha, \quad (14)$$

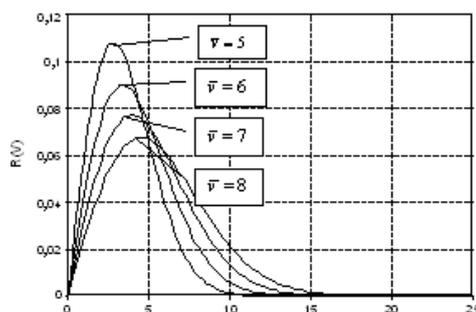


Рис. 2. Графики плотности распределения Рэля

Fig. 2. Rayleigh distribution density plots

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

где α — показатель степени, зависящий от шероховатости подстилающей поверхности в окрестности площадки, в расчётах использовано стандартное значение примерно равное 0,14;

h_0 — высота датчика скорости ветра;

h_1 — высота оси ротора ВЭУ ($h_1 > h_0$).

2) Расчёт количества интервалов агрегирования скорости ветра:

$$N = \begin{cases} \frac{v_e - v_b}{k \cdot \Delta v}, \text{ если } \text{frac}\left(\frac{v_e - v_b}{k \cdot \Delta v}\right) = 0, \\ \text{int}\left(\frac{v_e - v_b}{k \cdot \Delta v}\right) + 1, \text{ если } \text{frac}\left(\frac{v_e - v_b}{k \cdot \Delta v}\right) \neq 0, \end{cases} \quad (15)$$

где v_b — скорость включения ВЭУ;

v_e — скорость отключения ВЭУ;

Δv — длина интервала гистограммы скорости ветра;

$\text{int}(x)$ — целая часть числа x ;

$\text{frac}(x)$ — дробная часть числа x .

3) Расчёт узловых точек гистограммы скорости ветра для высоты датчика:

$$v_1 = \frac{v_b}{k}, v_i = v_{i-1} + \Delta v, i = 2, \dots, N, v_{N+1} = \frac{v_e}{k}. \quad (16)$$

4) Расчёт вероятностей попадания скорости ветра в заданные интервалы:

$$f_i = R(v_{i+1}) - R(v_i) = \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v_i}{\bar{v}}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v_{i+1}}{\bar{v}}\right)^2\right), i = 1, \dots, N. \quad (17)$$

5) Пересчёт узловых точек для высоты оси ротора ВЭУ:

$$v'_i = k v_i, i = 1, \dots, N. \quad (18)$$

6) Оценка выработки электроэнергии ВЭУ:

$$E \approx 8760 \sum_{i=1}^N P\left(\frac{v'_i + v'_{i+1}}{2}\right) \cdot f_i, \quad (19)$$

где $P = P(v)$ — характеристика мощности ВЭУ.

Оптимальной длиной Δv^* интервала гистограммы скорости ветра будем считать такую максимальную длину интервала, уменьшение которой вдвое не приводит к существенному изменению расчётной выработки электроэнергии ВЭУ. Этому определению соответствует формула

$$\Delta v^* = \arg \max \left\{ \Delta v \left| \frac{\left| E(\Delta v) - E\left(\frac{\Delta v}{2}\right) \right|}{E\left(\frac{\Delta v}{2}\right)} \leq \varepsilon \right. \right\}, \quad (20)$$

где $\varepsilon > 0$ — наперёд заданная допустимая величина относительного уровня «незначимости» перехода к более узким интервалам гистограммы скорости ветра.

В таблицах 2 – 7 представлены результаты выполненных по представленной методике расчётов для двух типов ВЭУ USW56-100 и T600-48 для площадки на территории Крыма.

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета годовой выработки электроэнергии ВЭУ USW56-100, кВт·час
The results of the calculation of the annual power generation of the wind turbine WUSW56-100, kWh

| Δv , м/с | Годовая выработка, кВт·час, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|--------|--------|--------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0,5 | 129882 | 225168 | 329991 | 431697 |
| 1 | 130661 | 225855 | 330533 | 432084 |
| 2 | 133822 | 228617 | 332697 | 433622 |
| 4 | 147467 | 239984 | 341289 | 439327 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 3

Table 3

Относительные погрешности (%) расчёта выработки электроэнергии ВЭУ USW56-100 в сравнении с расчётом при ширине интервала гистограммы скорости ветра 0,5 м/с
Relative errors (%) in calculating the power generation of wind turbines USW56-100 in comparison with the calculation with the width of the histogram interval of the wind speed of 0.5 m/s

| Δv , м/с | Относительные погрешности, %, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|------|------|------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0,60 | 0,31 | 0,16 | 0,09 |
| 2 | 3,03 | 1,53 | 0,82 | 0,45 |
| 4 | 13,54 | 6,58 | 3,42 | 1,77 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 4

Table 4

Относительные погрешности (%) расчёта выработки электроэнергии ВЭУ USW56-100 при удвоении ширины интервала гистограммы скорости ветра
Relative errors (%) in calculating wind turbine power generation USW 56-100 when doubling the width of the wind speed histogram interval

| Δv , м/с | Относительные погрешности, %, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|------|------|------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0,60 | 0,31 | 0,16 | 0,09 |
| 2 | 2,42 | 1,22 | 0,65 | 0,36 |
| 4 | 10,20 | 4,97 | 2,58 | 1,32 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 5

Table 5

Результаты расчёта годовой выработки электроэнергии ВЭУ Т600-48, кВт·час
The results of calculating the annual electricity generation of wind turbine T600-48, kWh

| Δv , м/с | Годовая выработка, кВт·час, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|---------|---------|---------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 0,5 | 1570334 | 2183458 | 2704855 | 3105734 |
| 1 | 1574016 | 2185557 | 2705812 | 3105963 |
| 2 | 1588456 | 2193839 | 2709618 | 3106898 |
| 4 | 1625257 | 2226680 | 2735452 | 3125819 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6

Table 6

Относительные погрешности (%) расчёта выработки электроэнергии ВЭУ Т600-48 в сравнении с расчётом при ширине интервала гистограммы скорости ветра 0,5 м/с
Relative errors (%) in calculating the power generation of the wind turbine T600-48 in comparison with the calculation with the width of the histogram interval of the wind speed of 0.5 m/s

| Δv , м/с | Относительные погрешности, %, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|------|------|------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0,23 | 0,10 | 0,04 | 0,01 |
| 2 | 1,15 | 0,48 | 0,18 | 0,04 |
| 4 | 3,50 | 1,98 | 1,13 | 0,65 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 7

Table 7

Относительные погрешности (%) расчёта выработки электроэнергии ВЭУ Т600-48 при удвоении ширины интервала гистограммы скорости ветра
Relative errors (%) in calculating the power generation of the wind turbine T600-48 when doubling the width of the interval of the histogram of wind speed

| Δv , м/с | Относительные погрешности, %, при \bar{v} , м/с | | | |
|------------------|---|------|------|------|
| | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0,23 | 0,10 | 0,04 | 0,01 |
| 2 | 0,92 | 0,38 | 0,14 | 0,03 |
| 4 | 2,32 | 1,50 | 0,95 | 0,61 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ветровые электростанции строятся, как правило, в местности, где среднегодовая скорость ветра составляет 5 — 7 м/с. Из приведенных выше таблиц следует, что удвоение точности измерения скорости ветра (по отношению к действующей методике) приводит к несущественному уточнению оценки выработки электроэнергии ВЭУ.

Таким образом, на основании сделанных оценок можно заключить, что использование архивных данных о скорости ветра, хранящихся в виде гистограмм с интервалами, соответствующими методике Всемирной Метеорологической Организации, обеспечивает достаточную для практики точность ветроэнергетических расчётов. В то же время отметим, что использовать указанные данные можно только для площадок, датчики скорости ветра на которых абсолютно открыты.

Оценка выработки электроэнергии ВЭУ на площадке МС в условиях частичной затенённости датчиков характеристик ветра осуществляется путём детального анализа энергетической структуры ветра на данной площадке и на площадках близко расположенных МС. Такой анализ возможен лишь при использовании «срочных» данных о скорости и направлении ветра в одни и те же моменты времени.

Заключение (Conclusions)

Таким образом, в статье предложены методики для оценки выработки электроэнергии ВЭУ для трех различных случаев: когда расчет ведется по первичным данным наблюдений метеостанции; при частичной затенённости датчиков характеристик ветра; в произвольном пункте региона, в котором отсутствуют источники данных о характеристиках ветра. Они были использованы для расчета выработки ВЭУ USW56-100 и T600-48 на территории Крыма. При этом рассматривалось влияние точности измерения скорости ветра по предложенным методикам на результаты. Выявлено, что относительные погрешности при удвоении точности меняются незначительно. Это актуально при гистограммах скорости с интервалами 1 и 2 м/с, наиболее часто используемых в расчетах. Если взять гистограмму с интервалом 4 м/с (в реальном случае практически не применяется), то для ВЭУ USW56-100 при скорости ветра, например, 5 м/с относительные погрешности будут отличаться на 3,34 %, а для ВЭУ T600-48 на 1,18 %.

Литература

1. Nicksson Freitas, Marcelino Silva, Meiry Sakamoto. Wind Speed Forecasting: A Review. International Journal of Engineering Science. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.
2. Soundarapandian Vidya, Dr. S. Vidya, E. Srie, Janani Vidhya. A Review On The Hybrid Approaches For Wind Speed Forecasting Deep learning View project. International Journal of Scientific Research. 2022. 8. 1584-1590.
3. Ke Zhang, Xiao Li, Jie Su. Variable Support Segment-Based Short-Term Wind Speed Forecasting. Energies. 2022. 15. 4067. 10.3390/en15114067.
4. Tao Liang, Qing Zhao, Huan Shi. A novel combined model based on VMD and IMODA for wind speed forecasting. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2022. 42. 1-17. 10.3233/JIFS-201191.
5. Siva Sankari, Senthil Paramasivan, Karmel Arockiasamy, Saminathan Senthivel, Muthamilselvan Thangavel. Deep Learning for Wind Speed Forecasting Using Bi-LSTM with Selected Features. Intelligent Automation & Soft Computing. 2023. 35. 3829-3844. 10.32604/iasc.2023.030480.
6. Хассан Ф.А., Гайнуллина Л.Р., Тимербаев Н.Ф. Методика оценки и прогнозирования среднегодовой скорости и направления ветра на основе данных ветроизмерений. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 59-68.
7. Манусов В.З., Хасанзода Н., Иванов Г.В. Оценка мощности ветроэлектростанции на основе нечеткой регрессионной модели прогнозирования скорости и направления ветра. В сборнике: Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы Международной научно-практической конференции. 2018. С. 145-146.
8. Манусов В.З., Хасанзода Н. Оценка мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой модели ветрового потока и его вероятностных характеристик. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2019. № 1 (42). С. 73-82.
9. Takvor Soukissian, Flora Karathanasi, E.G. Voukouvalas. Effect of Outliers in Wind Speed Assessment. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Busan, Korea. Volume 1. 2014.
10. Матренин П.В., Манусов В.З., Игумнова Е.А. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей. Проблемы региональной энергетики. 2020. № 3 (47). С. 69-80.
11. Дорошенко А.В. Применение нейросетевых алгоритмов при оценке и прогнозировании ветровой комфортности. БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 3 (1027). С. 22-23.

12. Буяльский В.И. Автоматизированная система управления ветроэнергетической установкой на базе прогнозирования скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. Наука и мир. 2017. № 9-1 (49). С. 14-19.

13. Клен Е.С., Яременко М.К., Жуйков В.Я. Влияние погрешности прогнозирования скорости ветра на величину зоны управляемой работы накопителя в системе с ветрогенератором. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2020. № 57. С. 35-41.

14. Meysam Majidi Nezhad, Mehdi Neshat, Azim Heydari, Armin Razmjoo, Giuseppe Piras, Davide Astiaso Garcia. A new methodology for offshore wind speed assessment integrating Sentinel-1, ERA-Interim and in-situ measurement. Renewable Energy. 2021. 172. 10.1016/j.renene.2021.03.026.

15. Елистратов В.В., Минина А.А. Методика прогнозирования выработки ВЭС для управления работой ВЭС на рынках мощности и энергии с использованием результатов дистанционного зондирования скорости ветра в приземном слое. Малая энергетика. 2014. № 1-2. С. 62-65.

16. Безъязычный В.С., Велигура С.А., Калашников А.И., Надтока И.И. Анализ зависимостей электропотребления в энергосистеме от скорости ветра и эффективной температуры воздуха и использование их при краткосрочном прогнозировании. В сборнике: Электроэнергетика глазами молодежи - 2020. материалы XI Международной научно-технической конференции. В 2-т.. Ставрополь, 2020. С. 147-150.

17. Борисов Вадим Владимирович, Синявский Юрий Владимирович, Соколов Андрей Максимович. Программа для прогнозирования выработки электрической энергии ветрогенератором. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022667180, 15.09.2022. Заявка № 2022666050 от 30.08.2022.

18. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера. Л.: Наука, 1989. 208 с.

19. Тучинский Б.Г., Метод оцінки вироблення електроенергії вітроелектричною установкою з даними електронної реєстрації характеристик вітру. Доклади II Международной конференции «Нетрадиционная энергетика XXI века». АР Крым. 2001. С. 95-98.

Авторы публикации

Бекиров Эскендер Алимович — д-р техн. наук., профессор, заведующий кафедрой Электроэнергетики и электротехники Физико-технического института, Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.

Воскресенская Светлана Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры Электроэнергетики и электротехники Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. E-mail: Voskresenskaya.s.n@cfuv.ru.

Рамазанова Зарема Усеиновна — канд. техн. наук, директор ООО «КРЫМ-ИРЕЙ».

Бекиров Осман Серверович — магистр, Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. E-mail: Osman_bekirov@list.ru.

References

1.Nicksson Freitas, Marcelino Silva, Meiry Sakamoto.. Wind Speed Forecasting: A Review. International Journal of Engineering Science. 2018. 8. 10.9790/9622-0801010409.

2.Soundarapandian Vidya, Dr. S.Vidya, E. Srie, Janani Vidhya. A Review On The Hybrid Approaches For Wind Speed Forecasting Deep learning View project. International Journal of Scientific Research. 2022. 8. 1584-1590.

3.Ke Zhang, Xiao Li, Jie Su. Variable Support Segment-Based Short-Term Wind Speed Forecasting. Energies. 2022. 15. 4067. 10.3390/en15114067.

4.Tao Liang, Qing Zhao, Huan Shi. A novel combined model based on VMD and IMODA for wind speed forecasting. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. 2022. 42. 1-17. 10.3233/JIFS-201191.

5.Siva Sankari, Senthil Paramasivan, Karmel Arockiasamy, Saminathan Senthivel, Muthamilselvan Thangavel. Deep Learning for Wind Speed Forecasting Using Bi-LSTM with Selected Features. Intelligent Automation & Soft Computing. 2023. 35. 3829-3844. 10.32604/iasc.2023.030480.

6.Hassan F.A., Gainullina L.R., Timerbaev N.F. Technique of estimation and prediction of average annual wind speed and direction based on wind measurement data. Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2022. V. 14. 3 (55). 59-68.

7. Manusov V.Z., Khasanzoda N., Ivanov G.V. Estimation of wind power plant capacity based on fuzzy regression model of wind speed and direction prediction. In the collection: Alternative and Intelligent Energy. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2018. 145-146.
8. Manusov V.Z., Khasanzoda N. Estimation of wind power capacity based on fuzzy model of wind flow and its probabilistic characteristics. Papers of the Academy of Sciences of Higher Education of the Russian Federation. 2019. 1 (42). 73-82.
9. Takvor Soukissian, Flora Karathanasi, E.G. Voukouvalas. Effect of Outliers in Wind Speed Assessment. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. Busan, Korea. Volume 1. 2014.
10. Matrenin P.V., Manusov V.Z., Igumnova E.A. Stable short-term wind speed prediction using adaptive compact neural networks. Problems of regional energy. 2020. 3 (47). 69-80.
11. Doroshenko A.V. Application of neural network algorithms in the assessment and prediction of wind comfort. BST: Bulletin of Construction Engineering. 2020. 3 (1027). 22-23.
12. Buyalsky V.I. Automated control system of wind power installation based on the forecasting of wind speed and power consumption. Science and the world. 2017. 9-1 (49). 14-19.
13. Klen E.S., Yaremenko M.K., Zhuikov V.Y. Influence of wind speed prediction error on the value of the controlled operation zone of a storage device in a system with a wind generator. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2020. 57. 35-41.
14. Meysam Majidi Nezhad, Mehdi Neshat, Azim Heydari, Armin Razmjoo, Giuseppe Piras, Davide Astiaso Garcia. A new methodology for offshore wind speed assessment integrating Sentinel-1, ERA-Interim and in-situ measurement. Renewable Energy. 2021. 172. 10.1016/j.renene.2021.03.026.
15. Elistratov V.V., Minina A.A. Technique of forecasting of WES generation for WES operation control at the power and energy markets with the use of remote sensing results of wind speed in the surface layer. Small-scale power engineering. 2014. 1-2. 62-65.
16. Bez'yazichny V.S., Veligura S.A., Kalashnikov A.I., Nadtocha I.I. Analysis of dependences of power consumption in a power system on wind speed and effective air temperature and their use for short-term forecasting. In Compendium: Electrical Power Engineering through the Eyes of the Youth - 2020. materials of the XI International Scientific and Technical Conference. In 2 vols. Stavropol, 2020. 147-150.
17. Borisov Vadim Vladimirovich, Sinyavskii Yuri Vladimirovich, Sokolov Andrey Maksimovich. Program for forecasting electrical power generation by a wind turbine generator. Registration Certificate for Computer Programme. 2022667180, September 15, 2022. Application no. 2022666050 of 30.08.2022.
18. Zubarev V.V., Minin V.A., Stepanov I.R. Utilization of wind energy in the regions of the North. L.: Nauka, 1989. 208.
19. Tuchinsky B.G., Method of estimation of electricity generation by wind power plant with data of electronic registration of wind characteristics. Reports of the II International Conference "Non-traditional energy of the XXI century". Crimea. 2001. 95-98.

Authors of the publication

Eskender A. Bekirov – V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia.

Svetlana N. Voskresenskaya – V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia.

Zarema U. Ramazanova – Limited Liability Company «CRIMEA-IREY», Simferopol, Russia.

Osman S. Bekirov – V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Получено **15.09.2023 г.**

Отредактировано **22.09.2023 г.**

Принято **05.09.2023 г.**

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ РАНЖИРОВАНИЯ

Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

lessv134@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Повышение энергоэффективности является одним из необходимых условий модернизации российской экономики. Высокая энергоемкость и анализ энергоэффективности обусловлены совокупным влиянием ряда факторов как глобальных, так и частных. Так, для электросетевых организаций проблема энергетической эффективности является приоритетной. Имея в своем распоряжении электросетевые хозяйство, включающее точки приема и передачи электрической энергии, электротехническое оборудование и линии электропередачи, электросетевые организации несут огромные убытки, вызванные потерями при передаче электрической энергии, потерями, связанными с неучтенной долей электроэнергии, а также сторонними факторами. **ЦЕЛЬ.** Провести анализ энергетической эффективности электросетевой организации, которая имеет в своем составе 10 филиалов. Сформировать иерархию показателей энергоэффективности, определить влияние каждого показателя на интегральный показатель, отражающий энергетическую эффективность объекта. Провести бенчмаркинг, выявить лидеров и аутсайдеров среди электросетевых организаций. **МЕТОДЫ.** Для расчета весовых коэффициентов применялся метод анализа иерархий в классической и нечеткой постановках. Бенчмаркинг энергоэффективности выполнялся с помощью ранжирования электросетевых организаций по интегральному показателю энергоэффективности. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Сформирована трехуровневая иерархия показателей энергоэффективности. Представлен алгоритм принятия решения при проведении анализа энергетической эффективности объектов энергетической отрасли. Рассчитаны весовые коэффициенты показателей и интегральные значения энергоэффективности организаций. Были определены показатели, оказывающие наибольшее влияние на суммарную эффективность объекта. Сформирована сводная диаграмма сравнения всех филиалов, выявлены наиболее и наименее успешные организации. **ВЫВОДЫ.** Анализ энергетической эффективности, проведенный с применением двух методов анализа иерархий позволил выявить преимущества и недостатки классического представления метода. Определение лидеров внутри филиальной структуры электросетевой организации позволяет проанализировать применяемые методы повышения энергоэффективности, а также внедрить их в дальнейшем в менее успешные филиалы.

Ключевые слова: *метод анализа иерархии; интегральный показатель; весовой коэффициент; лингвистическая переменная; степень нечеткости; электросетевая организация; экспертный анализ.*

Для цитирования: Лесс В.М., Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Анализ энергоэффективности энергетических объектов с применением методов ранжирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.

ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF ENERGY FACILITIES USING RANKING METHODS

Less V.M., Lyubchenko V.Y., Pavlyuchenko D.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

lessv134@gmail.com

Abstract: RELEVANCE. Increasing energy efficiency is one of the necessary conditions for modernizing the Russian economy. High energy intensity and energy efficiency analysis are due to the combined influence of a number of factors, both global and private. Thus, for electric grid organizations the problem of energy efficiency is a priority. Having at their disposal electrical grid facilities, including points of reception and transmission of electrical energy, electrical equipment and power transmission lines, electrical grid organizations incur huge losses caused by losses during the transmission of electrical energy, losses associated with the unaccounted share of electricity, as well as third-party factors. **OBJECT.** Conduct an analysis of the energy efficiency of an electric grid organization that has 10 branches. Form a hierarchy of energy efficiency indicators, determine the impact of each indicator on the integral indicator that reflects the energy efficiency of the facility. Conduct benchmarking, identify leaders and outsiders among power grid organizations. **METHODS.** To calculate the weight coefficients, the method of analysis of hierarchies in the classical and fuzzy formulations was used. Energy efficiency benchmarking was carried out by ranking power grid organizations according to the integral indicator of energy efficiency. **RESULTS.** A three-level hierarchy of energy efficiency indicators has been formed. A decision-making algorithm is presented when analyzing the energy efficiency of energy industry facilities. The weight coefficients of indicators and integral values of energy efficiency of organizations are calculated. The indicators that have the greatest impact on the overall efficiency of the facility were identified. A summary diagram of comparison of all branches has been formed, the most and least successful organizations have been identified. **CONCLUSIONS.** The analysis of energy efficiency, carried out using two methods of analysis of hierarchies, made it possible to identify the advantages and disadvantages of the classical representation of the method. Determination of leaders within the branch structure of the electric grid organization allows us to analyze the methods used to improve energy efficiency, as well as to introduce them in the future to less successful branches.

Keywords: hierarchy analysis method; integral indicator; weight coefficient; linguistic variable; degree of fuzziness; power grid organization; expert analysis.

For citation: Less V.M., Lyubchenko V.Y., Pavlyuchenko D.A. Energy efficiency analysis of energy facilities using ranking methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 42-58. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-42-58.

Введение (Introduction)

Развитым странам мира, обладающим значительными запасами энергетических природных ресурсов, высокая энергоёмкость обходится дорого. Объясняется это необходимостью обеспечения энергетической безопасности и охраны окружающей среды. Проблема высокого уровня энергоёмкости решается путем разработки энергоэффективных технологий, внедряемых на энергетических объектах, а также с помощью нормативно-правовых мер, регулирующих энергопотребление, как на государственном, так и частном уровне.

Энергетическая эффективность подразумевает экономически оправданное использование топливно-энергетических ресурсов при современном уровне развития оборудования и технологий. В отличие от энергосбережения, целью которого является уменьшение энергопотребления, термин энергоэффективность подразумевает рациональное расходование энергии. Вопрос сохранения и рационального использования природных ресурсов решается на мировом, государственном, областном, региональном и муниципальном уровнях. Это связано с тем, что по мере развития промышленности и разрастания городов увеличивается негативное влияние на окружающую среду. Актуальность темы подтверждается принятой стратегией развития на период до 2030 года, целью которой является снижение энергоёмкости на 50% относительно 2007 года. Кроме этого, в России активно обновляются Государственные стандарты, нормирующие показатели энергетической эффективности, внедряются новые нормативные документы и санитарные нормы.

Одним из наиболее информативных документов является Федеральный закон № 261 «Об энергосбережении», относящийся к сфере энергетической эффективности. Данный закон регламентирует процесс формирования стратегий на региональном и частном секторах экономики, посвященных увеличению уровня энергетической эффективности, а также разработки и внедрения мер, предназначенных для увеличения эффективности регулирования тарифной сферы.

Каждая отрасль производства по-своему подвержена влиянию низкой энергетической эффективности: большие затраты энергетического топлива, неоправданный износ оборудования, убытки, вызванные потерями энергии. В связи с этим, для анализа энергоэффективности и ее дальнейшего повышения разрабатываются универсальные математические методы, применяемые к разнообразным энергетическим объектам.

Литературный обзор (Literature Review)

Высокая энергоемкость и анализ энергоэффективности обусловлены совокупным влиянием ряда факторов как глобальных, так и частных, что нашло отражение в ряде научных работ и публикаций.

В статье Давыдова А.Р. [1] была проанализирована динамика изменения энергетической эффективности стран мира с использованием статистических данных за двадцать лет. За этот период в большинстве рассматриваемых стран Азии наблюдался существенный рост потребления энергии, который вызвал изменение структуры потребления по секторам. Так, например, в Китае были разработаны стратегии развития промышленного и жилого секторов, без которых страна на сегодняшний день потребляла бы на 25% больше энергии.

В исследовании [2] освещается роль и значимость законодательно-правовой базы в сфере энергосбережения, а также описываются основные причины низкой результативности применяемых мер по энергосбережению на промышленных предприятиях. К таким причинам автор работы относит отсутствие системности при замене устаревшего оборудования, неверное восприятие энергетически обследований как непосредственные энергосберегающие мероприятия, а также крайне низкое использование энергосервиса, как механизма современного энергосбережения. Внедрение энергетического сервиса, по мнению автора, представляет собой один из важнейших драйверов системного энергосбережения в промышленности, использование которого способно коренным образом повысить ее энергоэффективность.

В статье «Анализ мероприятий повышения энергоэффективности» [3] приводятся организационные мероприятия и меры технического характера политики энергоэффективности торговой сети. Предлагаемые методы охватывают широкую область деятельности рассматриваемого объекта: начиная с обучения персонала основам энергосбережения и совершенствованием организационной структуры управления и заканчивая разработкой новых технологий производства и внедрением дорогостоящего современного энергоэффективного оборудования. Безусловно, каждый из предложенных методов в той или иной мере способствует повышению энергетической эффективности объекта. Однако, чаще всего основная сложность повышения энергоэффективности заключается в выборе наиболее перспективных путей развития энергетического объекта. Автор статьи также отмечает, что предложить единый подход к оптимизации тепло- и энергоснабжения не представляется возможным ввиду наличия индивидуальных признаков у рассматриваемых энергетических объектов.

Не менее важное значение имеют научные исследования, посвященные анализу энергетической эффективности с целью оказания помощи в принятии решения в процессе модернизации энергетического объекта. В частности, в статье Ратмановой [4] приводится описание метода оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на региональном уровне с помощью нечеткой логики. Для установления логической связи между количественными значениями энергоэффективности с комплексными показателями, автором вводятся лингвистические переменные, характеризующие динамику использования ТЭР. В статье Заславского И.С. освещаются актуальность и методы оценивания энергетической безопасности объектов энергосистемы [5]. Следует отметить, что сложность оценивания во многом зависит от источников рисков и возможности или невозможности подлинно их прогнозировать. Прежде всего, трудоемкость выявления критериев для анализа, связанна с меняющейся энергетической политикой регионов, изменением технических характеристик энергосистемы, подверженностью региона к природным или техногенным катастрофам. Для проведения исследования авторами применяются такие методы, как индикативный метод, метод анализа иерархий, метод нечетких множеств. В статье приводится сравнение данных методов, выявление их достоинств и недостатков. Следует отметить, что метод анализа иерархий (МАИ) предложенный Т. Саати широко используется при оценке показателей энергоэффективности. Так, например, в статье [6] для совершенствования системы управления энергоэффективностью бюджетных организаций основным математическим аппаратом выступает МАИ. В исследовании [7] метод анализа иерархий применяется для

оценки качества освещения в аудиториях. Научная работа [8] посвящена «зеленой» экономической эффективности Китая в условиях пандемии COVID-19. Пути достижения эффективности оценивались путем анализа критериев и десяти подкритериев в контексте природоохранного законодательства. В статье [9] МАИ совместно с информационно-аналитической системой позволил разработать алгоритм анализа энергетической эффективности электросетевых организаций.

Гапонов А.И. в своей статье [10] для решения задач многокритериального анализа применяет синтез МАИ и теории нечетких множеств. В этом случае математический алгоритм основан на совместном использовании принципа оценок лингвистических переменных Белмана-Заде и метода парных сравнений Саати. Подобный синтез методов также применяется в [11] для комплексной оценки силовых трансформаторов на основе многокритериального подхода к принятию решений и в [12] для анализа видов и последствий отказов.

Для анализа критериев энергоэффективности часто используется метод анализа иерархий с элементами нечеткой логики (НМАИ). В исследовании [13] нечеткий метод анализа иерархий применяется для построения многокритериальной комплексной системы оценки энергоэффективности угольных агрегатов, включая технологии, охрану окружающей среды, экономику и социальные выгоды. В статье [14] традиционные и возобновляемые источники энергии для устойчивого развития энергетического сектора Индии оцениваются с разных точек зрения, включая экономические, технические, социальные, экологические, политические. Метод энтропии Шеннона позволил определить веса критериев принятия решений, а метод нечеткой аналитической иерархии (НМАИ) применялся для определения приоритетов альтернатив устойчивой энергетики. Для выполнения оценки энергетических систем и инвестиционных планов в Саудовской Аравии в [15] были использованы такие методы как нечеткий МАИ, VIKOR, TOPSIS, а метод анализа иерархий использовался для определения весовых коэффициентов рассматриваемых критериев.

Приведенный обзор научных публикаций по теме исследования подчеркивает актуальность проблемы и широкий интерес к решению анализу энергетической эффективности при принятии решения в процессе управления и модернизации энергетических объектов.

В представленной работе в качестве объекта исследования рассмотрены региональные электрические сети. Для этого энергетического объекта разработана иерархическая система показателей энергоэффективности, а также представлена методика анализа энергоэффективности с использованием метода анализа иерархий в четкой и нечеткой постановках, а также решение задач бенчмаркинга.

Материалы и методы (Materials and methods)

На рисунке 1 представлена общая процедура принятия решения, основанная на систематизации процесса анализа энергоэффективности функционирования электросетевых организаций.

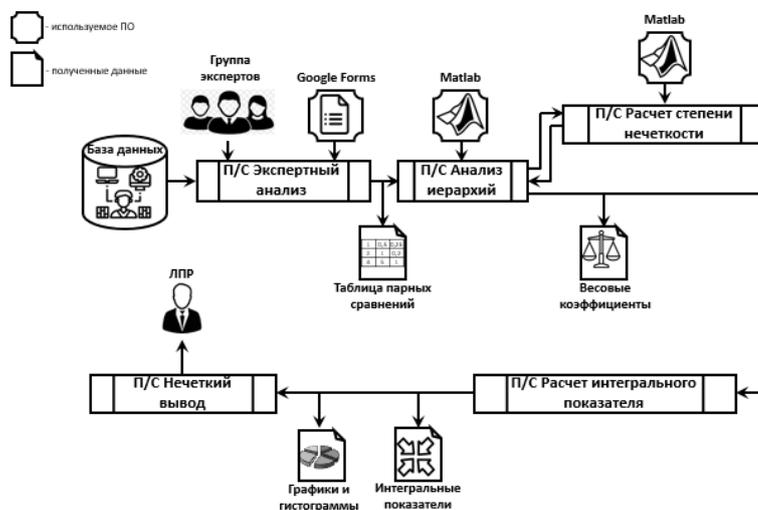


Рис. 1. Общая процедура принятия решения для анализа энергоэффективности объекта Fig.1. Common decision measures for analyzing the energy efficiency of a facility

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сформированная база данных содержит статистические данные о функционировании объекта, сведения об энергобалансе и состоянии имеющегося оборудования, а также общую информацию, касающуюся технологических особенностей исследуемого объекта. С использованием методов экспертного анализа производится парное сравнение показателей энергоэффективности электросетевых организаций. Обработка и анализ данных об энергообъекте осуществляется на основе метода анализа иерархий в четкой и нечеткой постановках (МАИ/НМАИ). Полученные весовые коэффициенты применяются для расчета интегрального показателя. На последнем этапе осуществляется нечеткий логический для принятия решения.

Таким образом, предложенная процедура принятия решений основана на методе анализа иерархий. Разработанный Томасом Саати метод анализа иерархий представляет собой алгоритм проведения систематической оценки сформированных в иерархическую форму элементов, характеризующих исследуемую задачу. Метод подразумевает дробление единой, обширной, сложной цели на более локальные и простые задачи (декомпозиция). Дальнейшим этапом является анализ последовательности мнений лиц, принимающих решения (ЛПР) на основании результатов проведенных парных сравнений исследуемых элементов. Выходными переменными МАИ являются данными относительно интенсивности взаимодействия рассматриваемых показателей между собой внутри иерархической структуры.

Метод анализа иерархий формируется из таких математических процессов, как синтез многовариативных мнений, определение важности каждого показателя, выявление альтернативных способов решения поставленных задач. Структура данного алгоритма сформирована на основании человеческой способности мыслить нестандартно. Таким образом, использование данного метода приводит к тому, что поставленная в исследовании цель и все сопровождающие факторы, оказывающие влияние на ее достижение, формируют зависимые друг от друга ступени многоуровневой иерархии [16].

Первый уровень иерархии всегда определяет цель проводимого исследования и занимает вершину всей иерархической структуры. Второй уровень формируется элементами, оказывающими явное влияние на ее достижение. Следует отметить, что при этом, каждый из них представляет из себя вершину формируемого уровня, имеющую связь с вершиной 1-го уровня. По аналогии со вторым уровнем, третий уровень формируется из показателей, влияющих на вершины предыдущего уровня иерархии.

Алгоритм МАИ, после непосредственного формирования иерархии, подразумевает оценку весовых коэффициентов для каждой локальной вершины уровня. Коэффициенты, в свою очередь, характеризуют уровень зависимости исследуемой вершины от вершин более низкого уровня. Основу математических расчетов составляет метод парных сравнений показателей. Полный список математических приемов, формирующих метод анализа иерархий, представлен ниже:

- попарное сравнение критериев внутри каждого структурного уровня. Группе экспертов предлагается соотнести параметры между собой и присвоить каждой паре соответствующий балл. На основании опроса составляются обратно симметричные матрицы;
- расчет компонентов собственного вектора каждой матрицы, определение нормированной оценки вектора локальных приоритетов и проверка мнения каждого респондента на согласованность;
- определение весовых коэффициентов, которые в численной форме характеризуют значимость каждого показателя для предприятия;
- расчет интегрального показателя каждого филиала электросетевой организации на основе данных энергетических паспортов, отчетов МРСК и рейтинговых списков энергетической электросетевой компании (ЭСК).

Трехуровневая иерархическая структура показателей энергоэффективности электросетевой организации представлена на рисунке 2.

В связи с тем, что у электросетевых организаций имеются в собственности электрические сети, а также осуществляется хозяйственная деятельность по распределению и передаче электрической энергии с использованием электросетевого хозяйства, для них наиболее существенными являются факторы, характеризующие сведения о потерях электрической энергии и сведения о технической оснащённости организации.

Третий уровень иерархии формируется из показателей, влияющих на вершины 2-го уровня иерархии.

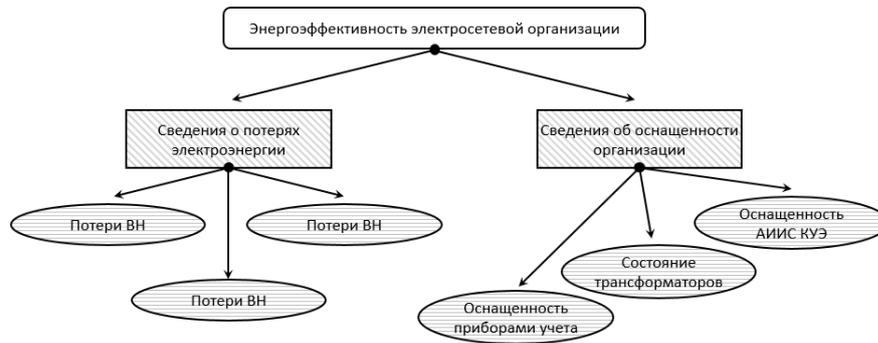


Рис.2. Иерархическая структура показателей энергоэффективности *Fig.2. Hierarchical structure of energy efficiency indicators*

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Сведения о потерях, находящиеся на втором уровне иерархии, характеризуются потерями в сетях высокого (ВН), среднего (СН) и низкого (НН) напряжений.

Что касается сведений об оснащённости рассматриваемого объекта, то в 3-ий уровень иерархии этого показателя входят: техническое состояние трансформаторов, степень оснащённости приборами учета электроэнергии, степень оснащённости автоматизированными информационно-измерительными системами коммерческого учета энергоресурсов (АИИС КУЭ).

Анализ иерархии проводится с использованием метода парных сравнений, который, в свою очередь, подразумевает сравнение показателей друг с другом внутри иерархического уровня. Сравнение производится группой экспертов в области энергоэффективности. Эксперту необходимо присвоить каждой паре критериев определенную цифру:

- 1 – критерии равнозначны;
- 3 – первый критерий обладает чуть более высокой значимостью;
- 5 – первый критерий обладает более высокой значимостью;
- 7 – первый критерий обладает очень высокой значимостью;
- 9 – первый критерий обладает абсолютно доминирующей значимостью.

В случае, если первый критерий уступает в значимости второму, то присваивается обратное значение (1/3; 1/5; 1/7; 1/9).

Для выполнения поставленных задач было привлечено 10 экспертов в области энергосбережения, которые в онлайн режиме заполнили формы анкет по сравнительному анализу показателей энергоэффективности электросетевых организаций.

С целью упрощения сбора экспертных результатов, а также для ускорения распространения анкеты среди респондентов, в работе задействовано программное обеспечение *Google Forms*. В связи с тем, что *Google Forms* - это программа для администрирования опросов, входящая в состав бесплатного веб-пакета редакторов документов *Google*, результаты опроса экспертной группы сразу же отправляются интервьюеру. Так как услуга также включает в себя *Google Sheets*, по результатам анкетирования автоматически формируются обратно-симметричные матрицы парных сравнений

На основании каждого экспертного мнения формируется матрица размером где - количество показателей в иерархическом уровне. В связи с тем, что каждый показатель равен сам себе по значимости, диагональ матрицы заполняется единицами. Верхняя треугольная часть матрицы формируется исходя из предоставленных респондентом ответов, нижняя часть – обратно-симметрична (ОСМ) (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Обратно симметричная матрица
An inversely symmetric matrix

| Эксперт №m | Г1 | Г2 | ... | Гn |
|------------|-----------------|-----------------|-----|-----------------|
| Г1 | 1 | a ₁₂ | ... | a _{1n} |
| Г2 | a ₂₁ | 1 | ... | a _{2n} |
| ... | | | 1 | |
| Гn | a _{n1} | a _{n2} | ... | 1 |

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В качестве примера ниже рассмотрим результатов парных сравнений показателей третьего уровня иерархии, относящегося к показателю «Сведения о потерях».

Для этого показателя сформирована обратно-симметричная матрица размером 3x3 (табл. 2), в которой отображены результаты сравнения показателя «Потери ВН» (далее П1), показателя «Потери СН» (далее П2) и показателя «Потери НН» (далее П3).

Таблица 2
Table 2

Обратно-симметричная матрица (ОСМ) сравнения П1, П2 и П3
Inversely symmetric matrix (OSM) of comparison P1, P2 and P3

| Эксперт №1 | П1 | П2 | П3 |
|------------|-----|----|-----|
| П1 | 1 | 3 | 1/5 |
| П2 | 1/3 | 1 | 1/3 |
| П3 | 5 | 3 | 1 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Аналогичные матрицы формируются для всех показателей 2 и 3 уровня иерархии.

Далее производится расчет компонентов собственного вектора каждой матрицы, определение нормированной оценки вектора локальных приоритетов и проверка мнения каждого респондента на согласованность. Первоначально производится определение главного собственного вектора. Его дальнейшее преобразование (нормализация) формирует вектор приоритетов.

$$a_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где a_i – собственный вектор i -ой строки, a_{ij} - элемент i -ой строки и j -го столбца матрицы, n - количество столбцов матрицы.

$$a_1 = (a_{11} \cdot a_{12} \cdot a_{13})^{\frac{1}{3}} = \left(1 \cdot 3 \cdot \frac{1}{5} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,84$$

$$a_2 = (a_{21} \cdot a_{22} \cdot a_{23})^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,48$$

$$a_3 = (a_{31} \cdot a_{32} \cdot a_{33})^{\frac{1}{3}} = (5 \cdot 3 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} = 2,47$$

Далее, по выражению (2) определяются нормированные оценки вектора локальных приоритетов:

$$T_j = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где T_j – вектор локальных приоритетов j -го столбца, a_i - собственный вектор i -ой строки.

Все составляющие вектора элементы характеризуют сравнительную значимость рассматриваемого показателя относительно критериев, находящихся на более высоких уровнях иерархии. В данном случае – интегрального показателя.

$$T_1 = \frac{a_1}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{0,84}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,22$$

$$T_2 = \frac{a_2}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{0,48}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,13$$

$$T_3 = \frac{a_3}{(a_1 + a_2 + a_3)} = \frac{2,47}{(0,84 + 0,48 + 2,47)} = 0,65$$

Используя выражения (3), производится расчет вектора приоритетов для показателей П1, П2 и П3.

$$P_g = \frac{1}{m} \cdot \sum_{h=1}^m T_{gh}, \quad (3)$$

где P_g – вектор приоритета g -го показателя, m - количество экспертов, T_{gh} - вектор локальных приоритетов g -го показателя третьего уровня иерархии и h -го эксперта.

$$P_1 = \frac{1}{6} \cdot (0,22 + 0,14 + 0,57 + 0,13 + 0,28 + 0,28) = 0,27$$

$$P_2 = \frac{1}{6} \cdot (0,13 + 0,58 + 0,32 + 0,65 + 0,58 + 0,58) = 0,48$$

$$P_3 = \frac{1}{6} \cdot (0,65 + 0,28 + 0,11 + 0,22 + 0,14 + 0,14) = 0,26$$

Используя выражение (4) производится расчет весовых коэффициентов каждого показателя, представленного в иерархии. Таким образом, значимость критериев корректируется на основе иерархической структуры.

$$K_g = P_g \cdot P_l, \quad (4)$$

где P_g - значение вектора приоритетов относительно g -го показателя третьего уровня иерархии, P_l - значение вектор приоритетов относительно l -го показателя второго уровня иерархии.

На рисунке 3 представлена круговая диаграмма весовых коэффициентов показателей энергоэффективности третьего уровня иерархии.

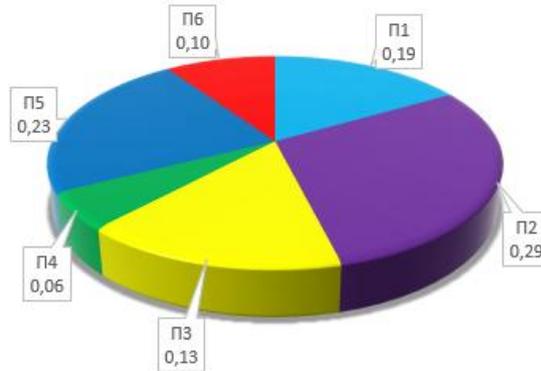


Рис. 3. Диаграмма весовых коэффициентов *Fig. 3. Energy efficiency weighting chart* показателей энергоэффективности

*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Таким образом, МАИ представляет собой способ поиска ответов для глобальных вопросов области принятия решений. Метод анализа иерархий получил широкое распространение среди научных сотрудников и технических специалистов в области разработки математических приложений, а также стратегий поиска решений, целесообразных с экономической точки зрения [9,10].

Однако, использование четкого МАИ имеет существенный недостаток, связанный с трудностями в составлении точной шкалы оценки критерия «эффективность» при проведении экспертизы на первом этапе МАИ. В связи с этим, в работе предложена методика использования метода иерархии в нечеткой постановке НМАИ с применением лингвистических переменных.

Целью внедрения лингвистических переменных является описание нематематических выражений с помощью слов естественного языка. Формирование лингвистической переменной производится на основании функции, содержащей 5 элементов:

$$\{x, T(x), X, G, M\}, \quad (5)$$

где x – имя, присваиваемое аргументу, $T(x)$ – множество имен лингвистических переменных аргументу x , X – множество элементов выбранного формата, G – синтаксическое правило, формирующее имена, присваиваемые x , и тем самым создающие новые термы, M – математическая функция, формирующая из каждого терма нечеткое выражение.

В связи с тем, что предлагаемая экспертам форма анкетирования обладает существенной погрешностью, связанной с восприятием числовой оценки показателей, используемые изначально варианты ответов 1, 3, 5, 7, 9, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9 для каждого респондента обладают различными лингвистическими значениями. Если эксперт №1 присваивает паре показателей значение «3», и допустим, подразумевает, небольшое преобладание первого показателя над вторым, то для эксперта №2, то же значение «3» может принимать иной лингвистический смысл, например, значительное преобладание. На основании (5) лингвистические переменные будут строиться следующим образом:

- x – «значимость»;

- X – множество чисел из диапазона (1;9);
- $T(x) \supset \{ \text{«одинаковая», «преобладание», «отставание»} \}$;
- X_1 - «одинаковая значимость», X_2 - «преобладание значимости», X_3 - «отставание значимости»;
- $G \supset \{ \text{«незначительное», «значительное», «сильное», «абсолютное»} \}$;
- M – процесс присваивания X нечетких аргументов. Помимо этого, задаются нечеткие множества для термов $G(T)$ на основании условий формирования нечетких связей. Путем создания функций принадлежности, относящихся к перечисленным ранее лингвистическим переменным x_1, x_2, x_3 можно произвести аналитическое определение процедуры M .

Отличительной особенностью от анкеты, используемой в четком МАИ, является предлагаемые варианты ответов: «одинаковая значимость», «незначительное преобладание значимости», «значительное преобладание значимости», «сильное преобладание значимости», «абсолютное преобладание значимости». Применение подобных лингвистических переменных улучшит уровень психологического восприятия респондента и позволит минимизировать субъективное суждение о значении каждой, ранее предлагаемой цифры.

Пусть переменная «одинаковая значимость» принимает значение (1;1;1). Функции принадлежности для остальных переменных определяются с шагом δ - степень нечеткости. Для определения степени нечеткости необходимо сопоставить весовые коэффициенты, рассчитанные по МАИ и НМАИ. Однако, для расчетов по нечеткому методу анализа иерархий требуется значение δ . В связи с этим, разработан циклический алгоритм по подбору степени нечеткости.

Нечеткое число, соответствующее лингвистической переменной, определяется треугольной функцией принадлежности в виде:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m < x \leq u, \\ 0, & x \notin [l; u] \end{cases} \quad (6)$$

где l - точка, в которой значение функции равно нулю (левый ноль), m - точка, в которой значение функции равно единице, u - точка, в которой значение функции равно нулю (правый ноль).

Элементы матрицы ОСМ определяются по выражениям (7) - (8):

$$a_{ij} = (l, m, u) \quad (7)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ij}} = \left(\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l} \right) \quad (8)$$

Согласно алгоритму метода анализа иерархий, определение значений весов критериев энергоэффективности с использованием нечетких выражений опирается на результаты анализа нечетких матриц парных сравнений (НМПС). Данные матрицы парных сравнений модернизируются с помощью замены дискретных значений, составляющих основу матрицы, на нечеткие. Нечеткие величины, в свою очередь, обладают треугольными функциями принадлежности вида (8). В связи с тем, что эти функции имеют три элемента, НМПС становится прямоугольной матрицей. Ее размерность – $n \times 3n$, где n – количество показателей, участвующих в сравнении. Для построения обратно-симметричных матриц используется шкала относительной важности показателей, которая, в свою очередь, определяется функциями принадлежности (табл. 3).

Степень нечеткости предварительно принимается $\delta = 1$.

Таблица 3

Table 3

Нечеткая шкала значимостей критериев энергоэффективности

Fuzzy scale of significance of energy efficiency criteria

| Лингвистическая переменная | При $\Gamma_1 > \Gamma_2$ | При $\Gamma_1 < \Gamma_2$ | a_{ij} (по шкале Саати) |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Одинаковая значимость | (1;1;1) | (1;1;1) | 1 |
| Незначительное преобладание | (2;3;4) | (0,5;0,33;0,25) | 3 |
| Значительное преобладание | (4;5;6) | (0,25;0,2;0,17) | 5 |
| Сильное преобладание | (6;7;8) | (0,17;0,14;0,13) | 7 |
| Абсолютное преобладание | (8;9;10) | (0,13;0,11;0,10) | 9 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При изменении значения δ , значения рангов для нечеткой матрицы рассчитываются по формуле:

$$a_{ij} = (a_{ij} - \delta; a_{ij} + \delta), \quad (9)$$

где a_{ij} - средние четкие ранги приоритетов, δ - степень нечеткости.

В связи с тем, что функция принадлежности задается тройкой значений, все математические операции будут производиться также с тремя цифрами, вплоть до определения весовых коэффициентов.

Используя выражение (1) запишем формулу вычисления собственного вектора НМПС:

$$a_i = \left[\left(\prod_{j=1}^n l_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} ; \left(\prod_{j=1}^n m_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} ; \left(\prod_{j=1}^n u_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \right], i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

где l_{ij} – первый элемент нечеткого числа i -ой строки и j -го столбца, m_{ij} – второй элемент нечеткого числа i -ой строки и j -го столбца, u_{ij} – третий элемент нечеткого числа i -ой строки и j -го столбца, n – количество столбцов НМПС, для таблицы 3 принимается равным 3.

$$a_1 = \left[(1 \cdot 2 \cdot 0,17)^{\frac{1}{3}} ; (1 \cdot 3 \cdot 0,2)^{\frac{1}{3}} ; (1 \cdot 4 \cdot 0,25)^{\frac{1}{3}} \right] = [0,69; 0,84; 1]$$

$$a_2 = \left[(0,25 \cdot 1 \cdot 0,25)^{\frac{1}{3}} ; (0,33 \cdot 1 \cdot 0,33)^{\frac{1}{3}} ; (0,5 \cdot 1 \cdot 0,5)^{\frac{1}{3}} \right] = [0,40; 0,48; 0,63]$$

$$a_3 = \left[(4 \cdot 2 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} ; (5 \cdot 3 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} ; (6 \cdot 4 \cdot 1)^{\frac{1}{3}} \right] = [2; 2,47; 2,88]$$

Нормированные оценки вектора локальных приоритетов:

$$T_j = \left(\frac{l_i}{\sum_{i=1}^n a_i} ; \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n a_i} ; \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \right), i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

где l_i – первый элемент собственного вектора i -ой строки, m_i – второй элемент собственного вектора i -ой строки, u_i – третий элемент собственного вектора i -ой строки, a_i – собственный вектор i -ой строки.

$$T_1 = \left(\frac{0,69}{0,69+0,84+1} ; \frac{0,84}{0,69+0,84+1} ; \frac{1}{0,69+0,84+1} \right) =$$

$$= (0,22; 0,22; 0,22)$$

$$T_2 = \left(\frac{0,4}{0,4+0,48+0,63} ; \frac{0,48}{0,4+0,48+0,63} ; \frac{0,63}{0,4+0,48+0,63} \right) =$$

$$= (0,13; 0,13; 0,14)$$

$$T_3 = \left(\frac{2}{2+2,47+2,88} ; \frac{2,47}{2+2,47+2,88} ; \frac{2,88}{2+2,47+2,88} \right) =$$

$$= (0,65; 0,65; 0,64)$$

На данном этапе производится дефаззификация - обратное преобразование нечеткого множества лингвистических выходных переменных в числовые значения. Процесс дефаззификации сопровождается сначала определением среднегеометрического значения внутри вектора локальных приоритетов по выражению (12). Затем определяется среднеарифметическое значения среди всех векторов локальных приоритетов, полученных на основании опроса экспертов по выражению (13).

$$T_i = (l_i \cdot m_i \cdot u_i)^{\frac{1}{3}}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

где l_i – первый элемент вектора локальных приоритетов i -ой строки, m_i – второй элемент вектора локальных приоритетов i -ой строки, u_i – третий элемент вектора локальных приоритетов i -ой строки.

$$T_1 = (0,22 \cdot 0,22 \cdot 0,22)^{\frac{1}{3}} = 0,22$$

$$T_2 = (0,13 \cdot 0,13 \cdot 0,14)^{\frac{1}{3}} = 0,13$$

$$T_3 = (0,65 \cdot 0,65 \cdot 0,64)^{\frac{1}{3}} = 0,65$$

Определение вектора приоритетов НМПС:

$$N_g = \frac{1}{m} \cdot \sum_{h=1}^m T_{gh}, \quad (13)$$

где m - количество экспертов, T_{gh} - вектор локальных приоритетов g -го показателя третьего уровня иерархии и h -го эксперта.

$$N_4 = \frac{1}{6} \cdot (0,14 + 0,11 + 0,08 + 0,12 + 0,28 + 0,16) = 0,15$$

$$N_5 = \frac{1}{6} \cdot (0,58 + 0,63 + 0,68 + 0,48 + 0,58 + 0,67) = 0,60$$

$$N_6 = \frac{1}{6} \cdot (0,28 + 0,26 + 0,24 + 0,40 + 0,14 + 0,16) = 0,25$$

Используя выражение (14) производится расчет весовых коэффициентов каждого показателя:

$$F_g = N_g \cdot N_l, \quad (14)$$

где N_g - вектор приоритетов g -го показателя третьего уровня иерархии, N_l - вектор приоритетов l -го показателя второго уровня иерархии.

Следует отметить, что принятое ранее значение степени нечеткости $\delta = 1$ оказывает существенное влияние на результаты анализа экспертного мнения. Значение степени нечеткости характеризует погрешность, связанную с субъективным мнением респондентов. Чем ниже степень нечеткости, тем меньше границы функций принадлежности. Слишком низкое значение δ не позволит в полной мере учесть погрешность мнений экспертов, в тоже время слишком большое значение приведет к столь большому значению нечеткости, что будет нецелесообразно проводить расчеты на основании опроса. Следовательно, внедрение нечеткой логики должно вносить коррективы в значения весовых коэффициентов и никак не влиять на ранги показателей энергоэффективности.

Алгоритм поиска оптимального значения степени нечеткости следующий (рис. 4):

- определение весовых коэффициентов при разных значениях δ ;
- определение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по МАИ;
- определение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по НМАИ;
- выявление оптимального значения δ путем сравнения результатов расчета.

В связи с тем, что дисперсия (σ^2) подразумевает меру разброса значений случайной величины относительно ее математического ожидания, можно утверждать, что наиболее оптимальное значение степени нечеткости будет при:

$$\sigma_{МАИ}^2 \approx \sigma_{НМАИ}^2, \quad (15)$$

где $\sigma_{МАИ}^2$ - значение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по МАИ, $\sigma_{НМАИ}^2$ - значение дисперсии весовых коэффициентов, рассчитанных по НМАИ (рис. 5).

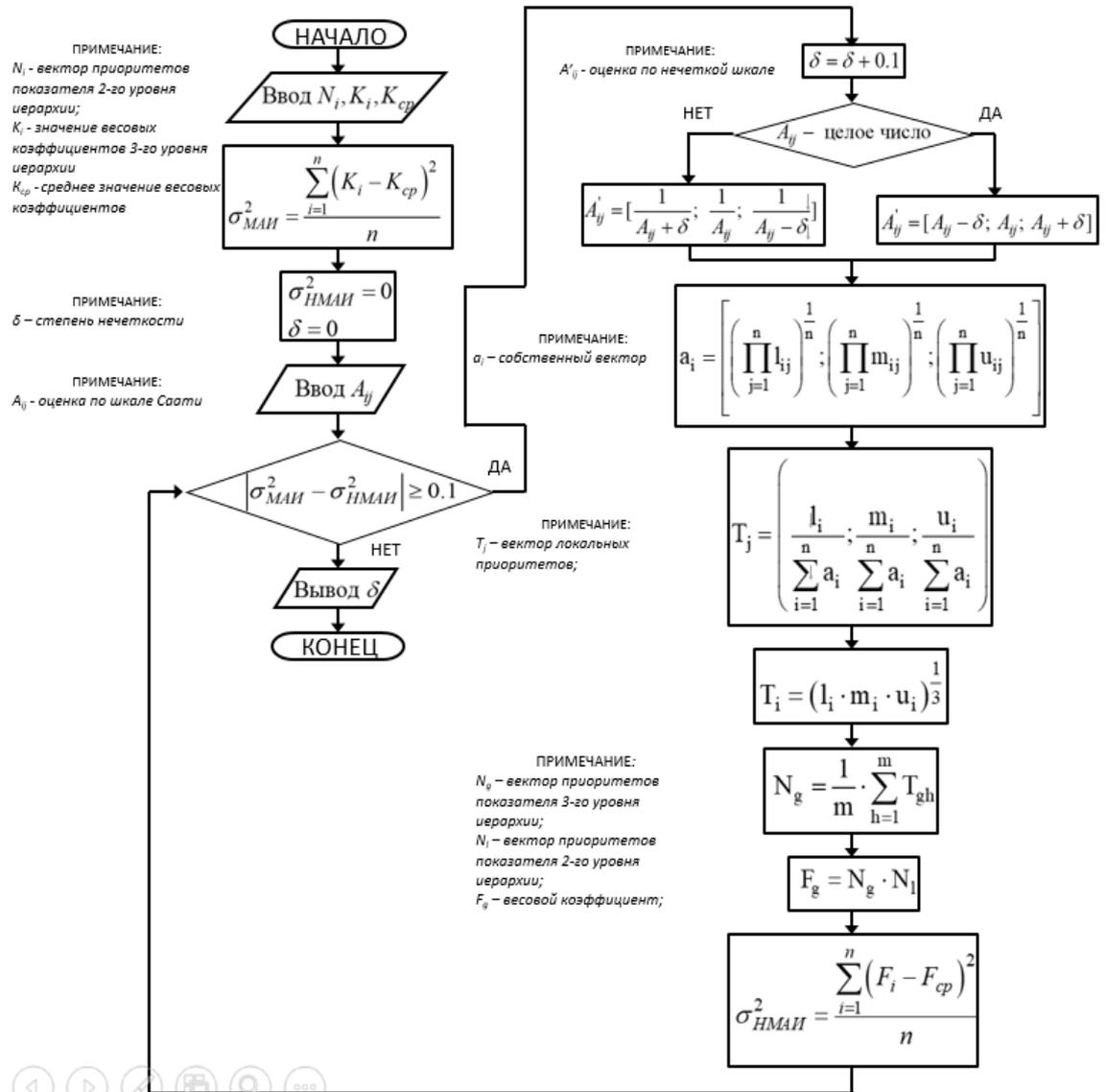


Рис. 4. Алгоритм определения степени нечеткости Fig. 4. Algorithm for determining the degree of fuzziness

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

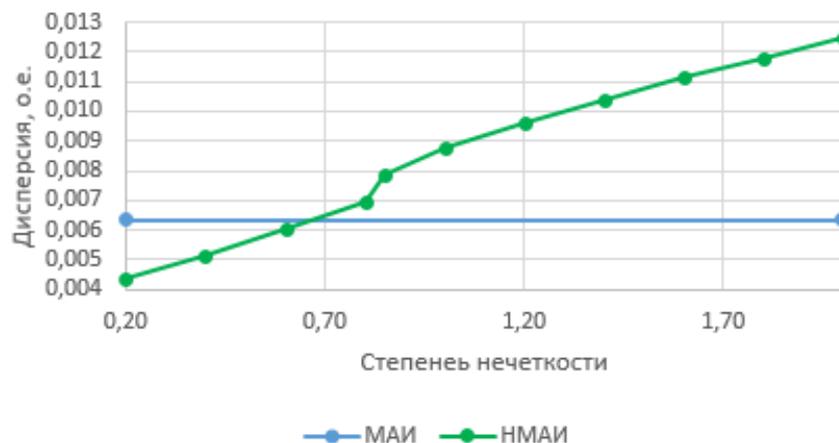


Рис. 5. График изменения дисперсии Fig. 5. Variance plot

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Применяя выражение (16) производится определение отклонения значений весовых коэффициентов. Отклонение значений характеризует погрешность, вызванную наличием субъективного мнения у респондентов. При использовании оптимального значения степени нечеткости наблюдаются наименьшие погрешности.

$$\Delta = \left| \frac{K_g - F_g}{K_g} \cdot 100 \right|, \quad (16)$$

где K_g - значение весового коэффициента g -го показателя, рассчитанного по МАИ, F_g - значение весового коэффициента g -го показателя, рассчитанного по НМАИ.

Как видно из графика, представленного на рисунке 5, значение дисперсии $\sigma^2_{\text{НМАИ}}$ приближается к оптимальному при степени нечеткости $\delta = 0,8$. Отклонение в таком случае составляет минимальное значение $\Delta = 6,39\%$.

Результаты (Results)

На гистограмме, изображенной на рисунке 6 демонстрируется сравнение весовых коэффициентов, полученных по МАИ (K_g) и весовых коэффициентов, полученные по НМАИ (F_g). Как видно из гистограммы, ранги показателей изменились. Внедрение нечеткой логики в алгоритм метода анализа иерархий Т. Саати позволило скорректировать значения весовых коэффициентов. Таким образом, наибольшей значимостью обладает показатель энергоэффективности, характеризующий потери в сетях среднего напряжения. Также был выявлен наименее значимый показатель – оснащенность АИИС КУЭ.

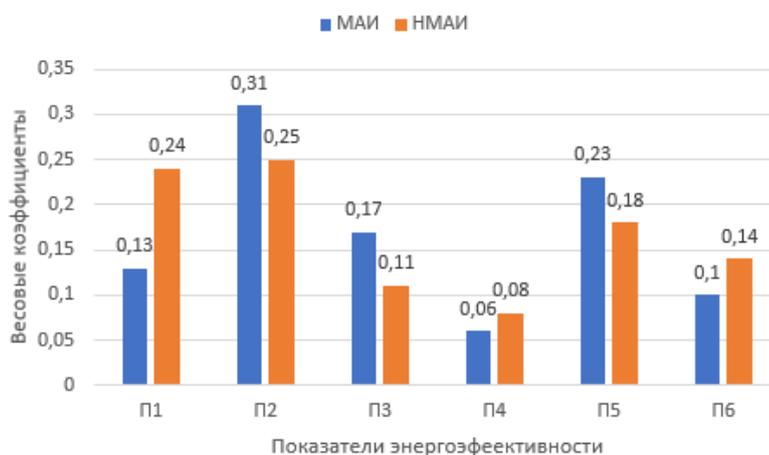


Рис. 6. Сравнительная гистограмма весовых коэффициентов Fig. 6. Comparative weight histogram

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Расчетные значения весовых коэффициентов позволяют перейти к заключительному этапу анализа энергоэффективности электросетевых организаций. В оценке энергетической эффективности на основании интегрального показателя участвует 10 филиалов электросетевой организации (О1 – О10), которые предоставили данные за три прошедших года: 2018, 2019, 2020. Непосредственно перед определением интегрального показателя электросетевых организаций, необходимо проанализировать уровень энергетической эффективности. Для этой цели производится формирование числовых промежутков каждого показателя энергоэффективности и определение их значимости.

По выражению (17), определяется степень влияния числового промежутка на энергетическую эффективность организации.

$$g_{jk} = \frac{k}{b}, \quad (17)$$

где k – порядковый номер числового промежутка, b – количество числовых промежутков.

Выражение для определения интегрального показателя энергетической эффективности электросетевой организации по всем показателям:

$$\varepsilon_j = \sum_{k=1}^{\Sigma b} g_{jk} \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_{kn} \cdot F_n}{n}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (18)$$

где Σb - количество элементов в матрице значимости числовых промежутков, Σg_{jk} – значимость k -го числового промежутка j -ой организации, $\Sigma \lambda_{kn}$ – степень принадлежности значения n -го показателя к k -му промежутку, F_n – значение весового коэффициента, относящегося к n -му показателю, n – число показателей энергоэффективности, m – количество электросетевых организаций.

Обсуждение (Discussions)

Проведенные исследования по вышеприведенному алгоритму (рис.1) на основе нечеткого НМАИ позволили рассчитать интегральные показатели энергоэффективности по всем электросетевым организациям энергосистемы. Кроме этого, в алгоритме заложена возможность анализа для отдельной организации внутри одного года. Также предусмотрены наглядные формы представления полученных результатов в форме графиков и диаграмм.

В качестве примера на рисунке 7 приведена сравнения сводная диаграмма организаций по энергоэффективности.

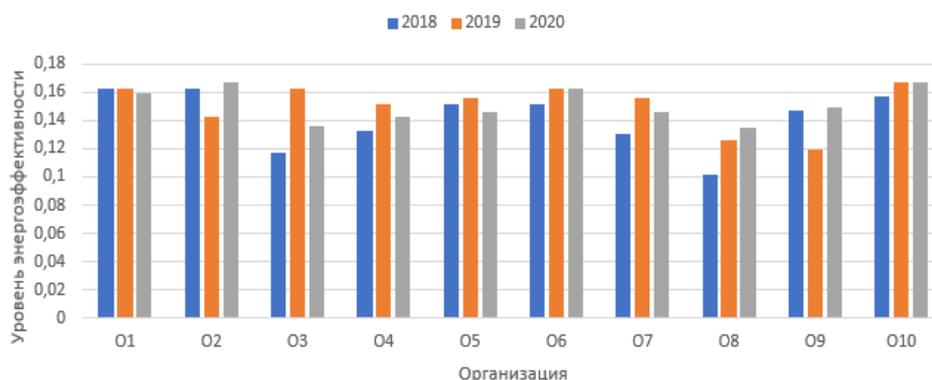


Рис. 7. Сводная диаграмма сравнения организаций Fig. 7. Organization comparison pivot chart

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленный алгоритм позволил не только проанализировать динамику развития организаций в течение трех лет, но и решить задачи бенчмаркинга - выявил лидирующих и отстающих участников филиальной структуры. Наименее энергоэффективной организацией можно считать O8, интегральный показатель которой, был равен 0,102 о.е. (при среднем значении 0,141 о.е.). На протяжении трех лет в данной электросетевой организации наблюдались высокие по сравнению с остальными организациями потери в сетях среднего и высокого напряжения. Помимо этого, в O8 наблюдается неудовлетворительный уровень технического состояния трансформаторов – 0,51 о.е. (при среднем значении 0,19 о.е.). Лидирующие позиции занимают организации O2 и O10 со значением интегрального показателя – 0,167 о.е. Наибольшей динамикой развития обладает организация O3, повысившая свой интегральный показатель на 40% в течение года. Это связано, прежде всего с резким уменьшением уровня потерь в сетях высокого и среднего напряжений.

Заключение (Conclusions)

В работе представлен алгоритм анализа энергоэффективности электросетевых организаций (рис.1), основанный на формировании интегрального показателя.

С учетом существующих требований и показателей энергоэффективности сформирована иерархическая модель (рис.2), которая может быть при необходимости адаптирована и актуализирована с учетом изменений нормативных документов РФ.

Одним из важных этапов при формировании интегрального показателя является определение весовых коэффициентов отдельных показателей. На первом этапе в работе проведен расчет весовых коэффициентов с использованием метода анализа иерархий в четкой постановке. Несмотря на имеющиеся достоинства этого метода анализа, в ходе исследования были выявлены некоторые неточности, влияющие на результаты расчетов. В результате проведенных исследований было принято решение внедрить в МАИ элементы нечеткой логики.

Как показало сравнение МАИ и НМАИ, при использовании четкой постановки метода анализа иерархий не берётся во внимание неопределённость, которая связана с отображением человеческого мнения на естественном языке. Данную проблему можно устранить, применяя нечёткую методологию, которая, в свою очередь, учитывает субъективное мнение респондентов и их психологическое восприятие оценочной шкалы. НМАИ выгодно применять, когда сложно формализовать входные данные четким образом, поскольку в данном методе применяется относительная шкала сравнений. Недостатком МАИ является слабое различие общих рангов предпочтений альтернатив, когда их больше 5-7. В тоже время, результаты НМАИ имеют сильную зависимость от

правильного формирования функций принадлежности входных данных.

Для повышения адаптационных свойств НМАИ разработан алгоритм поиска оптимального значения степени нечеткости, определяющейся субъективным мнением респондентов.

В результате применение НМАИ позволило не только упростить респондентам процесс назначения экспертных оценок путем замены цифр на лингвистические переменные, но и скорректировать ранее определенные по МАИ весовые коэффициенты показателей энергоэффективности.

По разработанному алгоритму рассчитаны интегральные показатели энергоэффективности по всем электросетевым организациям энергосистемы, а также для отдельных организаций внутри одного года.

Литература

1. Давыдов А.Р., Крузе А.А., Крылова Ю.А. Статистический анализ динамики энергоэффективности мировой экономики // Московский экономический журнал. – 2021. - №6. – С. 175-181.
2. Паламарчук А.Г. Анализ современного состояния энергосбережения в Российской промышленности (часть 2) // Научные труды ВЭО России. – 2020. – Том 222. - №2. – С. 362-379.
3. Гнездилов Д.К. Анализ мероприятий повышения энергоэффективности использования энергетических ресурсов для тоговой сети // Журнал «Постулат». – 2021. - №2. – 7 с.
4. Ратманова И.Д. Подход к оценке энергопотребления в регионе на основе использования нечеткой логики // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения). – 2021. – С. 43-46.
5. Заславский И.С., Карташова Е.Э., Паскарь И.Н. Методы оценивания энергетической безопасности объектов энергосистемы // Сборник трудов конференции «Развивая энергетическую повестку будущего». – 2021. – Санкт-Петербург. – С. 299-304.
6. Любченко В.Я., Павлюченко Д.А. Рейтинговая оценка показателей энергоэффективности метода анализа иерархий // Журнал «Новое в Российской электроэнергетике». – 2017. - №11. – С. 77-91.
7. Leccese F., Salvadori G., Rocca M., Belloni E. A method to assess lighting quality in educational rooms using analytic hierarchy process // Building and Environment. – 2020. – 27 p.
8. Saira Naseer, Huaming Song, Muhammad Shamrooz Aslam, Daud Abdul, Arsalan Tanveer, Assessment of green economic efficiency in China using analytical hierarchical process (AHP) // Soft computing in decision making and in modeling in economics. – 2021. 2489-2499 p.
9. Лесс В.М., Павлюченко Д.А., Любченко В.Я., Анализ энергоэффективности электросетевых организаций с использованием информационно-аналитических систем // Материалы научной студенческой конференции «Дни науки НГТУ-2021». – 2021. – С 112-116.
10. Гапонов А.И. Синтез метода анализа иерархий и теории нечетких множеств для решения задач ранжирования // XVI Всероссийская с международным участием научно-практическая конференция "Теория и практика экономики и предпринимательства" – Симферополь – 2019. – С 184-185.
11. Stojan Vasović, Aleksandar Dragašević, Slaviša Puzović, Sanja Puzović, Vladan Paunović, Comprehensive power transformers evaluation based on multi-criteria decision-making approach // Tehnički vjesnik. – 2021. - №5. – 1448-1455 p.
12. Фам Ван Ты, Нечеткий метод анализа иерархий и применение для анализа видов и последствий отказов // Журнал «Наука и бизнес: пути развития». – 2021. - № 3 (117). – С. 49-52.
13. Tong Si, Chunbo Wang, Ruiqi Liu, Yusheng Guo, Shuang Yue, Yujie Ren, Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: A case study of post-treatment technologies for coal-fired units // Energy. – 2020.
14. S.K. Saraswat, Abhijeet K. Digalwar, Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach // Renewable Energy. – 2021. - № 171. – 58-74 p.
15. Osman Taylan I, Rami Alamoudi I, Mohammad Kabli, Alawi AlJifri, Fares Ramzi and Enrique Herrera-Viedma, Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions // Sustainability. – 2020. - № 12 (7). – 27 p.
16. Смирнова Д.А., Гурко Н.С. Энергоэффективность предприятия. Анализ использования энергоресурсов регрессионными методами // Журнал «Главный энергетик». – 2021. - № 8. – С. 26-31.

Авторы публикации

Лесс Виталий Максимович – аспирант Новосибирского государственного технического университета, <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, lessv134@gmail.com

Любченко Валентина Яковлевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2105>, lyubchenko57@mail.ru

Павлюченко Дмитрий Анатольевич - канд. техн. наук, заведующий кафедры «Системы электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет, <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, d_pavluc@mail.ru

References

1. Davydov A.R., Kruze A.A., Krylova Yu.A. Statistical analysis of energy efficiency dynamics of the world economy // Moscow economic journal. – 2021. - №6. – 175-181 p.
2. Palamarchuk A.G. Analysis of the current state of energy saving in the Russian industry (part 2) // Scientific works of the FES of Russia. – 2020. – Volume 222. - №2. – 362-379 p.
3. Gnezdilov D.K. Analysis of measures to improve the energy efficiency of the use of energy resources for the trading network // Journal «Postulate». – 2021. - №2. – 7 p.
4. Ratmanova I.D. Approach to the assessment of energy consumption in the region based on the use of fuzzy logic // Status and prospects for the development of electrical and thermal technology (XXI Benardos Readings). – 2021. – 43-46 p.
5. Zaslavskii I.S., Kartashova E.E., Paskar' I.N. Methods for assessing the energy security of energy system facilities // Proceedings of the conference "Developing the Energy Agenda of the Future". – 2021. – St. Petersburg. – 299-304 p.
6. Lyubchenko V.Ya., Pavlyuchenko D.A. Rating assessment of energy efficiency indicators of the hierarchy analysis method // Journal "New in the Russian Electric Power Industry". – 2017. - №11. – 77-91 p.
7. Leccese F., Salvadori G., Rocca M., Belloni E. A method to assess lighting quality in educational rooms using analytic hierarchy process // Building and Environment. – 2020. – 27 p.
8. Saira Naseer, Huaming Song, Muhammad Shamrooz Aslam, Daud Abdul, Arsalan Tanveer, Assessment of green economic efficiency in China using analytical hierarchical process (AHP) // Soft computing in decision making and in modeling in economics. – 2021. 2489-2499 p.
9. Less V.M., Pavlyuchenko D.A., Lyubchenko V.Ya., Analysis of the energy efficiency of electric grid organizations using information and analytical systems // Proceedings of the scientific student conference «Days of Science NSTU-2021». – 2021. – 112-116 p.
10. Gaponov A.I. Synthesis of the method of analysis of hierarchies and the theory of fuzzy sets for solving problems of ranking // XVI All-Russian Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Economics and Entrepreneurship" with international participation – Simferopol – 2019. – 184-185 p.
11. Stojan Vasović, Aleksandar Dragašević, Slaviša Puzović, Sanja Puzović, Vladan Paunović, Comprehensive power transformers evaluation based on multi-criteria decision-making approach // Tehnički vjesnik. – 2021. - №5. – 1448-1455 p.
12. Fam Van Ty, Fuzzy method of analysis of hierarchies and application for the analysis of types and consequences of failures // Journal "Science and Business: Ways of Development". – 2021. - № 3 (117). – 49-52 p.
13. Tong Si, Chunbo Wang, Ruiqi Liu, Yusheng Guo, Shuang Yue, Yujie Ren, Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: A case study of post-treatment technologies for coal-fired units // Energy. – 2020.
14. S.K. Saraswat, Abhijeet K. Digalwar, Evaluation of energy alternatives for sustainable development of energy sector in India: An integrated Shannon's entropy fuzzy multicriteria decision approach // Renewable Energy. – 2021. - № 171. – 58-74 p.
15. Osman Taylan 1, Rami Alamoudi 1, Mohammad Kabli, Alawi AlJifri, Fares Ramzi and Enrique Herrera-Viedma, Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions // Sustainability. – 2020. - № 12 (7). – 27 p.
16. Smirnova D.A., Gurko N.S. Enterprise energy efficiency. Analysis of the use of

energy resources by regression methods // Journal "Chief Power Engineer" – 2021. - № 8. – 26-31 p.

Authors of the publication

Vitalii M. Less –Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, lessv134@gmail.com.

Valentina Y. Lyubchenko – Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0001-8343-2105>, lyubchenko57@mail.ru.

Dmitrii A. Pavlyuchenko - Novosibirsk state technical university, <https://orcid.org/0000-0003-4522-9557>, d_pavluc@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено **11.11.2022 г.**

Отредактировано **21.02.2023 г.**

Принято **27.10.2023 г.**



НЕОБХОДИМОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОЩНОСТЕЙ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ И ТРАНССИБИРСКОЙ МАГИСТРАЛЕЙ

Шушпанов ¹ И.Н., Пермякова ² Д.Н., Конюхов ¹ В.Ю., Опарина ¹ Т.А.

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

PermyakovaD@student.bmstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Изучить необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей сегодня в рамках увеличения перевозочных мощностей железнодорожной транспортной системы в Восточном направлении. В представленной научной работе авторами произведён анализ актуальной проблемы, технических отказов оборудования тяговых подстанций железнодорожной линии. Анализ позволил выявить, что основной причиной отказов оборудования системы тягового электроснабжения является износ оборудования на долю которого приходится около 45%. *МЕТОДЫ.* С целью выявления технически слабых зон на установленном участке железнодорожной линии с учетом пропуска поездов повышенной массы для перспективного развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока в восточном направлении при помощи программного комплекса Кортэс выполнены тяговые расчеты. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Полученные расчетные значения при существующих размерах организации движения поездов позволили сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети и пропустить плановый поездопоток. Наибольшее количество отказов приходится на оборудование тяговой подстанции №4, что вызывает необходимость замены или модернизации данного оборудования. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* По результатам проведенной работ была определена целесообразность реконструкции тяговых подстанций с учетом перспективного состояния функционирования участка.

Ключевые слова: *системы тягового электроснабжения; отказы оборудования; тяговая подстанция; график исполненного движения; параметры нормального режима работы участка.*

Для цитирования: Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.. Необходимость обеспечения потребных электрических мощностей объектов транспортной инфраструктуры байкало-амурской и транссибирской магистралей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 59 – 73. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-59 – 73.

THE NEED TO PROVIDE THE REQUIRED ELECTRICAL CAPACITIES OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE FACILITIES OF THE BAIKAL-AMUR AND TRANS-SIBERIAN HIGHWAYS

Shushpanov ¹ I.N., Permyakova ² D.N., Konyukhov ¹ V.Yu., Oparina ¹ T.A.

¹ Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

² Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
Moscow, Russia

PermyakovaD@student.bmstu.ru

Abstract: THE PURPOSE. To study the need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways. Today, increasing the transportation capacity of the railway transport system in the Eastern direction is an important transport task.. The solution of problems related to the creation of transport infrastructure is inextricably linked with the creation of sources of electric power in the presented scientific work, the authors analyzed the technical failures of the equipment of traction substations of the railway line. This analysis revealed that the main cause of equipment failures of the traction power supply system is equipment wear. It accounts for about 45% of failures, which is certainly a lot. **METHODS.** In order to identify technically weak zones on the established section of the railway line, taking into account the passage of heavy trains for the prospective development of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways, traction calculations were performed using the Kortex software package as part of the increase in freight traffic in the eastern direction. **RESULTS.** The calculated values obtained with the existing dimensions of the organization of train traffic allowed us to conclude that the traction power supply system of the section in question does not allow to provide the necessary level of traction network parameters and skip the planned train flow. The largest number of failures falls on the equipment of traction substation No. 4, which necessitates the replacement or modernization of this equipment. **CONCLUSION.** The expediency of reconstruction of traction substations is determined, taking into account the prospective state of operation of the site.

Keywords: traction power supply systems; equipment failures, traction substation; schedule of executed movement; parameters of the normal operation of the site.

For citation: Shushpanov I.N., Permyakova D.N., Konyukhov V.Yu., Oparina T.A. The need to provide the required electrical capacities of the transport infrastructure facilities of the Baikal-Amur and Trans-Siberian highways. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 59 – 73. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-59-73.

Введение (Introduction)

Целью данной работы является разработка оптимальных условий тягового электроснабжения железного транспорта. Данный вопрос очень актуален, особенно с практической точки зрения. Именно эффективное и своевременное решение задачи обеспечения электрических мощностей будет способствовать ускорению научно-технического прогресса всего народного хозяйства, что безусловно даст возможности к развитию наукоемких производств. Поэтому с научной точки зрения вопрос также весьма актуален. Существующие тяговые объекты железнодорожных линий, в качестве которых чаще всего выступают тяговые подстанции согласно установленной технологии работы обеспечивают электроэнергией одновременно и транспортных и нетранспортных потребителей, географически расположенных в зоне прилегающей к электрифицируемому участку. С этой целью на тяговых подстанциях устанавливают трехобмоточные понижающие трансформаторы, сооружают распределительные устройства на 10 и 35 кВ на опорах контактной сети постоянного тока подвешивают линии продольного электроснабжения 10 кВ, а на участках переменного тока – 27,5 кВ [1-3]. Следует отметить, что устройства электроснабжения и электроподвижной состав способны работать в суровых климатических и географических условиях: при температуре от +45 до –50оС, в зонах вечной мерзлоты, при гололеде с толщиной корки до 35 мм и скорости ветра до 40 м/с [3-4].

Литературный обзор (Literature Review)

Проблемой обеспечения необходимых условий для бесперебойной работы транспортной инфраструктуры в восточных и северных регионах нашей страны занимались многие ученые. Почти все из них пришли к выводу, что подходить к проблеме оснащения инфраструктурных объектов в условиях агрессивного климата нужно комплексно и с особым вниманием. Высокие температуры и суровый, непостоянный климат оказывает негативное воздействие на работу оборудования и объектов в том числе и транспортной инфраструктуры. Часто это воздействие плохо прогнозируемо. В данный

условиях риск аварий и перебоев энергоснабжения многократно возрастает. При этом перебой, возникшие в таком случае, устранить гораздо сложнее. Связано это прежде всего с тем, что логистическая доступность байкало-амурской и транссибирской магистралей не позволяет оперативно доставить комплектующие. Кроме того, то оборудование, которое эффективно работает в умеренном климате, может оказаться совершенно непригодным для работы в северных широтах. Зачастую, понять, как будет функционировать тот или иной агрегат можно уже непосредственно на месте. Вот только часть проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации сооружений, служащих для обеспечения потребных электрических мощностей.

Как показывают практические эксперименты большая часть данных проблем может быть решена при помощи грамотного структурирования данных. В свою очередь этого можно добиться, используя математическое или компьютерное моделирование.

Так в работах [5] автор исследует особенности эксплуатации и технического обслуживания железнодорожного полотна в северных широтах. Отдельное внимание в работе уделено визуализации температурных изменений. Для этого автор применяет программу MATLAB. В качестве исходных данных для моделирования были использованы климатические факторы, а также характеристики грунта и особенности рельефа га исследуемом участке. Отдельно учитывались такие параметры как атмосферное давление и высота насыпи. В результате автор доказал, что при строительстве железнодорожного полотна целесообразнее использовать защитный слой из гравия или каменистого грунта. Данные материалы способствуют поддержанию мерзлого состояния земли, а также обеспечивают стабильные физические свойства, что немаловажно в переменном климате.

Также моделирование используют и в работах на стыке энергетики и других наук. Например, в статье [6] показано использование аналитического подхода для выявления взаимосвязи экономики и энергетики, а также взаимосвязи компонентов системы с окружающей средой. Для анализа использовались технологии больших данных. В связи с этим было необходимо достаточно точно подходить к сбору и представлению статистических данных, а также по возможности упрощать их представление. Для этого авторы использовали наглядную визуализацию данных в виде столбчатых диаграмм. Аналогичные подходы использованы также в работах [7-11].

Вместе с тем, даже в такую стандартную операцию как сбор и визуализация данных для моделирования приходят технологии, способные упростить процесс исследования. Основная их цель выполнять автоматическую работу вместо исследователя, давая тем самым ученому время и ресурсы для непосредственно анализа полученных результатов [8].

В статье [9] для сбора данных и последующего моделирования системы используют машинное обучение. Результаты визуализируются при помощи графиков. Результаты процесса обучения также представлены в удобной графической форме. Данное решение не только более понятно визуалью, но и необходимо для оптимизации последующих экспериментов и удобно при поиске ошибок.

Литературный обзор и подготовка рукописи публикации были выполнены Д.Н. Пермяковой. В данной статье представлены результаты моделирования, выполненного И.Н. Шушпановым. Разработкой методики занимался В.Ю. Конюхов. Проанализировала результаты Т.А. Опарина.

Материалы и методы (Materials and methods)

Тяговой расчет железнодорожной линии проводился в программном комплексе Кортэс.

Прямая зависимость интенсивности движения и потребления энергии из тяговой сети определяет минимальный интервал между поездами. Использование математической среды «Кортэс» и внесение данных существующего графика движения поездов позволило оценить работу используемых устройств системы тягового энергоснабжения. Исходными данными для выполнения расчетов явились установленные для рассматриваемого участка весовые нормы, используемые серии локомотивов, график движения поездов. Вариация межпоездного интервала позволила обосновать комплекс мер, направленных на усиление конкретного участка.

В таблице 1 приведена статистика отказов оборудования тягового электроснабжения железнодорожной линии *NI* за период 2016-2020 годы.

Таблица 1

Table 1

Статистика по отказам оборудования тяговых подстанций установленной железнодорожной линии
Statistics on equipment failures of traction substations of an installed railway line

| Наименование тяговой подстанции железнодорожной линии <i>NI</i> | Место повреждения | Вид повреждения | Причина повреждения | Классификация повреждений |
|---|---|--|---|---------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Повреждения за 2016 год | | | | |
| Тяговая подстанция №1 | Ввод ВМ-10 Т-1 фазы «А» | Повреждение ТН-35 (ЗНОМ-35) | Междуфазное к.з. из-за повреждение ТН-35 на ТП-МВД | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №2 | Отключение выключателя 11 Ф-10 кВ. | Перекрытие проходного изолятора ИП-10 ввода ВМ-10 Т-1 фазы «А» | Увлажнение изоляции | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №3 | РЛНД-27,5 | Повреждение и разграбление 2 ДТ в линии отсоса тяговой подстанции | Посторонние лица | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №4 | Отключение 6ФКС.(ВВК27,5 и ОР) | Самопроизвольное отключение разъединителя | КЗ в цепях привода. (Нарушение изоляции корпуса тумблера ТВ1-2 в приводе разъединителя) | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №5 | Отключение фидеров КС 1-5 | Повреждение катушки включения КСВ | Разрушение рамки толкателя подвижных контактов | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №6 | Отсос | Повреждение ТН220кВ на РП | Коммутационные перенапряжения | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №7 | ВМТ-220 | Разграбление ДТ в линии отсоса тяговой подстанции | Посторонние лица | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №8 | Отключение В55 Т-1 | Излом опорного изолятора ШР 1с.ш. ф.С | Заводской брак | Заводской брак |
| Тяговая подстанция №9 | Отключение Т4 | Повреждение ввода 110кВ выключателя В-110 Т-4 | Увлажнение. Разгерметизация ввода | Износ оборудования |
| Повреждения за 2017 год | | | | |
| Тяговая подстанция №4 | Отключение В27-2Т, ФКС 1,2 | Неисправность механизма свободного расцепления ВДПР-Вост. Типа ВМКЭ-35 | Разрушение шайбы | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №11 | Отказ включения ВБН-27,5 (ФКС-1) | Повреждение катушки включения привода ПЭ-200 | Пробой изоляции вывода на корпус привода | Износ оборудования |
| Повреждения за 2018 год | | | | |
| Тяговая подстанция № 12 | Отсутствие напряжения в контактной сети | Отключение ФКС №6. Отказ при включении | Неисправность привода выключателя типа ВБЭТ-27,5 – заедание штока электромагнита отключения. Отсутствие смазки. | Ошибка персонала |

Продолжение таблицы 1

Continuation of table 1

| Повреждения за 2019 год | | | | |
|-------------------------|--|---|---|--------------------|
| Тяговая подстанция № 1 | Повреждение кабеля | Высыхание изоляции | Старение | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №4 | Пробой изолятора 2ТСН-10 | Близкое КЗ | Перекрытие вводов 10 2ТСН | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №13 | Не отключился привод | Проскальзывание барабана привода | Из-за износа шестеренок | |
| Тяговая подстанция №15 | ОД-110 не отключился | При колебаниях температур окружающей среды, соскользнула защелка КЗ-110, ОД-110 не отключен | Затвердевание смазки в механизме привода | Ошибка персонала |
| Повреждения за 2020 год | | | | |
| Тяговая подстанция №4 | Отключение В220кВ | Произошло аварийное отключение в системе внешнего электроснабжения | Внешнее воздействие | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №5 | Падение напряжения в контактной сети ниже нормы или отсутствие | Отключение по вводам В переменного тока 27 кВ | Перегоревший ТЭН подогрева привода В-5ФКС | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №9 | Отсутствие напряжения в контактной сети | Отключение по вводам выключателя переменного тока 110 кВ | Из-за разрушения ввода МВ110кВ"М" ПС 110кВ Лесозавод принадлежащий ИЭСК | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №17 | Падение напряжения в контактной сети ниже нормы или отсутствие | Поверхностное повреждение ОПН27 2 ТН фазы А,В, отгорание шин фазы А,В в месте крепления к ОПН27 2 ТН | Эксплуатационная | Ошибка персонала |
| Тяговая подстанция №18 | Разрушение трансформатора тока | Пробой, перекрытие трансформатора тока тяговой подстанции | Эксплуатационная | Износ оборудования |
| Тяговая подстанция №19 | Отсутствие напряжения в контактной сети | Отключение по вводам выключателя переменного тока 27 кВ | Эксплуатационная | Ошибка персонала |
| Тяговая подстанция №20 | Недовключение масляного выключателя переменного тока 27 кВ | Раз регулировка выключателя переменного тока 27 кВ | Эксплуатационная | Прочие причины |
| Тяговая подстанция №21 | Отсутствие напряжения в контактной сети | Отключение (понижение) напряжения на силовом трансформаторе тяговой подстанции (110 кВ) без повреждения | Аварийное отключение ВЛ110кВ | Ошибка персонала |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно статистическим данным по отказам оборудования [12] построена диаграмма Парето, представленная на рисунке 1, проведен ее анализ.

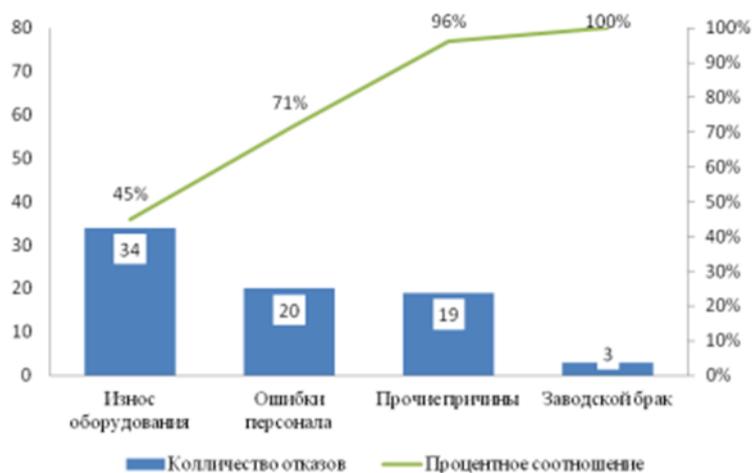


Рис.1. Статистика отказов оборудования Fig.1. Statistics of failures of power supply equipment of railway line N1

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из диаграммы Парето видно, что основная причина отказов оборудования системы тягового электроснабжения анализируемой железнодорожной линии является износ оборудования, на долю которого приходится около 45% от всего количества технических отказов.

Наибольшее количество отказов приходится на оборудование тяговой подстанции №4 (ТП), что вызывает необходимость замены или модернизации данного оборудования.

Расчет параметров нормального режима работы системы тягового электроснабжения

Используя программный комплекс Кортэс выполнен тяговый расчет с целью выявления слабых зон на установленном участке железнодорожной линии с учетом пропуска поездов повышенной массы для перспективного развития Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока в восточном направлении. В качестве исходных данных для расчета применены реальные профиль участка, существующие параметры системы его электроснабжения, размеры движения, типы и весовые нормы пропускаемых грузовых и пассажирских поездов, предусмотренные утвержденным графиком движения [13- 16].

Исходными данными для выполнения расчета также являются: тип железнодорожного пути – звеньевой, тип состава – грузовой, в составе грузового поезда – 100 % вагонов имеют роликовые подшипники, установленный участок железнодорожного пути примем как горно-перевальный с целью рассмотреть максимально сложные условия работы объектов железнодорожного транспорта. Произведён развернутый тяговый расчёт с учетом перспективного развития движения на горно-перевальном участке до 2025 года в чётном и нечётном направлениях, для поездов установленной весовой нормы 7100 тонн в нечетных направлениях, при использовании в качестве тягового подвижного состава электровоз серии Ермак [17-20].

Результаты (Results)

Для расчета параметров системы тягового электроснабжения рассматриваемого участка железнодорожной линии (далее – СТЭ) производим построение в программе K GrafDv случайного графика движения поездов, с учетом перспективных размеров движения на указанном участке, основные параметры определения структурирования данных по графику исполненного движения представлены в таблице 2.

При расчете в программном комплексе учитывалось реальное состояние системы тягового электроснабжения на участке с заданными параметрами, т.е. были учтены компенсирующие устройства. Посты секционирования и пункты параллельного соединения на данном направлении отсутствуют. По тяговым подстанциям отсутствуют компенсирующие устройства (КУ и УПК), при этом с целью опытной проверки существующих размеров движения учитывалась работа тяговых трансформаторов, установленных на подстанциях.

Таблица 2

Table 2

Результаты структурирования данных по суточному графику исполненного движения
The results of structuring the data according to the daily schedule of the executed movement

| Наименование участка | Весовые нормы грузовых поездов, тонн | Размеры движения грузовых поездов, поездов/сутки | | | |
|----------------------|--------------------------------------|--|----------|----------|----------|
| | | 2020 год | | 2025 год | |
| | | четное | нечетное | четное | нечетное |
| N1 | 7100 | 22 | - | 13 | - |
| | 6000-6300 | 19 | 1 | 19 | - |
| | 4000-4200 | 20 | 8 | 2 | 9 |
| | 3000 сборный | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | 3000 контейнерный | 12 | 12 | 14 | 14 |
| | 1500-1700 порожний | - | 50 | - | 41 |
| | итого | 75 | 73 | 69 | 66 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Все технические решения для усиления тяговой сети на участке способствуют увеличению напряжения в контактной сети до значения выше минимально допустимого (21 кВ), что позволяет увеличить пропуск поездов на участке с учетом перспективного плана движения до 2025 года [11-13, 15]. В таблице 3 приведены результаты расчета параметров режима работы СТЭ участка N1 при фактических условиях работы.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета параметров режима работы СТЭ с учетом реального состояния функционирования

The results of calculating the parameters of the operation mode of the STE, taking into account the real state of operation

| Тяговая подстанция | к пер. тр | W _{полн.} , кВ·А·ч | W _{акт.} , кВт·ч | U _{мин.} , кВ | I _{фид.мах.} , А | Нагрев проводов контактной подвески, °С | | W _{а.} , кВт·ч | | W _{р.} , кВАр·ч | | Потери в трансформаторах | |
|--------------------|-----------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|---|------|-------------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|--------------|
| | | | | | | 1/2 путь | отс. | левое | правое | левое | правое | нагревание | холостой ход |
| | | | | | | | | | | | | | |
| ТП-3 | 2,71 | 209600 | 176705 | 18,59 | 1185 | 40/47 | 51 | 0 | 106056 | 0 | 53839 | 527 | 1008 |
| ТП-4 | 1,59 | 177002 | 148230 | 21,20 | 608 | 41/46 | 45 | 70649 | 74229 | 58888 | 34615 | 543 | 1008 |
| ТП-4 | | | | | 608 | 41/45 | 45 | | | | | | |
| ТП-5 | 1,44 | | | | 534 | 41/46 | 44 | 74001 | 0 | 62119 | 0 | 294 | 1008 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных расчетных параметров при существующих режимах движения поездов можно сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети, а именно: минимальное напряжение 18,59 кВ, коэффициент перегрузки 2,71 по ТП-3. Прочие параметры тяговой сети температура контактной сети и отсасывающей линии, допустимые токи в питающих проводах в пределах нормы и не выходят за установленные ограничивающие параметры [21-24].

При этом расход электроэнергии составил:

- активной 324935 кВт·час;
- реактивной 209461 кВАр·час;
- потери в тяговой сети 1,8 %;
- максимальная температура трансформатора составила 68 °С на ТП-3.

Расчет параметров нормального режима работы участка при организации заданного движения при замене тяговых трансформаторов с 25000 кВа на 40000 кВа

В таблице 4 приведены результаты расчета параметров режима работы СТЭ рассматриваемого участка при трансформаторах увеличенной мощности [25-27].

Таблица 4
Table 4

Результаты расчета параметров режима работы СТЭ с учетом перспективного состояния функционирования

The results of calculating the parameters of the operation mode of the STE, taking into account the prospective state of operation

| Тяговая подстанция | k пер. тр | W полн., кВт·ч | W акт., кВт·ч | U _{min} , кВ | I _{фид.мак.} , А | Нагрев проводов контактной подвески, °С | | W а., кВт·ч | | W р., кВАр·ч | | Потери в трансформаторах | |
|--------------------|-----------|----------------|---------------|-----------------------|---------------------------|---|------|-------------|--------|--------------|--------|--------------------------|--------------|
| | | | | | | 1/2 путь | отс. | левое | правое | левое | правое | нагревание | холостой ход |
| ТП-3 | 0,9 | 213611 | 180299 | 20,96 | 1219 | 40/47 | 52 | 0 | 109341 | 0 | 57893 | 174 | 1728 |
| ТП-4 | 0,47 | | | | 621 | 40/46 | 45 | 70958 | 74970 | 56658 | 37734 | 166 | 1728 |
| ТП-4 | | 180590 | 151420 | 22,39 | 621 | 41/45 | 45 | | | | | | |
| ТП-5 | 0,47 | | | | 542 | 41/46 | 44 | 76450 | 0 | 60677 | 0 | 91 | 1728 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На основании полученных расчётных значений представленных в таблице 4 при существующих режимах движения поездов можно сделать вывод, что система тягового электроснабжения данного участка позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети, а именно: минимальное напряжение 20,96 кВ на участке, коэффициент перегрузки 0,90 ТП-3 [28-30, 16].

Прочие параметры тяговой сети температура контактной сети и отсасывающей линии, допустимые токи в питающих проводах в пределах нормы и не выходят за установленные ограничивающие параметры.

При этом расход электроэнергии составил:

- активной 331718 кВт*час;
- реактивной 212962 кВАр*час;
- потери в тяговой сети 1,7 %;
- максимальная температура трансформатора составила 65 0С, на ТП-3.

Целесообразность реконструкции ТП-4 с учетом перспективного состояния функционирования

По типу подключения к внешнему электроснабжению ТП-4 является транзитной, относится к первой группе, питающее напряжение 110 кВ, имеет четыре распределительных устройства ОРУ-110, ОРУ-27,5 кВ, ОРУ-35 кВ и КРУН-6 кВ.

В распределительном устройстве ТП-4 – 110 кВ предлагается замена многообъемных масляных выключателей МКП-110/1000 ШПЭ 3 (установленных в рабочей переемычке), в распределительном устройстве -27,5 кВ и 35 кВ – замена выключателей ВМК-35/1000 и ВВУ-27,5, в распределительном устройстве – 6 кВ – замена выключателей ВМПЭ-10 в связи с большим эксплуатационным сроком. Также, предлагается замена разъединителей РНДЗ – 110/630, РНДЗ-35/1000 [18,21]. Предлагаемое для реконструкции оборудование сгруппируем по классу напряжения и поместим в таблицу 5. Определим максимальные рабочие токи, таблица 6.

Таблица 5
Table 5

Предлагаемое к замене оборудование для ТП-4
Proposed replacement equipment for TP-4

| U _{уст.} , кВ | Наименование аппарата | Место установки | Тип оборудования | | Количество, шт. |
|------------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------|-----------------|
| | | | заменяемого | замещающего | |
| 110 | Выключатель | Ввода ТП и рабочая переемычка | МКП-110/1000 ШПЭ – 33 | ВЭБ-110-40/2500 | 3 |
| | Разъединитель | Ввод ТП 1, 2. Ввод СТ1, СТ2, переемычки | РНДЗ-110/630 | РГП-110-1000 | 8 |
| 35 | Выключатель | Ввод 1, 2, СВ-35 | ВМК-35Э-1000 | ВБЭТ-35/1250 | 3 |

Продолжение таблицы 5
Continuation of table 5

| | | | | | |
|------|--------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------|----|
| | Выключатель | ФРП-35, Ввод 1,2 РПТ | ВМК-35Э-1000 | ВБЭТ-35/630 | 4 |
| | Трансформатор тока | Ввод 1, 2, СВ-35, ФРП-35, 1,2 РПТ | ТФН-35М | ТВ-35 | 7 |
| | Разъединитель | Ввод 1, 2, СВ-35, ФРП-35 | РНДЗ-35/1000 | РГП-35-1000 | 16 |
| 27,5 | Выключатель | ТСН, ДПР, СЦБ | ВМК-35Э-1000 | ВБЭТ-35-630 | 5 |
| | Выключатель | Ввод 1, 2 | ВМК-35Э-1000 | ВБЭТ-35-1600 | 2 |
| | Выключатель | ФКС 1,2,3, ОВ, СЦБ | ВВУ-27,5/630 | ВБЭТ-27,5-1600 | 5 |
| | Трансформатор тока | Ввод 1, 2, ДПР, СЦБ, ТСН, ОВ, ФКС Т | ТФН-35, ТВ-35 ВВУ-27,5 | ТВ-35 ВБЭТ-35 (27,5) | 12 |
| | Разъединитель | Ввод 1, 2, ДПР, СЦБ, ТСН, ОВ, ФКС, ТН | РНДЗ-35/1000 | РГП-35-1000 | 37 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 6
Table 6

Расчетные значения максимальных рабочих токов
Calculated values of maximum operating currents

| Наименование присоединений и сборных шин | Значение $I_{\text{раб max}}$, А |
|---|-----------------------------------|
| Вводы транзитной тяговой подстанции | 818,8 |
| Ввод высокого напряжения тягового трансформатора | 293,8 |
| Ввод среднего напряжения тягового трансформатора | 923,8 |
| Ввод низкого напряжения тягового трансформатора | 1175,7 |
| Сборные шины 27,5 кВ | 839,8 |
| Сборные шины 35 кВ | 659,8 |
| ФРП 35 кВ | 11,4 |
| ФКС | 621,0 |
| Ввод высокого напряжения районного трансформатора | 145,5 |
| Ввод низкого напряжения районного трансформатора | 808,3 |
| Сборные шины 6 кВ | 577,4 |
| ФРП 6 кВ | 73,9 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Обсуждение (Discussions)

На основании проведенных расчетов в программном комплексе КОРТЭС можно сделать вывод, что увеличение мощности на тяговых трансформаторах позволит уменьшить перегрузку тяговых трансформаторов на 33%, увеличить напряжения в контактной сети до 21 кВ, уменьшить потери в тяговой сети на 0,1 %, понизить максимальную температуру на 30С, остальные параметры функционирования не изменяться, что доказывает, что для модернизации имеющегося оборудования ТП-4 рассматриваемого участка целесообразно использовать тяговые трансформаторы мощностью 40 МВА [21-25].

Капитальные затраты на замену оборудования составят 35,753 млн.руб. Замена оборудования необходима, так как предлагаемое к замене оборудование подстанции морально устарело и работает недостаточно надежно и эффективно, а также требует значительных эксплуатационных расходов, которые составляют 14,07 млн.руб. Срок окупаемости предлагаемого для реконструкции оборудования составляет 3,9 года [29-30].

Заключение и выводы (Conclusions)

Согласно политики ОАО «РЖД» уровень пропускной способности железных дорог Восточного полигона к 2025 году должен увеличиться в полтора раза, т.е. до 180 млн тонн грузов в год, что потребует проведения дополнительных мероприятий по модернизации электроснабжения указанных магистралей. Так как основные задачи возложены на электрическую тягу способную обеспечить заданный объем перевозимых грузов, с этой

целью необходима масштабная реконструкция существующей системы тягового электроснабжения. Произведённый авторами с использованием методов математического моделирования анализ повреждаемости оборудования тяговых подстанций рассматриваемого железнодорожного участка Восточного полигона, позволил выявить наиболее значимые причины отказов оборудования системы тягового электроснабжения, выявить зоны рисков с учетом перспективного пропуска поездов повышенной массы для Байкало-Амурской и Транссибирской магистралей, в рамках прироста грузопотока. Полученные расчетные значения при существующих размерах организации движения поездов позволили сделать вывод, что система тягового электроснабжения рассматриваемого участка не позволяет обеспечить необходимый уровень параметров тяговой сети и пропустить плановый поездопоток. Представлено технико-экономическое обоснование целесообразности реконструкции тяговых подстанций с учетом перспективного состояния функционирования участка.

Литература

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. URL: <http://www.zakonprostr.ru/content/base/part/581185> (дата обращения: 03.10.2022). – Текст: электронный.
2. Анализ фактических электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Московской области / Ю.И. Солюянов, А.И. Федотов, А.Р. Ахметшин, В.И. Солюянов, А.Н. Горлов // Промышленная энергетика. – 2022. – № 4. – С. 20-28.
3. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation / Y. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, 11–13 марта 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 9388018.
4. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a "virtual coupling" technology / V. A. Olentsevich, N. P. Astashkov, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger, A. I. Karlina // Journal of Physics: Conference Series, Novorossiysk, Virtual, 15–16 июня 2021 года. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.
5. Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone / R. Lagerev, S. Lagerev // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, 02–04 июня 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 332-340.
6. Dynamic analysis of the coupling relationship between regional energy economy and environment based on big data / Chengqi Xu, Juanjuan Zhang // Energy Reports. – 2022. – P. 13293-13301.
7. Systematization of Underground Ice / V. I. Solomatin, N. G. Belova // Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, 29 июня – 03 июля 2008 года / University of Alaska Fairbanks. Vol. 2. – Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. – P. 1671-1674.
8. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning / M. V. Kuzyakina, D. A. Gura, A. N. Sekisov, N. V. Granik // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 : Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983, Voronezh and Samara, Russia, 10–13 декабря 2018 года. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 403-416.
9. Прогноз выработки электроэнергии фотоэлектрическими электростанциями (на сутки вперед) с использованием машинного обучения / Д. В. Воротынец, М. Г. Тягунов // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2018. – № 4. – С. 53-57.
10. Технологии цифровых двойников в энергетике / С. А. Ерошенко, А. И. Хальясмаа // Электроэнергетика глазами молодежи-2019 : материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, Иркутск, 16–20 сентября 2019 года. Том 1. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. – С. 55-58.
11. Использование машинного обучения в ситуационном управлении применительно к задачам электроэнергетики / Л. В. Массель, О. М. Гергет, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 3(15). – С. 5-17.
12. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchís, R. Insa Franco, V. Yepes // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 222. – P. 153-162.
13. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system / V. A. Olentsevich, Y. I. Belogolov, G. N. Kramynina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года.

– BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012038.

14. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. – № 2537р. – 76 с.

15. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process / V. A. Olentsevich, Yu. I. Belogolov, N. N. Grigoryeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012061.

16. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, M. G. Shtayger and A. I. Karlina IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.

17. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020), Saint-Petersburg, Russia, 27–29 октября 2020 года. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.

18. Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks / A. Akhmetshin, S. Gaponenko, G. Marin // Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 241-245.

19. Муравейко, Л. А. Способ on-line визуализации и хранения информации о токах, протекающих в контактной сети с привязкой к графику движения поездов на примере релейной защиты ЦЗА-27,5-ФТС / Л. А. Муравейко, М. В. Востриков, В. А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 1(11). – С. 244-249.

20. Гибридная система интервального регулирования движения поездов для Московского центрального кольца / Е. Е. Шухина, В. И. Астрахан, И. А. Панферов, Г. К. Кисельгоф // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018) : Труды седьмой научно-технической конференции, Москва, 14 ноября 2018 года. – Москва: Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте", 2018. – С. 31-35.

21. Анализ эффективности организации движения поездов в режиме интервального регулирования на участке Петровский Завод - Хилок в сложноструктурированной транспортной системе / С. С. Громышова, А. В. Маштакова, А. П. Хоменко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 159-166.

22. Salkuti, S. R. Optimal Operation of Electrified Railways with Renewable Sources and Storage / S. R. Salkuti // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 16. – No 1. – P. 239-248.

23. Повышение достоверности диагностирования состояния несущего троса контактной сети / В. П. Ступицкий, И. А. Худогонов, В. А. Тихомиров, О. В. Лобанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 1(65). – С. 136-143.

24. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network / T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchyonok, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, N. P. Astashkov, A. L. Martisov, M. E. Alekseev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.

25. [25] Энерго-ресурсосберегающий эффект в системах электроснабжения жилых комплексов от актуализации нормативов электрических нагрузок / Ю. И. Солюянов, А. Р. Ахметшин, В. И. Солюянов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23. – № 1. – С. 156-166.

26. Направления и перспективы российско-китайского сотрудничества в вопросах развития приграничных регионов / В. Сяоцзюй, С. В. Рязанцев // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т. 24. – № 10. – С. 59-64.

27. Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train inter-car forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 15. Dnipro, May 27–29, 2020. – Dnipro, 2020. – P. 012027.

28. Перспективы применения технологий Smartgrid на железнодорожном транспорте / Д. Н. Пермякова, А. М. Гладких, Е. С. Берус // Молодежная наука : Труды XXV Международной

студенческой научно-практической конференции, Красноярск, 22–24 апреля 2021 года. – Красноярск: красноярский институт железнодорожного транспорта - филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», 2021. – С. 98-102.

29. Ахметшина, Г. Р. Анализ особенностей технологически изолированных энергорайонов, учитываемых при разработке программ оптимизации локальной энергетики / Г. Р. Ахметшина, М. Р. Кусимов, К. К. Ильковский // Микроэкономика. – 2019. – № 5. – С. 64-68.

30. Риск-ориентированный подход к энергетическому производству / Д. А. Лысенко, А. М. Гладких, Д. Н. Пермьякова // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 20–24 апреля 2021 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. – С. 239-243.

31. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails / V. Y. Konyukhov, T. A. Oparina, D. N. Permyakova // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012071.

32. Проблемы реализации инфраструктурных проектов Транссибирской и Байкало-Амурской магистральных / Т. С. Зайцева, П. А. Коваленко, М. С. Семенова // Политранспортные системы : Материалы X Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 15–16 ноября 2018 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет путей сообщения, 2019. – С. 35-39.

33. On the issue of accelerating the development of the northern territories in Russia / V. Shulga, P. Petrov, A. Kudrov, V. Verchuk // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, 02–04 июня 2021 года. – St. Petersburg, 2021. – P. 634-638.

34. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development / D. Shapovalova, E. Galimullin, E. Grushevenko // Energy Policy. – 2020. – Vol. 146. – P. 111753.

35. Подход к моделированию функционирования взаимосвязанных систем энергетики в условиях возмущений и его программная поддержка / А. В. Еделев, Н. М. Береснева // Программные продукты и системы. – 2021. – № 3. – С. 409-419.

36. Перспективы развития мировой энергетики в период до 2040 г. и их влияние на российский топливно-энергетический комплекс / А. А. Галкина, Д. А. Грушевенко, Е. В. Грушевенко, В. А. Кулагин, И. Ю. Миронова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. – 2015. – № 1(211). – С. 59-70.

Авторы публикации

Шушпанов Илья Николаевич – канд. тех. наук, доцент ИрННТУ, заместитель руководителя Национального исследовательского комитета С1 «Планирование развития энергосистем и экономика» Российского национального комитета CIGRE.

Пермьякова Дарья Николаевна – магистрант МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Кониюхов Владимир Юрьевич – канд. тех. наук, профессор ИрННТУ, доцент ВАК, почётный работник сферы образования Российской Федерации.

Опарина Татьяна Александровна – программист 1 категории ИрННТУ.

References

1. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030. URL: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/581185> (accessed: 03.10.2022). – Text: electronic.

2. Analysis of the actual electrical loads of apartment buildings in the Moscow region / Yu.I. Soluyanov, A.I. Fedotov, A.R. Akhmetshin, V.I. Soluyanov, A.N. Gorlov // Industrial power Engineering. – 2022. – No. 4. – P. 20-28.

3. Application of intelligent electricity metering systems for timely adjustment of standard values for electrical loads calculation / Y. I. Soluyanov, A. I. Fedotov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021 : 3, Moscow, March 11–13, 2021. – Moscow, 2021. – P. 9388018.

4. Evaluation of the compatibility of the power traction supply system with a use of a "virtual coupling" technology / V. A. Olentsevich, N. P. Astashkov, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G.

Shtayger, A. I. Karlina // *Journal of Physics: Conference Series*, Novorossiysk, Virtual, June 15–16, 2021. – Novorossiysk, Virtual, 2021. – P. 012112.

5. Issues of railway operation and maintenance in the land areas of the Russian Arctic zone / R. Lagerev, S. Lagerev // *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, June 02–04, 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 332-340.

6. Dynamic analysis of the coupling relationship between regional energy economy and environment based on big data / Chengqi Xu, Juanjuan Zhang // *Energy Reports*. – 2022. – P. 13293-13301.

7. Systematization of Underground Ice / V. I. Solomatin, N. G. Belova // *Ninth International Conference on Permafrost*, Fairbanks, June 29 – 03, 2008 / University of Alaska Fairbanks. Vol. 2. – Fairbanks: Institute of Northern Engineering, 2008. – P. 1671-1674.

8. Assessment of Potential Forest Biomass Resource on the Basis of Data of Air Laser Scanning / M. V. Kuzyakina, D. A. Gura, A. N. Sekisov, N. V. Granik // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 : Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983*, Voronezh and Samara, Russia, December 10–13, 2018. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 403-416.

9. Forecast of electricity generation by photovoltaic power plants (for the day ahead) using machine learning / D. V. Vorotyntsev, M. G. Tyagunov // *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the MEI*. – 2018. – No. 4. – P. 53-57.

10. Technologies of digital twins in power engineering / S. A. Eroshenko, A. I. Khalyasmaa // *Electric power industry through the eyes of youth-2019 : materials of the jubilee X International Scientific and Technical Conference*, Irkutsk, September 16-20, 2019. Volume 1. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2019. – P. 55-58.

11. The use of machine learning in situational management in relation to the tasks of the electric power industry / L. V. Massel, O. M. Gerget, A. G. Massel, T. G. Mammadov // *Information and mathematical technologies in science and management*. – 2019. – No. 3(15). – P. 5-17.

12. A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption / P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchis, R. Insa Franco, V. Yepes // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 222. – P. 153-162.

13. Set of organizational, technical and reconstructive measures aimed at improvement of section performance indicators based on the study of systemic relations and regularities of functioning of railway transport system / V. A. Olentsevich, Y. I. Belogolov, G. N. Kramynina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, November 01, 2019*. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012038.

14. Energy strategy of the Russian Railways Holding for the period up to 2020 and for the future up to 2030. Approved by the Order of JSC "Russian Railways" dated December 14, 2016 – No. 2537r. – 76 p.

15. Analysis of reliability and sustainability of organizational and technical systems of railway transportation process / V. A. Olentsevich, Yu. I. Belogolov, N. N. Grigoryeva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года*. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012061.

16. Development of the performance control algorithm of the blower motors of electric locomotives for various operating modes / A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020)*, Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021. – P. 012001.

17. Increase of the throughput and processing capacity of the railway line mountain pass section by strengthening the devices of the system of traction power supply / N. P. Astashkov, V. A. Olentsevich, A. R. Akhmetshin, K. V. Suslov, M. G. Shtayger and A. I. Karlina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference: Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2020)*, Saint-Petersburg, Russia, October 27–29, 2020. – Saint-Petersburg, Russia: IOP Publishing, 2021.

18. Methods for improving the quality of electrical energy in distribution networks / A. Akhmetshin, S. Gaponenko, G. Marin // *Proceedings - 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, May 17–21, 2021*. – Sochi, 2021. – P. 241-245.

19. A method of on-line visualization and storage of information about currents flowing in the contact network with reference to the train schedule on the example of relay protection TSA-27,5-FTS / L. A. Muraveyko, M. V. Vostrikov, V. A. Tikhomirov // *Molodaya nauka Sibiri*. – 2021. – № 1(11). – P. 244-249.

20. Hybrid system of interval regulation of train traffic for the Moscow Central Ring / E. E. Shukhina, V. I. Astrakhan, I. A. Panferov, G. K. Kiselgof // Intelligent control systems for railway transport. Computer and Mathematical Modeling (ISUZHT-2018) : Proceedings of the Seventh Scientific and Technical Conference, Moscow, November 14, 2018. – Moscow: Joint-Stock Company "Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communication in Railway Transport", 2018. – P. 31-35.
21. Analysis of the effectiveness of the organization of train traffic in the interval regulation mode on the Petrovsky Plant - Khilok section in a complex structured transport system / S. S. Gromyshova, A.V. Mashtakova, A. P. Khomenko // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – № 3(67). – P. 159-166.
22. Salkuti, S. R. Optimal operation of electrified railways using renewable sources and storage facilities / S. R. Salkuti // Journal of Electrical Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 16. – No. 1. – P. 239-248.
23. Increasing the reliability of diagnosing the condition of the carrier cable of the contact network / V. P. Stupitsky, I. A. Khudonogov, V. A. Tikhomirov, O. V. Lobanov // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2020. – № 1(65). – P. 136-143.
24. Parallel operation of an inverter with an electrical AC network / T. L. Alekseeva, N. L. Ryabchyonok, L. A. Astrakhantsev, V. A. Tikhomirov, N. P. Astashkov, A. L. Martisov, M. E. Alekseev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, May 21–24, 2019. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012003.
25. Energy-resource-saving effect in power supply systems of residential complexes from the actualization of standards of electrical loads / Yu. I. Soluyanov, A. R. Akhmetshin, V. I. Soluyanov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. - 2021. – Vol. 23. – No. 1. – P. 156-166.
26. Directions and prospects of Russian-Chinese cooperation in the development of border regions / V. Xiaoju, S. V. Ryazantsev // Bulletin of the Trans-Baikal State University. - 2018. – Vol. 24. – No. 10. – P. 59-64.
27. Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train inter-car forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 15, Dnipro, May 27–29, 2020. – Dnipro, 2020. – P. 012027.
28. Prospects for the use of Smartgrid technologies in railway transport / D. N. Permyakova, A.M. Gladkikh, E. S. Berus // Youth Science : Proceedings of the XXV International Student Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 22-24, 2021. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk Institute of Railway Transport - branch of the Irkutsk State University of Railway Transport, 2021. – P. 98-102.
29. Analysis of the features of technologically isolated energy districts taken into account in the development of local energy optimization programs / G. R. Akhmetshina, M. R. Kusimov, K. K. Ilkovsky // Microeconomics. – 2019. – No. 5. – P. 64-68.
30. Risk-oriented approach to energy production / D. A. Lysenko, A.M. Gladkikh, D. N. Permyakova // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia : Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation, Irkutsk, April 20-24, 2021. – Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021. – P. 239-243.
31. Numerical simulation of the size, quantity and shape of non-metallic inclusions in rails / V. Y. Konyukhov, T. A. Oparina, D. N. Permyakova // Journal of Physics: Conference Series, Novosibirsk, 12–14 мая 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 012071.
32. Problems of implementation of infrastructure projects of the Trans-Siberian and Baikal-Amur highways / T. S. Zaitseva, P. A. Kovalenko, M. S. Semenova // Polytransport systems : Materials of the X International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, November 15-16, 2018. – Novosibirsk: Siberian State University of Railway Transport, 2019. – P. 35-39.
33. On the issue of accelerating the development of the northern territories in Russia / V. Shulga, P. Petrov, A. Kudrov, V. Verchuk // Transportation Research Procedia, St. Petersburg, June 02–04, 2021. – St. Petersburg, 2021. – P. 634-638.
34. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development / D. Shapovalova, E. Galimullin, E. Grushevenko // Energy Policy. – 2020. – Vol. 146. – P. 111753.
35. An approach to modeling the functioning of interconnected energy systems in conditions of disturbances and its software support / A.V. Edelev, N. M. Beresneva // Software products and systems. – 2021. – No. 3. – P. 409-419.
36. Prospects for the development of world energy in the period up to 2040 and their impact on the Russian fuel and energy complex / A. A. Galkina, D. A. Grushevenko, E. V. Grushevenko, V. A. Kulagin, I. Y. Mironova // Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic sciences. – 2015. – № 1(211). – P. 59-70.

© Шушпанов И.Н., Пермякова Д.Н., Конюхов В.Ю., Опарина Т.А.

Authors of the publication

Ilya N. Shushpanov – Irkutsk National Research Technical University.

Darya N. Permyakova – Bauman Moscow State Technical University (National Research University).

Vladimir Y. Konyukhov – Irkutsk National Research Technical University.

Tatiana A. Oparina – Irkutsk National Research Technical University.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено

28.11.2022 г.

Отредактировано

21.09.2023 г.

Принято

27.10.2023 г.



УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ В ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Четошникова¹ Л.М., Смоленцев² Н.И., Томских¹ Н.В., Гимгина¹ Д.А.,
Лаврентьева¹ Д.А.

¹Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск, Россия

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-4053>, chlm56@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке способов и методов подключения распределенных сетей с альтернативными источниками к централизованным систем электроснабжения. ЦЕЛЬ. Показать перспективы развития локальных электрических сетей с распределенной генерацией. Изменения, происходящие в последнее время в электроэнергетике, заставляют пересматривать требования как к инфраструктуре, так и объектам электроэнергетики. Показать, что подключение распределенных генераторов и потребителей электрической энергии к сети сопряжено с определенными сложностями. Решение задачи качественного и бесперебойного электроснабжения потребителей требует нового подхода, связанного с использованием современных технологий Smart Grid, в равной мере относящихся и к энергетике, и к информационно-технологической области. Отмечается, что для реализации такой масштабной задачи была разработана «дорожная карта» «Энерджинет» Национальной технологической инициативы, среди основных направлений которой указываются цифровизация инфраструктуры распределительных сетей и глубокая децентрализация производства электроэнергии. Рассмотреть в соответствии с выделенными направлениями сегменты рынка интеллектуальной энергетики, к которым относятся: надёжные и гибкие распределительные сети, интеллектуальная распределённая энергетика и потребительские сервисы. Предложить вариант решения задачи на примере локальной микросети низкого напряжения с распределенной генерацией МЕТОДЫ. Решение задачи предлагается на базе создания симуляционной модели, с помощью которой можно выполнить ряд тестов и получить оптимальный в пределах данной области ошибки режим сети, осуществить различные варианты структуры микросети, количества и вида генераторов, уровня нагрузки. Предложена структурная схема локальной сети. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описан процесс управления потоками мощности между производителями (локальными распределенными источниками) и потребителями электроэнергии. Этот процесс осуществляется через единый управляющий центр, в который поступает информация о состоянии объектов микросети - уровне выработки электроэнергии генераторами и уровне текущей нагрузки потребителей. По результатам обработки информации в управляющем центре принимается решение о перераспределении мощности между объектами. Предложена схема, описывающая динамический процесс перемещения мощности для эффективного управления ресурсами в сети распределения мощности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Рассмотренный алгоритм управления мощностью представляет собой простую реализацию классической балансировки нагрузки, и при этом позволяет обеспечить оптимальное распределение энергии в пределах заданной ошибки. Оптимальным, в данном случае, будет состояние системы, при котором все распределенные возобновляемые источники энергии, используются в полном объеме для удовлетворения потребностей локальной микросети, при этом снижая до минимума потребление от сети. При этом дополнительно необходимо ввести поправки на неравномерность и нестабильность выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии.

Ключевые слова: Локальная электрическая сеть; распределенная генерация; управление потоками энергии; распределение мощности.

Благодарности: Работа выполнена в рамках Государственного задания 071-03-2023-001 от 19.01.2023 г.

Для цитирования: Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., Гимгина Д.А., Лаврентьева Д.А. Управление потоками мощности в локальных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 74 – 82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-74 – 82.

LOCAL POWER FLOW CONTROL

Chetochnikova¹ L.M., Smolentsev² N.I., Tomskich¹ N.V., Gimgina¹ D.A., Lavrentieva¹ D.A.

¹South Ural State University. National Research University, Chelyabinsk, Russia

²Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences,
Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6483-4053>, chlm56@mail.ru

THE PURPOSE. Show the prospects for the development of local electric networks with distributed generation. Recent changes in the electric power industry are forcing the revision of the requirements for both infrastructure and power facilities. Show that the connection of distributed generators and consumers of electrical energy to the network is fraught with certain difficulties. Solving the problem of high-quality and uninterrupted power supply to consumers requires a new approach associated with the use of modern Smart Grid technologies, equally related to energy and information technology. It is noted that for the implementation of such a large-scale task, the "road map" "Energynet" of the National Technology Initiative was developed, among the main directions of which are the digitalization of the infrastructure of distribution networks and the deep decentralization of electricity production. Consider, in accordance with the identified areas, the segments of the smart energy market, which include: reliable and flexible distribution grids, smart distributed energy and consumer services. Propose a solution to the problem using the example of a local low voltage microgrid with distributed generation. **METHODS.** The solution to the problem is proposed on the basis of creating a simulation model, with the help of which it is possible to perform a number of tests and obtain the optimal network mode within a given error area. implement various options for the structure of the microgrid, the number and type of generators, the load level. The structural diagram of the local network is proposed. **RESULTS.** The article describes the process of managing power flows between producers (local distributed sources) and consumers of electricity. This process is carried out through a single control center, which receives information about the state of the micro-grid objects - the level of electricity generation by generators and the level of the current load of consumers. Based on the results of information processing in the control center, a decision is made on the redistribution of power between objects. A scheme describing the dynamic process of power transfer for efficient resource management in the power distribution network is proposed. **CONCLUSION.** The considered power management algorithm is a simple implementation of classical load balancing, and at the same time allows for optimal energy distribution within a given error. Optimal, in this case, will be the state of the system, in which all distributed renewable energy sources are used in full to meet the needs of the local micro-network, while reducing to a minimum the consumption from the network. At the same time, it is also necessary to introduce corrections for the unevenness and instability of electricity generation by renewable energy sources.

Keywords: Local electrical network, distributed generation, energy flow control, power distribution.

Acknowledgements: The work was completed within the framework of the State assignment 071-03-2023-001 dated 01/19/2023.

For citation: Chetochnikova L.M., Smolentsev N.I., Tomskich N.V., Gimgina D.A., Lavrentieva D.A. Local power flow control. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 74 – 82. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-74-82.

Введение (Introduction)

Энергосистема России представляет собой централизованную систему производства и распределения энергии. Выработка электроэнергии производится на крупных ТЭЦ, ГЭС, ГРЭС и далее, на повышенном напряжении, поступает в энергосистему, а затем – в распределительную сеть. На каждом этапе оперативный персонал контролирует, регулирует и управляет частотой, напряжением, перетоками активной и реактивной мощности и т.д. Такая традиционная схема работы энергосистемы существовала длительное время и существует сейчас. Но в последнее время в отечественной электроэнергетике наметилась тенденция внедрения в действующую энергосистему объектов распределенной генерации. Цель исследований заключается в разработке способа интеллектуального управления распределённой генерацией. Это вызвано необходимостью создания такой инфраструктуры, которая смогла бы обеспечить увеличивающийся рост энергопотребления с одновременным снижением нагрузки на окружающую среду.

Научная значимость исследования состоит в том, что вся информация о состоянии сети, узлах нагрузки, локальных источниках и передаваемой мощности сосредотачивается в коммуникационной инфраструктуре, которая основывается на коммуникационном протоколе, составленном согласно выбранной стратегии сетевого менеджмента. Создаваемая инфраструктура предполагает соединение в сети распределенных локальных источников энергии, в том числе и на возобновляемых источниках, микросетей, энергоёмких накопителей энергии, а также виртуальных электрических станций, способных обеспечить сглаживание пиков нагрузки и создавать резерв мощности в системе. Практическая значимость исследования заключается в том, что обеспечить функционирование такой инфраструктуры невозможно без современных технологий и устройств, без оперативного интеллектуального управления. Ожидаются изменения в способах производства, распределения и потребления электроэнергии, а также в образе жизни населения. Это станет возможным благодаря современным технологиям, развитию технологий накопления энергии, новой парадигме развития электроэнергетики «Энерджинет» и новым подходам к решению актуальных задач.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросы распределенной генерации в сетях низкого напряжения сейчас являются актуальными и обсуждаются на разных уровнях в стране и за ее пределами [1,2]. Связано это с тем, что некоторые предприятия стараются минимизировать затраты на электроэнергию и обеспечить энергетическую независимость за счет внедрения объектов собственной генерации. Такими объектами могут служить мини-ТЭЦ, дизель-генераторы, установки, использующие возобновляемые источники энергии. Все это оправдано до тех пор, пока не возникнет желание выдавать излишки произведенной энергии в централизованную сеть. Последствия такого шага могут быть неожиданными и, чаще всего, не способствующими устойчивой работе энергосистемы. Использование интеллектуального управления значительно уменьшает влияние распределенной генерации на сеть без ущерба надежности работы сети. Одной из проблем, которые необходимо решить при подключении распределенных генераторов к сети, является сложность внедрения единых стандартов из-за различия в типах используемых источников, режимах и мощности нагрузки, состояния местной сети и т.д.[3].

Вследствие этого при большом количестве подключаемых генераторов возникает необходимость в создании сложной системы расчета, телекоммуникационной сети и диспетчеризации. Особенно обостряется ситуация при авариях и ненормальных режимах, например, при отключении участка сети. Поэтому для подключения распределенных генераторов к сети потребуется установка специального оборудования, позволяющего осуществлять дистанционное управление. Решить такую непростую задачу на локальном уровне невозможно. Ее решение требует совершенно иного подхода, который будет связан с использованием современных технологий Smart Grid, в равной мере относящихся и к энергетике, и к информационно-технологической области [1]. Открытая сетевая архитектура, созданная для объектов разного уровня, станет платформой для комплексных систем и интеллектуальных сервисов новой энергетики. В этом случае все объекты, и потребители, и производители энергии должны иметь возможность просто подключаться и пользоваться энергосистемой по подобию использования Интернета [4]. Неизменно при этом встает задача определить, как влияет новая архитектура сети на стабильность и надежность сети. Можно ли через распределенную генерацию улучшить работу сети без каких-либо существенных изменений для текущей инфраструктуры сети.

Умная сеть (*Smart Grid*) рассматривается как альтернатива для улучшения эффективности, надежности и гибкости существующей сети. Для достижения этого необходимо выстраивать дополнительную инфраструктуру, внедрять передовые технологии, ведущие к фундаментальным изменениям в архитектуре сети [5].

Для реализации такой масштабной задачи Министерством энергетики Российской Федерации была разработана дорожная карта «Энерджинет» Национальной технологической инициативы [6]. Назначением «дорожной карты» является систематизация комплекса проектов и мероприятий для обеспечения выхода российских компаний с новыми продуктами и сервисами на глобальные рынки новой энергетики. Основными направлениями реализации дорожной карты заявлены: цифровизация инфраструктуры распределительных сетей и глубокая децентрализация производства электроэнергии.

В связи с этим повышенный интерес у энергетических компаний, ученых и просто потребителей электрической энергии вызывают именно умные локальные электрические сети (ЛЭС) низкого напряжения [7,8]. Иными словами, умной сетью можно считать процесс трансформации от текущей электросети к сети будущего.

Ключевыми задачами будущей сети являются мониторинг, защита и автоматическая оптимизация операций взаимосвязанных элементов. Эти элементы включают центральное и распределенное генерирование тока, промышленных потребителей, установки по накоплению энергии, а также конечных потребителей с их электробытовой техникой и приборами. Будущее поколение электрических сетей будет обеспечено системами локального и дистанционного контроля, способными быстро обрабатывать большое количество информации. Такая система способна отслеживать изменения и регулировать выработку электроэнергии локальными источниками, соединенными с микросетью и на основании информации, полученной от приборов со стороны спроса, обеспечивать электроэнергией узлы нагрузки. Кроме этого, в функцию системы контроля должен входить сбор информации о состоянии сети, работоспособности ее элементов, возникающих повреждениях и т.д. Поэтому на первом месте среди требований, предъявляемых к такой системе должны стоять надежность и быстродействие.

Использование в распределенных сетях в качестве генераторов возобновляемых источников энергии создает дополнительные сложности при создании системы контроля, технического и программного обеспечения. Эти сложности обусловлены случайностью и неравномерностью потоков солнечной и ветровой энергии. Поэтому дополнительно встает задача минимизации колебаний выработки энергии такими источниками, стабилизации и надежности работы сети.

Материалы и методы (Materials and methods)

Рассмотрена симуляционная модель как испытательного стенда интеллектуального управления (ИУЭ), позволяющая протестировать распределенные сети на предмет уязвимости при увеличении числа локальных генераторов энергии. Исследование модели проведено в программе *MATLAB - Simulink*.

Результаты (Results)

Вся информация о состоянии сети, узлах нагрузки, локальных источниках и передаваемой мощности сосредотачивается в коммуникационной инфраструктуре, которая основывается на коммуникационном протоколе, составленном согласно выбранной стратегии сетевого менеджмента [9]. Получение данных от распределенных сенсоров нагрузки сети станет основанием для формирования команды об отключении или включении элементов или участков сети, чтобы адаптировать структуру распределения к динамике генерации энергии и потребления.

Особое внимание следует обратить на то, как распределенная генерация влияет на вероятность каскадных повреждений, при которых отключения начинаются с первичного события, например, повреждения линии передачи, и затем распространяется внутри сети, приводя к катастрофическим отключениям сети в больших масштабах. Эту задачу можно решить путем разработки симуляционной модели, которая исследует уязвимость сети на каскадные повреждения при постепенном увеличении количества локальных генераторов. Применяя эту модель для нескольких тестовых случаев, можно выяснить, действительно ли локальная генерация тока может сокращать вероятность каскадных повреждений, даже когда происходит введение в сеть только небольшого количества локальных генераторов. С помощью такой модели можно также проследить эффект и выгоду при последовательном увеличении числа локальных генераторов [10,11,12].

На рисунке 1 представлена модель микросети (локальной электрической сети), как испытательного стенда интеллектуального энергетического управления (ИЭУ). Микросеть

– это распределительная сеть напряжением 6(10) кВ. В каждом ИЭУ – узле имеется трансформатор 6(10)/0.4 кВ, чья первичная обмотка соединена с источником питания микросети, а его вторичная обмотка – с нагрузкой, ВИЭ и накопителем энергии. На рисунке показаны три узла ИЭУ, установленные в моделируемой микросети.

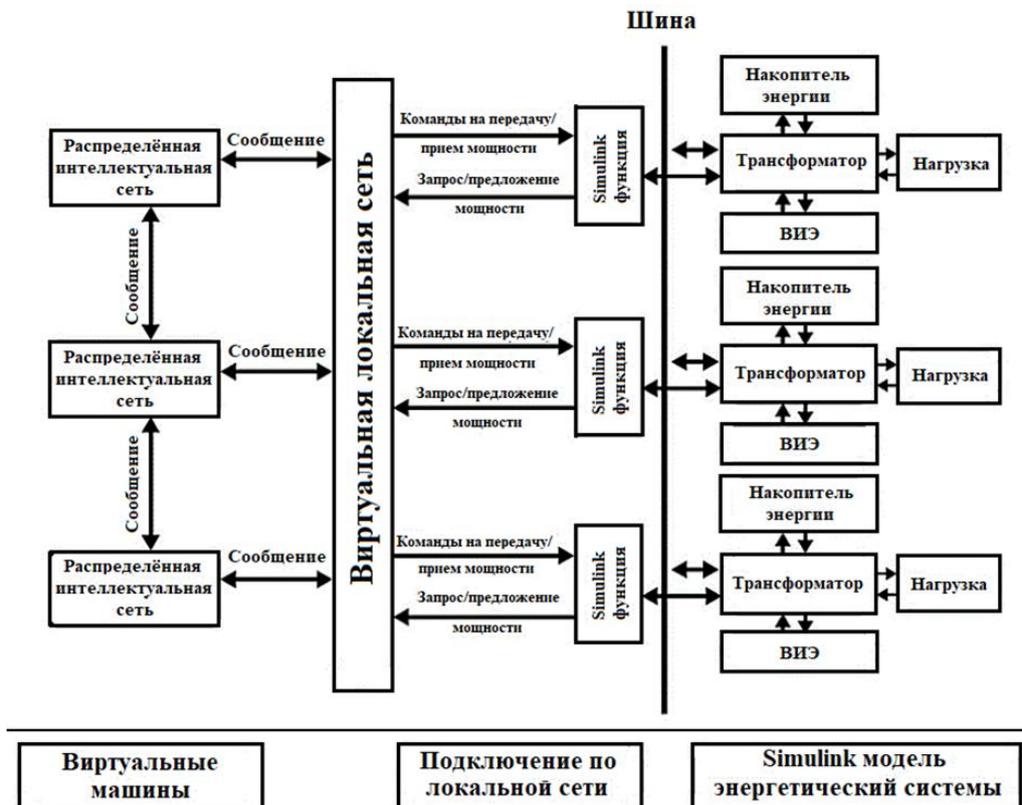


Рис. 1. Моделирование процесса управления энергией в распределенной интеллектуальной сети [14]. Fig. 1. Modeling of the energy management process in a distributed intelligent network [14].

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Силовой электрический трансформатор служит для:

- регулирования активных потоков мощности, отслеживающий сигналы от распределенной интеллектуальной сети;
- регулирования единичных энергетических параметров;
- сглаживания временных неравномерностей нагрузки и искажения напряжения;
- регулирования уровня напряжения с обеих сторон.

Типичный ВИЭ представлен в виде солнечных батарей или ветроэнергетической установки. Установка солнечных батарей регулируется в каждом узле ИЭУ в соответствии требованиями потребителя и системы. Одна солнечная батарея – набор солнечных модулей напряжением 200 В постоянного тока, мощностью 1,5 кВт при максимальном излучении.

Наиболее распространенный накопитель для локальной сети – стационарная свинцово-кислотная батарея выбрана из ряда других из-за относительной низкой цены и высокой надежности. Батарея на 120В постоянного тока, 35А·ч и может быть подобрана изменением числа аккумуляторов. В качестве более энергоемкого накопителя энергии можно использовать разрабатываемый в настоящее время накопитель на базе сверхпроводимости [13].

Все объекты микросети (нагрузка, источники и накопители энергии) в узлах ИЭУ могут быть выбраны в различных сочетаниях и конфигурациях для более полного изучения различных режимов.

Экспериментальная модель включает в себя окружение виртуальной машины, моделирующее передачу в распределительную интеллектуальную сеть от каждого узла, Simulink-модель и подсистемы энергетической системы, работающей на другом компьютере и S-функцию, которая связывает модель Simulink и процесс перемещения энергетических потоков [15]. Элементы модели взаимодействуют друг с другом по локальной сети на каждой машине. Каждый действующий узел посылает сигналы в модель через уникальные порты S-функции. В каждом узле процесс балансирования мощности получает основную

информацию о состоянии и параметрам нагрузки, возобновляемых источников, накопителей энергии и перемещаемым потокам от местного трансформатора в определенные промежутки времени. В экспериментальной модели *Simulink*-функция действует как микродиспетчер, который соединяет процесс передачи мощности с микросетью. При оценке параметров определяется состояние узла, как: «Нормальное», «Высокое» или «Низкое» и в результате происходит перераспределение и выравнивание мощности.

Адаптируя модель со схемой балансирования мощности, можно выполнить ряд тестов и получить оптимальный в пределах данной области ошибки режим сети. Оптимальный режим, предположительно, будет иметь место, когда все из распределенных возобновляемых источников энергии отвечают требованиям нагрузки в пределах микросети, минимизируя мощность потребления от сети. В этом случае, там могут существовать ИЭУ узлы с лишней генерируемой энергией (в Низком уровне), дефицитом энергии (в Высоком уровне), или ни тот, ни другой (в Нормальном уровне).

В каждом тесте различные значения мощности и энергетические изменения вводятся в *Simulink*-модель. Эти процессы определяют и отображают изменение локального состояния микросети, ВИЭ, накопителей энергии и потоков мощности, согласованную и выполненную передачу мощности

Пример экспериментальной локальной сети с распределенными источниками и узлами нагрузки показан на рисунке 2. Информация об уровне потребления энергии в отдельных узлах в режиме реального времени передается в управляющий центр. В таком же режиме собирается информация о выработанной в данный момент времени мощности производителями энергии (ПР). По результатам обработки запросов и предложений от объектов локальной сети осуществляется оптимальное регулирование и распределение мощности между потребителями (П).

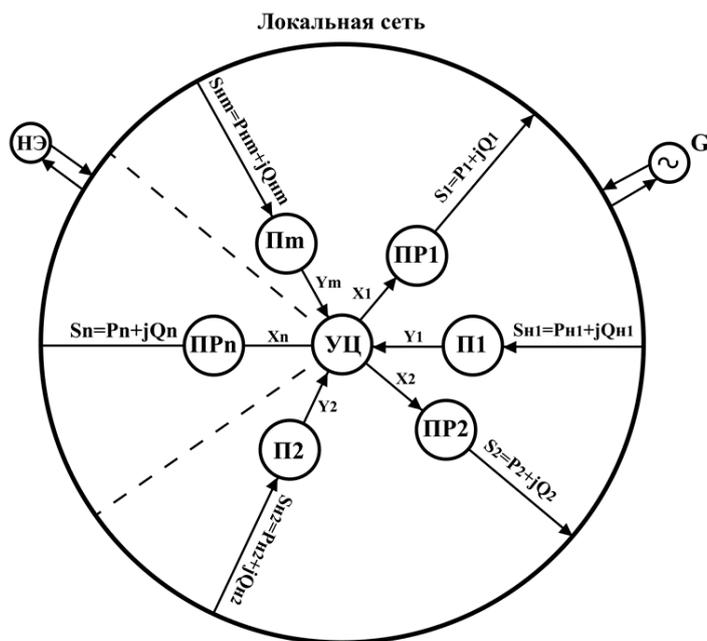


Рис. 2. Структурная схема локальной сети: $S_i = P_i + Q_i$ – мощность, генерируемая i -м источником; $S_{nj} = P_{nj} + Q_{nj}$ – мощность нагрузки j -го потребителя; x_i, y_j – управляющие сигналы (энергетические потоки); ПР и П – соответственно, производители и потребители электрической энергии, УЦ – управляющий центр

Fig. 2. Block diagram of the local network: $S_i = P_i + Q_i$ – power generated by the i -th source; $S_j = P_{nj} + Q_{nj}$ – load power of the j -th consumer; x_i, y_j – control signals (energy flows); PR and N – respectively, producers and consumers of electric energy, UC – management center

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве источников электрической энергии, включенных в локальную распределительную сеть, могут служить ветроэнергетическая установки (ВЭУ), солнечные батареи (СБ), а также дизель- или бензогенераторная установка. Избыток вырабатываемой мощности отдается в сеть, откуда перераспределяется между потребителями, отправившими запрос на передачу недостающей мощности. В случае отсутствия запросов мощности от потребителей, источники обеспечивают питанием балластную нагрузку или зарядку накопителей энергии (НЭ). Накопители энергии вводятся в работу при отсутствии

ветра и солнца для бесперебойного электроснабжения потребителей электрической энергией.

Чтобы достигнуть экономической оптимизации и эффективного перемещения мощности через микросеть, необходимо в схему балансирования мощности включить функцию стоимости электроэнергии. Для этого следует установить цену энергии, накопленной батареей, производимой солнечными батареями и поступающей из резервной сети [16].

Заключение (Conclusions)

Рассмотренный алгоритм управления мощностью представляет собой простую реализацию классической балансировки нагрузки, и при этом позволяет обеспечить оптимальное распределение энергии в пределах заданной ошибки. Оптимальным, в данном случае, будет состояние системы, при котором все распределенные возобновляемые источники энергии, используются в полном объеме для удовлетворения потребностей локальной микросети, при этом снижая до минимума потребление от сети. Дополнительно необходимо ввести поправки на неравномерность и нестабильность выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии.

Литература

1. Кобец Б.Б., Волкова И.О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. – М.: ИАЦ Энергия. – 2010. – 208 с.
2. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределённая энергетика в России: потенциал развития. — М.: Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2019. – 89 с.
3. Ерошенко С. А., Карпенко А. А., Кокин С. Е., Паздерин А. В. Научные проблемы распределённой генерации // Известия вузов: Проблемы энергетике, 2010. №11–12. С. 126–133.
4. Смоленцев, Н. И. Энергет. Состояние и перспективы / Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибасва // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 22–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021.
5. Хохлов А. Развитие распределенной генерации приведет к кардинальным изменениям в архитектуре электроэнергетики России. Энергетика и промышленность России. 2017, № 11
6. «Дорожная карта» «ЭНЕРДЖИНЕТ» Национальной Технологической Инициативы. <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 12.03.2021 г.).
7. Тягунов М. Г., Викулов А. Н. Возобновляемая энергетика в распределённых энергосистемах. Московский энергетический институт (НИУ) СОК №7. 2018 – Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/vozobnovlyаемая-energetika-v-raspredelennyh-energосистемах> (дата обращения 08.02.2021).
8. Цифровой переход в электроэнергетике России: экспертно-аналитический доклад. / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. М., ЦСР, 2017.
9. Ховалова Т.В., Жолнерчик С.С. Эффекты внедрения интеллектуальных электроэнергетических сетей. Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018, (2): С. 92-101.
10. Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems: Implementation, Operation, and Control. / Edited by Toshihisa Funabashi. - Elsevier Inc., 2016. – 313 p.
11. Planning for the Renewable Future: Long-term modelling and tools to expand variable renewable power in emerging economies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017.
12. Кубарьков Ю. П., Чивенков А. И., Вихорев Н. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А. Способ регулирования тока линии электропередачи в узле нагрузки. Вестник самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2019. № 1 (61). С. 128-138
13. Смоленцев Н.И., Кондрин С.А. Сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии для локальных электрических сетей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетике. 2017, Т.19, № 3-4. С.53-60.
14. Четошникова Л.М, Смоленцев Н.И., Четошников С.А., Дегтярев Д.В. Система управления в локальной электрической сети низкого напряжения. Ползуновский вестник, N1, 2015, стр. 105-107.
15. R. Akella, F. Meng, D. Ditch, B. McMillin, M. Crow. Distributed Power Balancing for the FREEDM System. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communication, 594 с.
16. Аракелов, В. Е. Методические вопросы экономии энергоресурсов / В. Е. Аракелов, А. И. Кремер. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 192 с.

Авторы публикации

Четошникова Лариса Михайловна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизации ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, Россия.

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники СибГУТИ, Новосибирск, Россия.

Томских Наталья Валерьевна - студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Гимгина Дарья Александровна – студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Лаврентьева Дарья Алексеевна – студент ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Reference

1. Kobets BB, Volkova I.O. Innovative development of the electric power industry based on the Smart Grid concept. - M.: IAC Energiya. - 2010.-- 208 p.
2. Khokhlov A., Melnikov Yu., Veselov F., Kholkin D., Datsko K. Distributed energy in Russia: development potential. - M.: Energy Center of the Moscow School of Management "Skolkovo", 2019. - 89 p.
3. Eroshenko S. A., Karpenko A. A., Kokin S. E., Pazderin A. V. Scientific problems of distributed generation // Izvestiya vuzov: Problems of power engineering, 2010. No. 11–12. S. 126-133.
4. Khokhlov A. Development of distributed generation will lead to dramatic changes in the architecture of the power industry in Russia. Energy and industry of Russia. 2017, no. 11
5. "Roadmap" "ENERGINET" of the National Technology Initiative. <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (date of circulation 03/12/2021).
6. Tyagunov MG, Vikulov AN Renewable energy in distributed power systems. Moscow Power Engineering Institute (NRU) SOK №7. 2018 - Access mode: <https://www.c-o-k.ru/articles/vozobnovlyaemaya-energetika-v-raspredeleennyh-energосистемах> (date of treatment 02/08/2021).
7. Digital transition in the electric power industry of Russia: expert and analytical report. / under total. ed. V.N. Knyaginina and D.V. Kholkina. M., CSR, 2017.
8. Khovalova T.V., Zholnerchik S.S. Effects of introducing smart power grids. Strategic decisions and risk management. 2018, (2): S. 92-101.
9. Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems: Implementation, Operation, and Control. / Edited by Toshihisa Funabashi. - Elsevier Inc., 2016.-- 313 p.
10. Planning for the Renewable Future: Long-term modeling and tools to expand variable renewable power in emerging economies, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2017.
11. Kubarkov Yu. P., Chivenkov AI, Vikhorev NN, Shalukho A. V, Lipuzhin IA Method of regulating the current of the power line in the load node. Samara State Technical University Bulletin. Series: technical sciences. 2019. No. 1 (61). S. 128-138
12. Smolentsev N.I., Kondrin S.A. Superconducting electrokinetic energy storage device for local electrical networks // News of higher educational institutions. Energy problems. 2017, Vol. 19, No. 3-4. S.53-60.
13. Chetoshnikova L.M., Smolentsev N.I., Chetoshnikov S.A., Degtyarev D.V. Control system in the local low voltage electrical network. Polzunovsky Bulletin, N1, 2015, pp. 105-107.
14. R. Akella, F. Meng, D. Ditch, B. McMillin, M. Crow. Distributed Power Balancing for the FREEDM System. 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communication, 594 p.
15. Arakelov, V. E. Methodical issues of energy saving / V. E. Arakelov, A. I. Kremer. - M.: Energoatomizdat, 1990.-- 192 p.

Authors of the publication

Larisa M. Chetoshnikova - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Nikolai I. Smolentsev - Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russia.

© Четошникова Л.М., Смоленцев Н.И., Томских Н.В., Гимгина Д.А., Лаврентьева Д.А.

Natalia V.Tomskich - South Ural State University(NRU), Chelyabinsk, Russia.

Darya A. Gimgina - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Darya A. Lavrentieva - South Ural State University (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено *24.03.2021 г.*

Отредактировано *30.06.2022 г.*

Принято *26.10.2023 г.*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 622.69.44

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-83-90

APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES TO ENSURE OPERATIONAL RELIABILITY AND SAFETY IN ENERGY SYSTEMS OF AZERBAIJAN

Shamsi Nasirov

Engineering University, Bak, Azerbaijan

Abstract: Currently, Azerbaijan is implementing large-scale projects to restore infrastructure in the territories recently liberated from occupation. This includes, in particular, the construction of new modern power plants and electrical networks of modern design and high power. This, in turn, requires the use of reliable and effective methods of safety and protection of these systems from any failures or damage. In this regard, this article considers a wide range of issues on the use of modern technologies and developments for the protection of power systems, as well as analyzes the optimal concepts of management and protection of power grids, which are most suitable in the local conditions of the regions, as well as on the scale of the energy system of the whole country.

Keywords: multifunctional microprocessor devices; modern technologies; cyber threats; operational reliability.

For citation: Shamsi Nasirov. Application of modern technologies to ensure operational reliability and safety in energy systems of Azerbaijan. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 83-90. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-83-90.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ АЗЕРБАЙДЖАНА

Насиров Ш.

Инженерный Университет, г. Баку Азербайджан

Резюме: В настоящее время Азербайджан реализует крупномасштабные проекты по восстановлению инфраструктуры на территориях, недавно освобожденных от оккупации. Это включает, в частности, строительство новых современных электростанций и электрических сетей современного дизайна и высокой мощности. Это, в свою очередь, требует использования надежных и эффективных методов обеспечения безопасности и защиты этих систем от любых сбоев или повреждений. В связи с этим в данной статье рассматривается широкий круг вопросов по использованию современных технологий и разработок для защиты энергосистем, а также анализируются оптимальные концепции управления и защиты электросетей, которые наиболее подходят в местных условиях регионов, а также в масштабе энергетической системы всей страны.

Ключевые слова: многофункциональные микропроцессорные устройства; современные технологии; киберугрозы; эксплуатационная надежность.

Для цитирования: Насиров Ш. Применение современных технологий для обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности в энергетических системах Азербайджана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 83-90. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-83-90.

Introduction

Currently, Azerbaijan is implementing large-scale projects to restore infrastructure in the territories recently liberated from occupation. Among other things, this includes the construction of new power plants and electrical networks of modern design and high power. This, in turn, requires the application of reliable and effective safety methods and protection of these systems from any failures or damage.

Presently, there are multifunctional microprocessor devices that performing relay protection functions, simultaneously solving the problems of automating the control of electrical equipment. These include generator protection devices, motors, transformers, reactors, power lines, central control systems, etc. Relay protection devices are combined with sensors and integrated with communication devices. They are located as close as possible to the control object with significant savings on control cables. In addition to relay protection, the functions of recording emergency processes, identifying the place of damage, blocking switches, etc. are implemented.

Changing the management structure of the electric power industry and the processes of its reform requires attention to the development and modernization of systems for collecting, transmitting and displaying information at control points, which play a significant role in ensuring the controllability and reliability of the power system, regardless of ownership [1, 2]. Digitalization in the power industry allows to form large amounts of data about the state of connections, equipment at substations and the power system. The article [3] analyses the prospects of using methods based on multiple simulation, statistical processing of the results and machine learning in relay protection and automation of electrical networks.

At the same time, it is necessary to reconstruct and modernize systems using devices and systems based on the use of modern technologies.

In these conditions, it is necessary to have a wide range of alternative proposals for collection information based on modern multi-purpose technological process control systems and its integration with the automated control system of the enterprise, as discussed in [4]. At the same time, the problems of collecting information not only about the position of the equipment and the values of the mode parameters, but also the issues of maintenance, tasks of technical and commercial metering of electricity, registration of emergency events and processes, determining the location of damage, diagnostics of the main equipment, organization of a unified time system should be taken into account as much as possible [5, 6].

Multifunctional systems for collecting, processing and displaying information should also provide the task of outputting information to a modern control panel, including video screens for collective use. The study in [7] proves feasible using offline-computed parameters to implement a routine and emergency controls system for further transition to online software-based computing of steady states and transients.

The requirements for ensuring high structural and informational reliability of the system's operation are also obvious, as well as stringent requirements for the response time of the system. The latter is especially important in emergency situations when the response time of the personnel on duty to events can be reduced to 0.1 sec. A technique and a programming-computing suite (PCS) developed in the study [8] is aimed to estimate the effect of equipment reliability indices, schedules, and regular overhaul scopes on reliability and efficiency of combined heat and power plants

When introducing modern systems in the structure of the system operator, it is necessary to take into account the presence of a three-level (district, regional, central level) control system. In order to operate an electric power system without accidents, it is necessary to have complete and reliable information about the technological process.

While implementing systems for collecting, transferring and displaying information, the relevant general issues for all companies in the industry are:

- ensuring the functions of reliability and survivability of the system,
- use of industry unified standards for information exchange protocols,
- providing a convenient and advanced human-machine interface, primarily for monitoring and control in real time.

Cyber threats present an increasing danger to energy facilities. It is necessary to ensure the cybersecurity of automatic control systems, such as relay protection devices (RPA), mode control (RC) and emergency control (EC) devices, automated control systems. In the article [9], the authors propose a methodological approach to the analysis of the structure of automatic means of regime and emergency control from the point of view of their influence on the reliability and survivability of power systems, taking into account the known cybersecurity threats. Authors of paper [10] analysed methodological and modelling developments on the study of energy security problems and describes the features and new challenges in the research of energy security at

present, highlighting the need to develop modern methods, models and tools. In this regard, this article considers a set of aspects of the use of modern technologies and developments for the protection of power systems and provides the qualitative analysis of the optimal concepts of management and protection of electrical networks, which are most suitable in the local conditions of the regions, and have a theoretical and practical importance of developing the global energy system in Azerbaijan.

Materials and methods

Qualitative analysis of the electric power systems of Azerbaijan, their reliability and safety

Along with long-existing power plants and substations, (Azerbaijan Thermoelectric Power Plant, Mingachevir Hydroelectric Power Plant, Sumgait, Northern, Southern Power Plants, Khachmaz, Absheron, Ganja Electric Substations), the country has many reconstructed and new stations of medium and small power. New hydroelectric power plants and substations are being designed in the recently liberated territories (Shusha, Zangilan, Fizuli, Jebail, Lachin, Kelbajar, Khojavend, Gadrut, Aghdam, Gubadli, as well as in Khankendi, Khojaly, etc.) where the most modern electrical equipment and technologies of foreign manufacturers will be used. It is also planned to use alternative energy sources in the construction of smart cities in these territories.

The country's electricity economy includes not only a wide network of hydro- and thermoelectric power plants, but also intensive energy exchange systems with neighboring countries such as Turkey, Georgia, Russia and Iran, which plays an important role in providing the country with sustainable electricity, and is an important element of its stability and security. For the effective management of this extensive network, high-quality electrical equipment of foreign manufacturers such as AREVA, ABB, GE, Schneider, Siemens, NR-China, etc., as well as modern technologies of international energy companies from Turkey, Japan, Russia, Ukraine, Italy, Germany and others are used. All this increases the professional level of the local specialists, playing an important part of reliable management and maintenance of large-scale energy systems.

Despite the introduction of modern technology, intervals still appear in the supply of electrical energy at times. The appearance of these intervals is accompanied by accidents in the power system.

Analysis of emergency processes in the power system leads to the need, first of all, to analyze the reliability of the power system as a whole, and the reliability of all its constituent elements.

The growth of the unit capacity of the power system (300-400 MVA), the presence of extended power lines of 330-500 kV, necessary for the transportation of power from the excess part of the system to the deficit, branching the network of 110 kV, leads:

- to an increase in short-circuit currents and powers
- difficulties in ensuring the stable operation of the system,
- increase in frequent emergency events, including the possibility of complex (cascade)

accidents.

One of the ways to comprehensively solve prevention problems is to carry out control without shutting down the equipment using measurement methods carried out at operating voltage. Methods of control under voltage, in addition to improving the effectiveness of prevention, can also provide the accumulation of data for assessing the reliability of equipment.

With a reduction in the monitoring period, the probability of timely detection of defects increases and, consequently, the likelihood of emergency equipment failures decreases. It is especially important to carry out frequent monitoring during operation, when the likelihood of such failures is high.

Based on monitoring the factors causing a decrease in the reliability of electrical equipment and elements in the power system identified as follows:

- damage of isolation
- lightning strike
- the severity of the weather
- touching foreign bodies
- various types of short circuits
- security is not working properly
- broken overhead power lines, open loop
- broken cable
- damage to the switching devices of the second side
- damage to the connecting cables
- heating of linear dividers
- errors of technical personnel during repair and operation
- errors made during the project

- overload
- corrosion of the grounding circuit of the support
- corrosion of supporting metal structures
- gaps in bolted connections of anchor supports

As per significant risk factors, the energy system of Azerbaijan is divided into 4 zones for lightning damage and pollution:

1. Apsheron Peninsula, Caspian Sea Region
lightning strike, on average 0 ÷ 20 hours, higher pollution
2. Kura, Araz, Salyan, Mugan
lightning strike, on average 20 ÷ 30 hours, average pollution
3. Karabakh plain, Sheki, Guba-Gusar, Tovuz, Shamkir, Ganja
lightning strike, on average 30 ÷ 50 hours, average pollution
4. Agstafa, Oguz, Gabala
lightning strike, on average 50 ÷ 100 hours, low pollution

All this requires special measures aimed at ensuring the necessary level of reliability. Under the reliability of the power system (or its elements), it is necessary to understand its ability to perform its task while reducing the main functioning in static and dynamic modes, within acceptable limits.

The main means of improving reliability are:

- reservation
- application of high-quality materials, structures and manufacturing technology,
- strict compliance with the rules of technical operation of equipment,
- wide application of automation of regulation of normal modes,
- correct selection and installation of emergency automation devices,
- ensuring correct and uninterrupted operation of relay protection devices.

Parameters and characteristics of reliability of the main elements of the system are determined by probabilistic statistical methods. Here it is necessary to take into account the presence of random processes of the functioning of the power system, that is:

- various normal operating states and pre-emergency mode parameters
- probability of failure of an element
- the duration of equipment repair and the likelihood of an emergency in the repair scheme, when part of the equipment of the power plant or substation is disconnected for repair.
- The main indicators of reliability of a complex electric power system are:
- emergency loss frequency or failure flow parameter (specific damage, ω 1/year)
- the average duration of emergency repair of the failed element (average recovery time, T_r).

As an example, it can be cited data on some electrical engineering equipment.

Table 1

| Failure flow / recovery time | | |
|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Elements | Failure flow ω 1/year | Time of recovery T_r , hour/ 1 |
| Power units | | |
| 250-300 MB | 8.26 | 45 |
| 500 MW | 21.36 | 70 |
| Transformers | | |
| 110 kV | 0.075 | 95 |
| 220 kV | 0.025 | 60 |
| 330 kV | 0.053 | 45 |
| Air switches | Per connection | |
| 110/220 kV | 0.02 | 45/122 |
| 330 kV | 0.03 | 161 |
| Busbar | | |
| 110 kV | 0.013 | 5 |
| - | | |
| 500 kV | | |
| Power transmission line | Per 100 km Length | |
| 110 kV | 0.66 | 11 |
| 220 kV | 0.36 | 9.3 |
| 330 kV | 0.3 | 15.3 |
| 500 kV | 0.15 | 13 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

For power transmission lines it is necessary to take into account the coefficient of unstable failures [11]. Taking them into account, the number of expected outages of overhead systems should be made as shown in Table 2:

Table 2

| Transmission line failures | | | |
|----------------------------|----------|-------------|-----------------------------------|
| Power transmission | ω | Coefficient | $\omega' = \omega/k$ (per 100 km) |
| 110 | 0.66 | 0.24 | 2.75 |
| 220 | 0.36 | 0.25 | 1.44 |
| 330 | 0.3 | 0.25 | 1.2 |
| 500 | 0.15 | 0.36 | 0.42 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

For busbar of 110-500 kV with at least six connections, the failure flow will be $\omega' = n \cdot \omega = 6 \cdot 0,013 = 0,078$ 1/year.

The necessary technical measures are taken in the power system in accordance with a certain value of the probabilities. For example, all high voltage air circuit breakers have been replaced by German circuit breakers (SF6) in the country power system [12].

Increasing the short-circuit currents and capacities require special measures to limit them not only in size, but also in duration.

The increase in short-circuit current levels imposes an increase in the requirements in relation to the electrodynamic and thermal resistance of the elements of the devices of the energy system, - for example, the increase in the levels of short-circuit current is one of the main reasons for the decrease in the operational reliability of power transformers and can cause their damage. Thus, it is necessary to:

- improve the performance of traditional switching equipment
- introduce new ultra-fast switching devices capable of limiting and disabling the short-circuit current during the first half of the period
- use non-inertial and inertial current-limiting devices.

The conditions of flow, limitation and shutdown of the short-circuit current presented in the Figure 1 below:

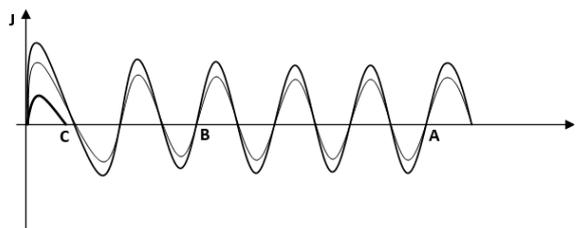


Fig. 1. Relay response in case of short-circuit current

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Shutdowns occur after 4-5 periods $t = 0,8 - 0,1$ seconds, depending on the speed of relay protection moment A.

Reducing the shutdown time to 2 periods $t = 0,04$ sec will allow to disable the short circuit at time B. Sine wave characterizes the processes of limiting the short-circuit current to non-inertial current-limiting devices. The curve shows the limitation of the short-circuit current by the current-limiting switching apparatus and the current shutdown at the moment C.

Thermal resistance switch is defined as

$$B_T = J_{p0}^2 (t_{off} + T_a) \quad (1)$$

where, J_{p0} - periodic component of the short-circuit current (initial values)

t_{off} - shutdown time

T_a is the damping time of the aperiodic component.

Electrodynamic resistance of the switch is defined as

$$B_d = i_{sc}^2 = 2 k_{sc}^2 \cdot J_{p0}^2 \quad (2)$$

where, i_{sc} is the shock current, k_{sc} is the impact coefficient.

Total exposure to current

$$B_{\Sigma} = \phi_1(B_T) + \phi_2(B_d) \quad (3)$$

where, $\phi_{1,2}$ - is the phase angle of the current

Thus, by reducing the shutdown time and the amount of shock current, it is possible to increase the reliability of the switching apparatus.

However, in this case, in each case, an analysis of the sensitivity of the relay protection to the short-circuit current in the constraint mode is necessary. This may lead to the need to develop fundamental new relay protection and automation devices [13 - 15].

Currently, to limit short-circuit currents, the following are used:

- permanent and automatic network division
- current-limiting reactors and resistances
- power transformers with a winding of lower voltage.
- parts of power transformers of 110 kV network grounded to neutral.

Results

Solutions provided by integration of microprocessor protection relays into the SCADA power grid system

The reliability of the electricity transmitted to the consumer should be at a high level. With the growing need for electricity supply in Azerbaijan, there is a constant increase in the load, which requires the expansion and an increase in the capacity of the systems.

Currently, modern computer technology allows to fully automate the main functions of electric power systems (production, transmission, distribution).

SCADA system technology with most modern standard functions, as well as remote terminals at various substations and power plants, is necessary for the economical and reliable operation of Azerbaijan's power grids. The disadvantage of the existing system is poor coordination of relay protection and automation, which causes interruptions that can be avoided. Therefore, it is recommended to use contactless microprocessor digital relays together with old electromechanical ones, [16, 17].

The main operational functions of the SCADA system, necessary for reliable monitoring and control of the power systems of Azerbaijan, include:

- monitoring of all thermal and large hydroelectric power plants, all high-voltage lines in the system (all lines of 500 kV, 330 kV, 220 kV and most lines of 110 kV, etc.) and electrical substations.
- control of generating means at economical operation (economical load division, monitoring of reserve, calculation of production cost) and reliable operation (adjustment in order to match the production of load)
- monitoring and control of electrical system components such as switches, transformers, relays and reactive devices
- alarms, event logging and storage of statistical data files for subsequent access to them and all kind of requests
- load forecast for short-term operational requirements and analysis of the design of the load schedule of the units
- analysis of the operation of the power grid in present and designed conditions with standard applications such as dispatching energy flow, network sensitivity, optimal energy flow analysis, emergency analysis, short circuit analysis and safety analysis, etc.

Microprocessor relay protection performs the following measurement and control functions:

- control of phase rotation direction measurement of phase currents and zero wire,
 - measurement of phase stresses relative to grounding,
 - measurement of active, reactive and full power,
 - measurement frequency,
 - control of switches operation time,
- and so on.

One of the advantages of microprocessor devices is the development of diagnostic devices themselves. Communication processors and servers ensure the joint operation of all devices, as well as information processing, calculations, record keeping and archives. For diagnostics of

generators and other station equipment, it is necessary to use non-electric co-meter, pressure, temperature, consumption.

Each terminal allows communication with the highest level of the Automated Control System (ACS) of substation, while being its lower level. Unlike conventional ACS of Technological Process, where a relatively long response time is allowed (industry, thermal part of power plants, etc.), these terminals have high computing characteristics and their own "intelligence", i.e. autonomously perform the functions of protection and automatic control of electrical equipment with an impact on switching elements. Terminal microprocessor of relay protection as part of ACS TP can also be used to collect current information about the electrical parameters of the protected equipment (currents, voltage, power, frequency) and switching equipment [18-20].

The internal terminal database stores information about any changes in input and internal logical signals. Additionally, if the power grid is damaged, a digital record of emergency waveforms of analog and discrete signals in indestructible memory, i.e. a database of oscillograms of emergency processes, is formed. This database is used for the analysis of accidents. These databases can be made available in the local relay network and operational personnel with the help of special software. Access to information and changing terminal settings is governed by the Administration Rights of each registered user. The reliability of the terminal is ensured by continuous functional control and self-diagnostics of the hardware and software part of the device. The controlled area begins with the conversion of the analog and ends with the windings of the output relay. The device uses small, closed, not decipherable, output electromechanical relays with guaranteed parameters that do not require periodic adjustment and cleaning of contacts. Reduce circuit and voltage power consumption, allowing to use modern, small, software-controlled current and voltage sources to configure and test devices. An important feature of the protection of domestic MP terminals is that developers have the opportunity to respond quickly to customer requirements that are not taken into account in standard protection options.

Conclusions

Diagnostics of the main equipment was carried out. The issues of reliability are considered and the failure rate is estimated, as well as the conditions for the flow, limitation and shutdown of the short-circuit current are analyzed.

Qualitative analyses show that in order to ensure the stability of the power system and improve the reliability of power supply to the consumer, it is necessary to perform the following measures:

- quick shutdown of short circuits
- automatic re-activation of all kind.
- automatic frequency unloading
- automatic power on
- emergency automation
- integration of microprocessor protection relays into the SCADA system of the global power network for operational control of emergency modes

Reference

1. B.V. Papkov, P.V. Ilyushin, A.L.Kulikov, *Reliability and efficiency of modern power supply*, Nizhny Novgorod: Scientific and Publishing Center "XXI Century", (2021)
2. B.V. Papkov, A.I. Kulikov, P.V. Ilyushin, *Problems of reliability of modern power supply*, Publishing house "Infra-Engineering", (2021)
3. L. Anton, P. Pavel, V. Vladimir, *Improving the recognition of operating modes in intelligent electrical networks based on machine learning methods*. E3S Web of Conferences 216, 01034 (2020)
4. A.N. Antamoshin, O.V. Bliznova, A.V. Bobov, *Intellectual control systems of organizational and technical systems*, M.: RiS, (2016)
5. Y.Z. Tsyppin, *Relay automatic systems*, "Nauka", (2017)
6. Yu.A. Barabanov, *Microprocessor devices of relay protection and automation of distribution networks*, (2015)
7. P. Ilyushin, *Automated control of distributed generation enabled power districts*, E3S Web of Conference 139, 01035 (2019)
8. V.N. Bazhenov, E.I. Sokol, O.G. Grib, V.G. Sychenko, A.A. Danilov, Yu.V. Vladimirov, D.A. Gapon, S.V. Shvets, T.S. Jerusalemova, N.V. Rudevich, *Calculation of relay protection and automation systems in the electric power industry*, Kharkov: FOP Panov V.N., (2017)
9. Osak, D. Panasetsky, E. Buzina, *Analysis of the emergency control and relay protection structures approached from the point of view of EPS reliability and survivability by taking into account cybersecurity threats*, Conference 139, 01029 (2019)

10. N. Pyatkova, V. Rabchuk. *Energy security problems and features of its research at the present stage*, E3S Web of Conferences 25, 01007 (2017)
11. E. F. Makarov., *Reference book on electric networks 0,4-35 kV and 110-1150 kV*. Monogr. Volume 1, Energiya - M., (2018)
12. Siemens smart process instrumentation tutorials for scaling and calibration. 2015
13. A.N. Aleksandrovskaya, *Avtomatika*, M.: Academia, (2018)
14. V.V. Ovchinnikov, *Architecture of distributed information and computing microprocessor systems*, M.: Energoatomizdat, (2017)
15. Florentina Magda Enescu, Nicu Bizon, *SCADA Applications for Electric Power System*, Springer International Publishing, (2017)
16. Mini S. Thomas, John Douglas McDonald. *Power System SCADA and Smart Grids*, CRC Press, (2020)
17. G.F. Kovalev, L.M. Lebedeva, *Reliability of Power Systems*. Springer, (2019)
18. D. Krupenev, *Determination of Critically Objects of Electric Power Systems from the Position of Energy Security*, E3S Web of Conferences. Vol.58, (2018)
19. N. Beresneva, N. Pyatkova, *Choosing of the FEC critical objects in model researches of energy security problems and its features*, E3S Web Conf. Volume 58, (2018)
20. N. Pyatkova, N. Beresneva, A. Edelev. *Research of critical energy infrastructures taking into account energy security*, E3S Web Conference. Vol. 25, (2)

Authors of the publication

Shamsi Nasirov – Engineering University, Bak, Azerbaijan.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

| | |
|------------------------|----------------------|
| Получено | 24.10.2023 г. |
| Отредактировано | 30.10.2023 г. |
| Принято | 26.11.2023 г. |



НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА

Закиров Р.Н., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Чичиров А.А.

Казанский государственный энергетический университет
г. Казань, Россия

zakirov.kgeu@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* На сегодняшний день имеются стратегические цели развития водородной энергетики в РФ. Достижение поставленных целей во многом зависит от норм и положений действующих законодательных, правовых и нормативно-технических документов (НТД). В области водородной энергетики остро стоят вопросы обеспечения промышленной безопасности. Рассмотрение НТД по промышленной безопасности при производстве водорода является актуальным. Для решения комплекса задач по инфраструктуре водородного транспорта необходимо преодолеть большое количество препятствий, связанных не только с совершенствованием технологий, повышением их экономической эффективности, но и с обеспечением достаточного уровня безопасности. **ЦЕЛЬ.** Рассмотреть законодательную и нормативно-правовую базу в области промышленной безопасности водородных технологий в Российской Федерации с целью выявления положений норм промышленной безопасности, и анализа степени обеспеченности деятельности по проектированию, строительству и эксплуатации водородных заправочных станций стандартами и нормативно-правовыми актами в области водородных технологий при производстве, хранении и транспортировании водородного топлива. **МЕТОДЫ.** Проведен анализ НТД по статусу в формате действует либо отменен, анализ положений, регламентирующих нормы промышленной безопасности водородных технологий, а также изучены национальные стандарты и технические регламенты Таможенного союза. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Определены основные положения законодательства и нормативно-правовых документов в части идентификации объектов водородных технологий и водородной инфраструктуры в качестве опасных производственных объектов (ОПО) и их регистрации в государственном реестре ОПО. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сделаны выводы о необходимости разработки и утверждения требований норм промышленной безопасности в области водородных технологий, о необходимости решения вопросов по стандартизации технологий водородной инфраструктуры и по сертификации водородных заправочных станций.

Ключевые слова: водородные технологии; нормативно-техническая документация; водородная заправочная станция; нормы промышленной безопасности.

Для цитирования: Закиров Р.Н., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Чичиров А.А. Нормативно-техническая документация по промышленной безопасности при производстве водорода // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 91 – 100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-91 – 100.

NORMATIVE AND TECHNICAL DOCUMENTATION ON INDUSTRIAL SAFETY IN THE PRODUCTION OF HYDROGEN

Zakirov R.N., Chichirova N.D., Filimonova A.A., Chichirov A.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

zakirov.kgeu@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* To date, there are strategic goals for the development of hydrogen energy in the Russian Federation. The achievement of the set goals largely depends on the norms and provisions of the current legislative, legal and regulatory technical documents (NTDs). In the field

of hydrogen energy, the issues of ensuring industrial safety are acute. Consideration of the NTD on industrial safety in the production of hydrogen is relevant. In order to solve the complex of tasks on the infrastructure of hydrogen transport, it is necessary to overcome a large number of obstacles associated not only with the improvement of technologies, increasing their economic efficiency, but also with ensuring a sufficient level of safety. **PURPOSE.** The legislative and regulatory framework in the field of industrial safety of hydrogen technologies in the Russian Federation is considered in order to identify the provisions of industrial safety standards, and analyze the degree of security of activities for the design, construction and operation of hydrogen filling stations with standards and regulations in the field of hydrogen technologies in production, storage and transportation of hydrogen fuel. **METHODS.** The analysis of normative and technical documents (NTD) according to the status in the format valid or canceled, the analysis of the provisions governing the industrial safety standards of hydrogen technologies, and also the national standards and technical regulations of the Customs Union were studied. **RESULTS.** The main provisions of the federal law N 116-FZ of 07/21/1997 and the order of Russian technical supervision (Rostekhnadzor) N 471 of 11/30/2020 are determined. in terms of identifying hydrogen technology facilities and hydrogen infrastructure as hazardous production facilities (HPF) and their registration in the state register of HIFs. **CONCLUSION.** Conclusions are drawn about the need to develop and approve the requirements of industrial safety standards in the field of hydrogen technologies, about the need to address issues of standardization of hydrogen infrastructure technologies and certification of hydrogen filling stations.

Key words: hydrogen technologies⁴ regulatory and technical documentation; hydrogen filling station; industrial safety standards.

For citation: Zakirov R.N., Chichirova N.D., Filimonova A.A., Chichirov A.A. Normative and technical documentation on industrial safety in the production of hydrogen. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 91-100. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-91-100.

Введение (Introduction)

На текущем этапе развития водородной энергетики препятствиями и ограничениями, которые сдерживают развитие водородной энергетики в Российской Федерации (РФ) являются недостаточность нормативно-правовых документов в области водородной энергетики касательно норм обеспечения безопасности и несовершенство национальной системы стандартизации и сертификации водородной энергетики.

Актуальными задачами для достижения стратегической цели развития водородной энергетики в РФ являются разработка и принятие в установленном порядке новых и пересмотр существующих нормативно-правовых актов в области безопасности водородной энергетики, которые бы позволили нам ускорить процессы по усилению работ по производству и применению водорода [1].

Целью работы является анализ степени обеспеченности деятельности по проектированию, строительству и эксплуатации водородных заправочных станций стандартами и нормативно-правовыми актами в области водородных технологий при производстве, хранении и транспортировании водородного топлива.

Литературный обзор (Literature Review)

В обзоре рассмотрены научные статьи в отечественных и зарубежных периодических изданиях, а также нормативных документов РФ и таможенного союза.

В научно-технических журналах за последние 5 лет отсутствуют публикации по вопросам обеспеченности и достаточности нормативно-правовых документов в области промышленной безопасности систем обеспечения водородом транспортных средств, несмотря на приоритетность и значимость рассматриваемого вопроса, и если даже есть, то они касаются общих вопросов безопасности атомно-водородной энергетики, пожарной безопасности и перспективы и направлений развития водородных энергетических технологий и электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе.

В [2] уделено внимание атомно-водородной энергетике, как приоритетному направлению научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» атомных энерготехнологических станций (АЭС) и предусмотрено проведение работ по обоснованию безопасности атомно-водородных комплексов для производства водорода, в которых сочетаются ядерно-опасные объекты с водородными агрегатами, таких как разработка для задач безопасности водородной энергетики физико-математических

моделей; экспериментальное исследование и численное моделирование поведения водородно-воздушных газообразных смесей в системах ядерного производства водорода и его потребления; разработка инженерных методик для риск-информированного управления безопасностью; анализ и совершенствование действующей нормативной документации для безопасности. Развитие атомно-водородной энергетики внесет свой вклад в энергетическую безопасность [3].

Кроме достижения технологической зрелости, конкурентоспособности и экономической эффективности будущее развитие водородной энергетики (ВЭ) требует преодоления препятствий, связанных с обеспечением приемлемого для общества уровня безопасности ВЭ и решения задач, связанных с уровнем аналитического, расчетно-теоретического, экспериментального научно-технического обеспечения безопасности систем, объектов и сетей ВЭ от стадии проектирования до вывода из эксплуатации, полнотой и достаточностью нормативно-правовой базы для новых реакторных комплексов, сопутствующих им новых технологий, и для систем безопасности инфраструктуры ВЭ [4], а также качеством и уровнем норм и стандартов как для самих водородных технологий и технических систем, так и для систем безопасности [5].

В статье [6] авторы исследовали водород с точки зрения интегральной оценки его характеристик для оценки потенциала широкомасштабного внедрения водорода в энергетику и отмечают, что существующие пилотные водородные проекты являются позитивными, но из-за отсутствия проработанной международной системы регулирования отрасли считают, что для энергетического сектора водородные проекты являются решениями пока не масштабируемыми.

Рассмотрены возможности избежать взрыва и выброса радиоактивных продуктов и взрывоопасных газов в атмосферу путем раннего выпуска из реактора в буферные емкости гораздо большего размера, в которых водород мог бы быть полностью или частично отделен, а затем сжигаться в факеле показана [7].

Пиковое воздействие избыточного давления, возникающее при взрыве водорода оценено исследованиями авторов [8] методами, обеспечивающими эффективный метод оценки риска безопасности ядерной системы производства водорода.

В статье [9] авторы рассматривают предотвращение риска распыления водорода из контейнера при производстве водорода на АЭС и предлагают полученный диапазон воспламеняемости дисперсии установки по производству водорода при различных давлениях, положениях и температурах заложить в основу для установления стандарта безопасного расстояния, необходимого для предотвращения взрыва водорода.

Усовершенствованная система водяного реактора для массового производства водорода с использованием метода электролиза воды [10] рассмотрена с целью оценки способности прогнозирования кодов анализа теплогидравлической безопасности (*MARS-KS* и *TRACE*), используемых для оценки безопасности системы ядерного реактора, по экспериментальным данным, где авторами сделан вывод, что оба кода *MARS-KS* и *TRACE* консервативно предсказывают отклонение от режима закипания ядер с почти одинаковой предсказуемостью.

Особые пожароопасные свойства водорода заставляют экспертов [11] задуматься о необходимости разработки новых способов и средств защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

В статье [12, 13] рассмотрены вопросы нормативного регулирования и документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики, в котором отмечена целесообразной следующая иерархия: Федеральный закон или постановление Правительства), серия нормативных документов добровольного применения (стандарты и своды правил), содержащие требования к технологическому оборудованию, зданиям и сооружениям объектов ВЭ, а также требования к эксплуатации. В продолжение тематики авторы рассмотрели системы мер безопасности на АЭС с хранением, использованием и непосредственным получением водорода на АЭС [13].

В статье [14] представлены результаты, касающиеся пожаро- и взрывоопасности различных транспортных средств, работающих на альтернативном топливе, в туннелях. Показано, что в резервуарах под давлением пожары, как правило, намного больше по размерам, но короче по продолжительности. Для автомобилей, работающих на водороде, размеры очага возгорания значительно выше по сравнению с баками, работающими на сжиженном газе, в то время как длина пламени лишь немного больше. Эти опасности необходимо тщательно учитывать как при проектировании систем безопасности транспортных средств, так и при проектировании систем пожарной безопасности туннелей.

Перспективы и направления развития водородных энергетических технологий и электрохимических технологий для автомобилей на водородном топливе рассмотрены в следующих работах. Авторы рассматривают Татарстан конкурентоспособным регионом по производству водорода на ТЭС с ПГУ в Татарстане в настоящее время с затратами значительно меньшими рыночной стоимости, и выделяют основные направления деятельности: производство электролизеров и топливных элементов мощностью 1 МВт, получение водорода с регламентированной чистотой, промышленное производство транспорта на топливных элементах, развитие комбинированных циклов с газовыми турбинами и топливными элементами на ТЭС [15].

Направления развития водородных энергетических технологий рассмотрены в [16], выделен ряд затруднений по эксплуатации водородных систем в энергоустановках, в том числе и требования обеспечения безопасности.

В работе [17] представлены в основном экологические преимущества электрохимических технологий для транспорта на водородном топливе.

Анализ последствий выделения водорода из металлгидридного контейнера проведен, в статье [18], исследованы рабочие параметры контейнера (температурное поле, давление, расход, тепловая нагрузка) во время быстрого выделения водорода и воздействия давления на препятствия, расположенные в окружающей среде, во время нежелательного взрыва водорода. В заключительной части статьи объясняется математическая зависимость между давлением ударной волны и расстоянием между препятствием и центром взрыва [18].

Когда мы говорим о нормативно правовых документах, то подразумеваем действующие технические регламенты (ТР), введение которых предусмотрено положениями федеральный закон от 27.12.2002 N 184-ФЗ «О техническом регулировании» и правила безопасности (ПБ), которые утверждаются Ростехнадзором. Если они отсутствуют, то до периода вступления их в юридическую силу в соответствии со ст.46 федерального закона N 184-ФЗ остается руководствоваться требованиями к продукции, которые установлены законами и ГОСТами и подлежат обязательному исполнению только по общим критериям, связанным с защитой жизни, здоровья и имущества людей, имущества организаций и государства; охраны растений, животных и окружающей среды; защиты прав потребителей и обеспечения экономии энергии и ресурсов.

В 2005 году Шелищем П.Б., Язевым В.А. и Шаккумом М.Л., в период когда они исполняли полномочия депутатов Госдумы России, разрабатывался проект федерального закона N 496165-4 «Технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода», в 2007 году публично обсуждался и рассматривался Госдумой, но был отклонен (Постановление 21.11.2012 N 1235-6 ГД).

Действующим до вступления в юридическую силу соответствующих ТР к таким НТД относились Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды ПБ 03-598-03, которые введены Постановлением Госгортехнадзора России N 75 от 06.06.2003 Правила ПБ 03-598-03 разрабатывались в обеспечение федерального закона от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», который регламентирует требования к осуществлению деятельности в области промышленной безопасности, безопасности технологических процессов на опасных производственных объектах (ОПО). С 01.01.2021 года ПБ 03-598-03 не действуют, отменены постановлением Правительства РФ от 06.08.2020 N 1192.

В то же время Некоммерческое партнерство «Национальная ассоциация водородной энергетики» РФ (НП «НАВЭ») в своем годовом аналитическом обзоре за 2021 год «ДАЙДЖЕСТ–2021 Водородные технологии: предмет и цели технического регулирования. Часть 1. Водородные заправочные станции» показывает недействующие ПБ 03-598-03 так, как если бы они были действующими.

Действующие требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода СП 162.1330610.2014, которые утверждены приказом № 299 Федерального космического агентства (Роскосмос) от 24.12.2014 устанавливает требования по обеспечению пожарной безопасности и охраны окружающей среды и по безопасности к эксплуатации, устройству и разработке криогенных систем использования, транспортирования, хранения и ожижения жидкого водорода в наземной инфраструктуре аэродромных и космических заправочных комплексов, испытательных комплексов и других систем потребителей.

Действующие нормы технологического проектирования систем производства водорода электролизом воды НТП 24-94, которые утверждены комитетом по перерабатывающей и пищевой промышленности РФ, определяют требования к

проектированию процессов и технологии, обязательные для всех проектных бюро, которые разрабатывают проектную и рабочую документацию на реконструкцию, расширение и техническое перевооружение действующих и на строительство новых цехов производства водорода из воды методом электролиза на масложировых промышленных предприятиях.

Действующая типовая инструкция по эксплуатации установок электролиза для получения водорода и кислорода РД 34.50.501-96 устанавливает порядок технического обслуживания, эксплуатации и пуска установки электролиза воды для производства водорода и кислорода на электростанциях и на предприятиях электрических сетей.

Действующие правила обеспечения взрывозащиты водородных систем на атомных станциях НП-040-02, которые введены Госатомнадзором России от 31.12.2002 Постановлением N 14, являющиеся федеральными нормами и правилами (ФНиП) в атомной отрасли устанавливают с целью предупреждения и ослабления проектных и запроектных аварий, сопровождающихся взрывом водородсодержащих смесей основные принципы и требования по обеспечению взрывозащиты в процессе реализации проектирования и эксплуатации.

Действующими ФН и П правилами промышленной безопасности ОПО где эксплуатируется оборудование под избыточным давлением, которые утверждены Ростехнадзором от 15.12.2020 приказом N 536, установлены требования к сосудам и оборудованию под избыточным давлением более 0,07 МПа водяного пара, газа в газообразном и сжиженном состоянии; воды с температурой более 115 °С.

Положения норм безопасности при работе с водородом, применяемые в космической отрасли, пищевой, химической промышленности, в тепловой и атомной энергетике применимо отчасти и не удовлетворяют необходимым нормам безопасности, как для стационарных, так и для мобильных автономных водородных энергоустановок, а также электротранспортных средств на водородном топливе. И ФН и П «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением» закрывают положения норм промышленной безопасности только частично. В настоящее время, при создании инфраструктуры водородного транспорта, есть возможность использовать выдержки из действующих НТД, международных стандартов или из области атомно-водородной энергетике.

В период отсутствия принятого ФЗ, действующего специального ТР в области водородных технологий, приходится обращаться к сводному перечню стандартов, использование положений которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение ТР, включающих в себя положения из регламентов РФ о требованиях пожарной безопасности (N 123-ФЗ от 22.07.2008) и о требованиях безопасности зданий и сооружений (N 384-ФЗ от 30.12.2009), а также регламентов по безопасности таможенного союза (ТР ТС), действующие на таможенной территории серии 010/2011 (машины и оборудование, 016/2011 (аппараты, работающие на газообразном топливе, 018/2011 (колесные транспортные средства) и 032/2013 (оборудование под избыточным давлением). Такого рода практика использования положений промышленной безопасности из национальных и международных стандартов дает возможность существенно усовершенствовать требования безопасности в области водородных технологий в близком будущем.

Стратегию развития компетенций и требований безопасности водородных технологий при разработке государственных стандартов определяет технический комитет по стандартизации «Водородные технологии», который работает на базе института проблем химической физики ИПХФ РАН г. Черноголовка (приказ Росстандарта №2235 от 08.10.2021). Технический комитет призван гармонизировать западные стандарты с российскими с учетом национальных интересов, актуализировать существующие стандарты и задавать упреждающие направления специфики их актуализации, а также урегулировать вопросы безопасности и стандартизации комплекса устройств водородных технологий: получения и производства водорода; хранения и транспортировки. Ранее соответствующие функции выполнял технический комитет (ТК29) по стандартизации "Водородные технологии", созданный при Ростехрегулировании (приказ Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии №542 от 05.03.2008).

В настоящее время в области Российской системы стандартизации водородной энергетике и водородных технологий – преимущественно в области транспорта, заправочных систем и хранения существует 33 стандарта (ГОСТ и ГОСТ Р). Они разработаны на основе международных стандартов, утверждались в 2011-2017гг., представляют собой обычный перевод на русский текста стандарта без учета технических и климатических особенностей. Поэтому они требуют существенной доработки. И кроме того международными организациями по стандартизации ISO принято 9 международных

стандартов, ИЕС – 12 стандартов, аналогов которых пока еще нет в российской системе. Следовательно, уже сейчас необходима актуализация порядка двух десятков национальных стандартов в соответствии с последними международными редакциями. Первостепенно пересмотр существующего национального стандарта ГОСТ Р 55226-2012 Водород газообразный. Заправочные станции», определяющего технические требования к водородным заправочным станциям, в соответствии со стандартом ISO 19880-1:2020 *Gaseous hydrogen — Fuelling stations — Part 1: General requirements* с учетом всех 8-ми частей ISO 19880.

В федеральном законе N 116-ФЗ от 21.07.1997 установлены: требования к ОПО; классы опасности I, II, III и IV (статья 2); категории ОПО (пункт 1 приложение 1); классы опасности (I – IV) по категориям ОПО (приложение 2). В таблице представлена выдержка из таблицы 2 приложения 2 по количеству воспламеняющихся и горючих газов, в том числе и водород, в соответствии I – IV классу опасности.

Исходя из только этих положений некоторые авторы статей за 2009-2015 гг. ошибочно считали что, в отношении технологических объектов, в которых одновременно используется одна и более тонны водорода, применяется Федеральный закон «О промышленной безопасности ОПО» от 21.07.1997 N 116-ФЗ, а производственные объекты, в которых одновременно используется менее одной тонны водорода, не подпадают под его требования, и в отношении этих объектов применяется федеральный закон от 27.12.2002 N 184-ФЗ «О техническом регулировании».

Таблица
Table

I – IV класс опасности газообразного и сжиженного водорода
I – IV hazard class of gaseous and liquefied hydrogen

| Количество газообразного и сжиженного водорода (воспламеняющиеся и горючие газы), т | 2000 и более | 200 и более, но менее 2000 | 20 и более, но менее 200 | 1 и более, но менее 20 |
|---|--------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| Класс опасности | I | II | III | IV |

*Источник: Федеральный закон N 116-ФЗ от 21.07.1997. Federal Law No. 116-FZ dated 07/21/1997.

С учетом положения N 116-ФЗ (п. 2 приложения 1) производственные объекты, в которых используется оборудование (компрессор и баллоны хранения), работающие под избыточным давлением водорода 40 МПа в газообразном состоянии (более 0,07 МПа) относятся к ОПО независимо от того, если даже одновременно используется менее одной тонны водорода. Идентификация объекта проектирования в качестве ОПО осуществляется в соответствии с требованиями к регистрации объектов в госреестре ОПО (приказ N 471 Ростехнадзора от 30.11.2020). Для идентификации объекта в качестве ОПО достаточно соотнесения одного из указанных в приложении 1 N 116-ФЗ положений, и недостаточно идентифицировать производственные объекты как ОПО только по критерию «количество получаемого, используемого, образуемого, хранимого, транспортируемого газообразного водорода». В соответствии с пунктом 5 приложения 2 федерального закона N 116-ФЗ к таким объектам устанавливается IV класс опасности.

В тоже время, следует заметить, что в таблице «Типовые наименования ОПО» в требованиях к регистрации и ведению государственного реестра ОПО (приложение №1 к приказу Ростехнадзора N 471 от 30.11.2020) отсутствует объект с наименованием «Водородная заправочная станция».

Материалы и методы (Materials and methods)

Материалами для исследования являются нормативно-технические документы (НТД), национальные стандарты и технические регламенты Таможенного союза, регламентирующие нормы промышленной безопасности водородных технологий.

Метод исследования. В качестве метода исследования принято: составление перечня НТД по нормам промышленной безопасности водородных технологий; определение статуса действия либо прекращения действия документов; нахождение в действующих документах положений по промышленной безопасности водородных технологий и анализ соответствия этих положений условиям при производстве, хранении и транспортировании водорода, актуальности и достаточности для обеспечения деятельности по проектированию, строительству и эксплуатации установок в области водородных технологий.

Результаты (Results)

В результате проделанной работы:

- рассмотрены законодательная и нормативно-правовая база в области промышленной безопасности водородных технологий в Российской Федерации, национальные стандарты и технические регламенты Таможенного союза;
- изучены действующие, отмененные и непринятые нормативно-правовые акты;
- выполнен анализ степени обеспеченности деятельности по проектированию, строительству и эксплуатации водородных заправочных станций стандартами и нормативно-правовыми актами в области водородных технологий при производстве, хранении и транспортировании водородного топлива;
- выявлено отсутствие нормативно-правовых актов с положениями норм промышленной безопасности для обеспечения деятельности по проектированию, строительству и эксплуатации водородных заправочных станций и водородных технологий при производстве, хранении и транспортировании водородного топлива;
- определены основные положения законодательства в части идентификации объектов водородных технологий и водородной инфраструктуры в качестве опасных производственных объектов (ОПО) и их обязательной регистрации в государственном реестре ОПО в Ростехнадзоре;
- выявлено отсутствие объекта с наименованием «Водородная заправочная станция» в таблице «Типовые наименования ОПО» приказа Ростехнадзора N 471 от 30.11.2020 Требованиям к регистрации объектов в государственном реестре ОПО и ведению государственного реестра ОПО»;
- выявлено отсутствие требований к сертификации водородных заправочных станций и исполнительного органа по их сертификации.

Заключение (Conclusions)

Нерешенность актуальных на сегодняшний и ближайший период времени вопросов технического регулирования касательно требований к безопасности устройств и систем, предназначенных для использования, хранения, производства и транспортировки водорода является одним из основных ограничений, сдерживающих развития технологий на водороде. Отсутствие стандартов современных нормативных требований по размещению водородных заправок, предназначенных для пассажирского и коммунального транспорта, норм безопасности при проектировании технологической части всего комплекса водородной заправочной станции, хранению водорода на них, заправке техники может затян timer введение в эксплуатацию в мегаполисах электробусов и грузовых транспортных средств на водородных топливных элементах для пассажиро-грузоперевозок, разрабатываемых «КАМАЗ» и «ГАЗ».

Наряду с разработкой и утверждением соответствующих НТД, необходимо также решать вопросы кем и как будут стандартизированы сборно-комплексные системы водородных технологий. Решение этих важных задач на опережение позволит ускорить развитие производств электрического автомобильного транспорта в РФ (распоряжение №2290-р Правительства РФ от 23.08.2021) и по сертификации конечной продукции, которые являются насущными перед проектировщиками и изготовителями водородных заправочных станций и транспорта на водородном топливе.

Выводы: В целях правовой поддержки формирования и ускорения развития инфраструктуры водородного транспорта, внедрения типовых водородных заправочных станций для обеспечения водородным топливом автотранспортных средств, с учетом базы знаний, компетенций и ограничений по разработке типовых водородных заправочных станций, необходимо:

- разработать и утвердить в установленном порядке технический регламент по безопасности устройств и систем, предназначенных для производства, хранения, транспортировки и использования водорода;
- разработать и утвердить в установленном порядке федеральные нормы и правила - Нормы технологического проектирования и правила безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации водородных заправочных станций;
- определить требования к сертификации водородных заправочных станций и исполнительного органа по их сертификации.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифры России в рамках исполнения условий соглашений № 075-15-2021-1087 и № 075-15-2021-1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Литература

1. Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. N 2162-р.
2. Пономарёв-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика. // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91. №5. С. 484-498.
3. Нургалиева А.М., Герасимова В.М. Концепция атомно-водородной энергетики. Теоретические и прикладные вопросы комплексной безопасности. // Материалы IV Международной научно-практической конференции. Издательство: ФГБОУ ДПО «Институт развития дополнительного профессионального образования». Москва. 2021. С. 131-133.
4. Кириллов И.А., Симоненко В.А., Харитонова Н.Л. Проблемы нормативного, экспериментального и расчетно-теоретического обеспечения безопасности водородной энергетики // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 3. С. 402-414.
5. Фатеев В.Н., Порембский В.И., Григорьев С.А., Баранов И.Е., Островский С.В., Коробцев С.В., Денисенко В.П., Николаев И.И., Кириллов И.А., Демкин С.А., Смирнов Р.В. Разработки и исследования водородных энергетических систем в национальном исследовательском центре "Курчатовский институт" // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 128-148.
6. Литвиненко В.С., Цветков П.С., Двойников М.В., Буслаев Г.В. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 428-438.
7. Adriana Palacios, Derek Bradley Hydrogen generation, and its venting from nuclear reactors // Fire Safety Journal. 2020. V. 113. 102968. p. 17.
8. Qunxiang Gao, Laijun Wang, Wei Peng, Ping Zhang, Songzhe Chen Safety analysis of leakage in a nuclear hydrogen production system // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. V. 47. pp. 4916-4931.
9. Kai Wang, Xiaojun Zhang, Yang Miao, Baofeng He, Cheng Wang Dispersion and behavior of hydrogen for the safety design of hydrogen production plant attached with nuclear power plant // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45. pp. 20250 – 20255.
10. Yeongjae Lee, Yun Seok Lee, Taewan Kim Predictability of safety analysis codes for departure from nucleate boiling in bundle for safety evaluation of massive hydrogen production systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2019. V. 44. pp. 5650 – 5659.
11. Королев Д.С., Калач А.В. Современные проблемы обеспечения пожарной безопасности в условиях развития водородной энергетики и декарбонизации // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и охраны труда. Сборник трудов секции №9 XXXII Международной научно-практической конференции. Химки. 2022. С. 115-119.
12. Шебеко Ю.Н. Нормативные документы, регламентирующие вопросы пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожарная безопасность. 2020. № 4.(101). С. 36-42.
13. Шебеко Ю.Н. Нормативное регулирование пожарной безопасности объектов инфраструктуры водородной энергетики // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 5. С. 5-12.
14. Ying Zhen Li Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels // Fire Safety Journal. 2019. V. 110. 102871. p. 20.
15. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Печенкин А.В. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане // Надежность и безопасность энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 79-91.
16. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонов А.Г., Куличихин В.В. Современные направления развития водородных энергетических технологий // Надежность и безопасность энергетики. 2019. Т. 12. № 2. С. 89-96.
17. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Разакова Р.И. Электрохимические технологии для автомобилей на водородном топливе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 104-115.
18. Tomáš Brestovič, Michal Puškár, Natália Jasminská, Marián Lázár, Romana Dobáková, Lukáš Tóth Analysis of the fast hydrogen release from the metal hydride container applied in automotive industry // Fire Safety Journal 2020. V. 111. 102841. p. 9.

Авторы публикации

Закиров Ринат Нургалиевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанского государственного энергетического университета, zakirov.kgeu@mail.ru.

Чичирова Наталья Дмитриевна – д-р хим. наук, профессор, заведующая кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции», Казанского государственного энергетического университета, ndchirova@mail.ru.

Филимонова Антонина Андреевна – канд. мед. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика», Казанского государственного энергетического университета, khimiya_kgeu@mail.ru.

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика», Казанского государственного энергетического университета, khimiya_kgeu@mail.ru.

References

1. The concept of the development of hydrogen energy in the Russian Federation, approved by the decree of the Government of the Russian Federation dated August 5, 2021 N 2162-R.
2. Ponomarev-Stepnoy N.N. Atomic-hydrogen power engineering // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2021; 91(3):297-310.
3. Nurgaleeva A.M., Gerasimova V.M. The concept of atomic-hydrogen energy. Theoretical and applied issues of complex security // Materials of the IV International Scientific and Practical Conference. Publishing house: FGBOU DPO "Institute for the Development of Additional Professional Education", Moscow, 2021; 131-133.
4. And Kirillov.A., V. Simonenko.A., Kharitonova N.L. Problems of normative, experimental and computational-theoretical support of hydrogen energy., *Russian nanotechnologies* 2020;12-13. 15(3):402-414.
5. Fateev V.N., Poremsky V.I., Grigoriev S.A., Baranov I.E., Ostrovsky S.V., Korobtsev S.V., Denisenko V.P., Nikolaev I.I., Kirillov I.A., Demkin S.A., Smirnov R.V. Development and research of hydrogen energy systems at the National Research Center "Kurchatov Institute" // News of higher educational institutions. Problems of Energy. 2021; 23(2):128-148.
6. Litvinenko V.S., Tsvetkov P.S., Dvoynikov M.V., Buslaev G.V. Barriers to the implementation of hydrogen initiatives in the context of sustainable development of global energy // Notes of the Mining Institute. 2020; 244:428-438.
7. Adriana Palacios, Derek Bradley Hydrogen generation, and its venting from nuclear reactors // Fire Safety Journal. 2020; 113:102968:17.
8. Qunxiang Gao, Lajun Wang, Wei Peng, Ping Zhang, Songzhe Chen Safety analysis of leakage in a nuclear hydrogen production system // International Journal of Hydrogen Energy. 2022; 47:4916-4931.
9. Kai Wang, Xiaojun Zhang, Yang Miao, Baofeng He, Cheng Wang Dispersion and behavior of hydrogen for the safety design of hydrogen production plant attached with nuclear power plant // International Journal of Hydrogen Energy. 2020; 45:20250-20255.
10. Yeongjae Lee, Yun Seok Lee, Taewan Kim Predictability of safety analysis codes for departure from nucleate boiling in bundle for safety evaluation of massive hydrogen production systems // International Journal of Hydrogen Energy. 2019; 44:5650-5659.
11. Korolev D.S., Kalach A.V. Modern problems of fire safety in the conditions of development of hydrogen energy and decarbonization, Actual problems of fire safety and labor protection // Materials of section No. 9 of the XXXII International Scientific and Practical Conference. Khimki. 2022; 115-119.
12. Shebeko Yu.N. Regulatory documents regulating the issues of fire safety of hydrogen energy infrastructure facilities // Fire Safety. 2020; 4(101):36-42.
13. Shebeko Yu.N. Regulatory regulation of fire safety of hydrogen energy infrastructure facilities // Fire and Explosion Safety. 2020; 29(5):5-12.
14. Ying Zhen Li Investigation of fire and explosion hazard of alternative fuel vehicles in tunnels // Journal of Fire Safety. 2019; 110:102871:20.
15. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Pechenkin A.V. Prospects for the development of hydrogen energy in Tatarstan // Reliability and Safety of Energy. 2020; 22(6):79-91.
16. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Kulichikhin V.V. Modern trends in the development of hydrogen energy technologies // Reliability and Safety of Energy. 2019; 12(2):89-96.
17. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Razakova R.I. Electrochemical technologies for hydrogen-fueled cars // Izvestia of higher educational institutions. Problems of energy. 2021; 23(2):104-115.

18. Tomash Brestovich, Michal Pushkar, Natalia Yasminka, Marian Lazar, Roman Dobakova, Lukash Toth Analysis of rapid release of hydrogen from a metal hydride container used in the automotive industry. // Fire Safety Journal. 2020; 111:102841:9.

Authors of the publication

Rinat N. Zakirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Antonina A. Filimonova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено *13.06.2023 г.*

Отредактировано *09.08.2023 г.*

Принято *11.09.2023 г.*



ПАРОКОМПРЕССИОННАЯ СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С СОЛНЕЧНЫМ ТЕПЛОВЫМ КОЛЛЕКТОРОМ

Аль-Окби А.К.^{1,2}, Ваньков Ю.В.²

¹University of Technology, Iraq, Baghdad

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ahmedkhaleel18@yahoo.com, yvankov@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ Системы кондиционирования воздуха в Ираке потребляют более половины выработки электроэнергии. Летом, когда температура повышается, спрос на использование кондиционеров увеличивается, что приводит к постоянным перебоям в подаче электроэнергии. Потребители начинают использовать местную генерацию - дизель-генераторы, которые увеличивают загрязнение окружающей среды. ЦЕЛЬ. Тепловая энергия, поступающая от солнца, является идеальным решением для снижения потребления электроэнергии, повышения производительности кондиционеров, обеспечения непрерывности электроснабжения и снижения загрязнения окружающей среды от дизельных генераторов и электростанций, а также для экономии энергии и сокращения потребления ископаемого топлива.

МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись методы термодинамического анализа, экспериментальные методы исследования. Выполнено теоретическое и экспериментальное сравнение вариантов работы стандартной и гибридной (использующей солнечную тепловую энергию) систем кондиционирования. Определены тепловые параметры и уровень потребления электроэнергии исследуемых систем. РЕЗУЛЬТАТЫ исследования показали, что гибридная система кондиционирования воздуха, использующая солнечную тепловую энергию, эффективнее, чем традиционная парокомпрессионная система, так как увеличивает холодильный коэффициент на (38,9 – 46,3%) и снижает потребление электроэнергии на (56,89 – 66,66%). Проведена оценка положительного эффекта от внедрения разработанных систем. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование гибридных парокомпрессионных систем в климатических условиях г. Багдада приведет к существенному снижению потребления электрической энергии системами кондиционирования за счет повышения холодопроизводительности систем, что приведет к повышению надежности энергоснабжения, исключению необходимости использования местных дизель-генераторов.

Ключевые слова: гибридная энергетика, энергосбережение, солнечная энергия, системы кондиционирования, солнечный коллектор.

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств госзадания № 075-03-2023-291 от 16.01.2023 года.

Для цитирования: Аль-Окби А.К., Ваньков Ю.В. Парокомпрессионная система кондиционирования воздуха с солнечным тепловым коллектором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 101 – 114. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-101 – 114.

VAPOR COMPRESSION AIR CONDITIONING SYSTEM WITH SOLAR HEAT COLLECTOR

Al-Okbi^{1,2} A.K., Vankov² Yu.V.

¹University of Technology, Iraq, Baghdad,

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ahmedkhaleel18@yahoo.com, yvankov@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the study lies in the fact that air conditioning systems in Iraq consume more than half of the electricity generation. During the summer, when temperatures rise, the demand for air conditioning increases, resulting in constant power outages. Consumers are starting to use local generation - diesel generators, which increase environmental pollution. *THE PURPOSE.* Consider the problems thermal energy from the sun is an ideal solution for reducing electricity consumption, increasing the performance of air conditioners, ensuring continuity of power supply and reducing pollution from diesel generators and power plants, as well as saving energy and reducing the consumption of fossil fuels. *METHODS.* When solving the problem, a comparison of options for standard and (hybrid using solar thermal energy) air conditioning systems was used. In a hybrid system, thermal energy enters the system from a solar collector built behind the compressor. Thermal parameters and level of electricity consumption were calculated. *RESULTS.* The article showed that a hybrid air conditioning system using solar thermal energy is more efficient than a traditional system, as it increases the cooling coefficient by (38.9 - 46.3%) and reduces electricity consumption by (56.89 - 66.66). %. *CONCLUSION.* The use of a hybrid air conditioning system in the climate of Baghdad city with a vapor compression air conditioning system reduced the electrical energy consumption of the compressor and increased the performance of the system, which will lead to increased reliability of power supply and eliminate the need to use local diesel generators.

Keywords: hybrid energy, energy savings, solar energy, solar air conditioner, pollution reduction.

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of state task No. 075-03-2023-291 dated 01/16/2023.

For citation: Al-Okbi A.K., Vankov Yu.V. Vapor compression air conditioning system with solar heat collector. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 101-114. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-101-114.

Введение (Introduction)

Кондиционирование представляет собой процесс поддержания температуры, относительной влажности в помещении путем отвода тепла и удаления нежелательной влаги посредством технических средств для обеспечения комфортных параметров микроклимата в соответствии с требованиями [1-2].

Наиболее распространенными и широко используемыми являются парокомпрессионные холодильные системы из-за своей высокой производительности, простоты установки и обслуживания. Однако они обладают и существенным недостатком - потребляют большое количество электроэнергии [3-4].

В Ираке, а также в тропических и субтропических регионах других стран из-за высоких температур в летнее время системы кондиционирования потребляют более половины выработанной электроэнергии, что влияет на стабильность и непрерывность энергоснабжения. При отключении электроэнергии в результате нагрузки на сеть, потребители вынуждены применять местные дизель-генераторы.

Большое потребление электроэнергии приводит к потреблению большого количества топлива и, таким образом, увеличивает выбросы парниковых газов в окружающую среду [5-6].

Практическая значимость исследования заключается в том что одним из вариантов решения проблемы повышения надежности энергоснабжения является использование тепловой энергии Солнца при работе систем кондиционирования воздуха. Добавление в рабочий цикл парокомпрессионной системы кондиционирования тепловой энергии от солнечного коллектора приведет к повышению холодопроизводительности системы, уменьшению необходимой мощности электрической энергии на привод компрессора [7-10].

Целью настоящего исследования является снижение потребления электроэнергии в системах кондиционирования воздуха при одновременном повышении их производительности, путем использования тепловой энергии солнечного излучения.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросам использования энергии солнца для систем охлаждения посвящено большое количество работ, что говорит об актуальности данной темы.

В статье [11] *Li Huang* с соавторами, представили исследование комбинированной системы солнечного отопления и охлаждения с двумя воздушными тепловыми насосами. Система установлена в г. Нинбо, Китай, находится в эксплуатации с 2018 года. Состоит из сорока вакуумных трубчатых модулей площадью 120 м², абсорбционного охладителя на водном растворе *LiBr* холодопроизводительностью 35 кВт. Установлено, что производительность системы увеличилась более чем на 40%, после того, как солнечная система охлаждения и отопления была объединена с тепловыми насосами, а средний холодильный коэффициент (*COP*) для абсорбционного охладителя колебался между 0,68 до 0,76. Годовая экономия электроэнергии составила 41,1% от общего потребления электроэнергии на охлаждение и отопление зданий.

S.M. Xu с соавторами [12] представили исследование новой абсорбционной системы охлаждения, работающей от солнечной энергии, с технологией накопления химической энергии в материале *LiBr-H₂O* и последующего ее преобразования в тепловую энергию путем абсорбционного охлаждения. Результаты анализа показали, что холодильный коэффициент установки составляет 0,753 при охлаждении воздухом и 0,756 при охлаждении водой, а удельная плотность накопления энергии составила 368,5 МДж/м³.

Mehmet Bilgili [13] провел исследование солнечной электрической парокомпрессионной холодильной системы (*SE-VCR*) в городе Адана (Турция). Система состоит из фотоэлектрической солнечной панели, электрического аккумулятора, двигателя постоянного тока, инвертора. Испытания проводились в мае, июне, июле, августе и сентябре. Максимальная потребляемая мощность компрессора 2,53 кВт была получена в 15:00 23 августа. Площадь поверхности фотоэлектрической панели составляла 31,26 квадратных метра.

Nwasuka N. C. с соавторами [14] провели сравнение солнечной гибридной системы кондиционирования воздуха и обычной системы кондиционирования воздуха с точки зрения получения низких температур в кондиционируемом помещении, результаты показали, что комнатные температуры полученные с солнечной гибридной системой кондиционирования воздуха ниже, чем температуры достигнутые обычной системой, что доказывает большую эффективность гибридной системы.

Anita Preisler с соавторами [15] исследовали систему испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии и сравнили ее с традиционной системой с точки зрения экономии энергии. Результаты показали, что система испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии экономит 73,9% электрической энергии зимой и 18,2% летом по сравнению с традиционной системой. Авторы отметили, что эту систему можно использовать в южной Европе, где уровень энергосбережения может достичь 50% потребления традиционной системы.

Abdenour Bouraba с соавторами [16] представили теоретическое исследование, включающее сравнение традиционного кондиционера воздуха и кондиционера, работающего с солнечным тепловым коллектором, содержащим теплообменник в виде змеевика. Критериями сравнения были холодильный коэффициент, степень сжатия, площадь поверхности конденсатора, а также температура теплоносителя, выходящего из змеевика. Система исследовалась с разными хладагентами (*R-1234ze (E)*, *R-134a* и *R-410A*). Результаты показали, что хладагент *R-1234ze (E)* имеет результаты лучше, чем хладагенты *R-134a* и *R-410A* по температурам на выходе из компрессора.

M. Khalaji Assadi в работе [17] использовал тепловой коллектор, состоящий из U-образной системы солнечных вакуумных трубок и объединил его с кондиционерами воздуха различной мощности от 2,93 кВт до 7,034 кВт с целью снижения потребления электроэнергии путем замены компрессора другим компрессором, работающем на постоянном токе. Анализ тепловых характеристик проводился с использованием программы *ANSYS-FLUENT*. Результаты показали, что сочетание солнечного коллектора системой кондиционирования воздуха с компрессором постоянного тока позволяет снизить потребление энергии на 45%.

Материалы и методы (Materials and methods)

Схема гибридной системы охлаждения: Традиционная система реализующая парокомпрессионный холодильный цикл состоит из испарителя, компрессора, конденсатора и расширительного клапана. Компрессор является основной частью системы и потребляет большое количество электроэнергии для создания в системе давления, необходимого для перемещения хладагента по магистрали. Предлагаемая система гибридного холодильного цикла отличается от традиционной системы добавлением в систему солнечного теплового коллектора в части, следующей за

компрессором как показано на рисунке 1. Коллектор поглощает солнечную радиацию, энергия которой идет на нагрев теплоносителя (воды) в баке, который в свою очередь посредством змеевикового теплообменника повышает температуру и давление хладагента поступающего в конденсатор.

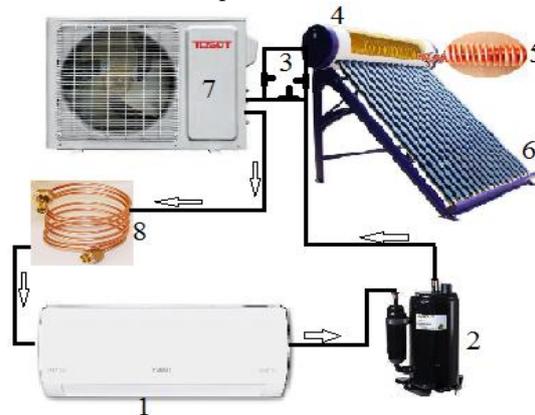


Рис. 1. Принципиальная схема компонентов гибридной системы кондиционирования воздуха 1 – Испаритель прямого расширения; 2 – Компрессор; 3 – Запорная арматура; 4 – Резервуар для горячей воды; 5 – Змеевик; 6 – Вакуумный солнечный коллектор; 7 – Конденсатор; 8 – Капиллярная трубка

Fig. 1. Schematic diagram of the components of the hybrid air conditioning system 1 – Direct expansion evaporator; 2 – Compressor; 3 – Shut-off valves; 4 – Hot water tank; 5 – Heat exchanger coil; 6 – Vacuum tube solar collector; 7 – condenser; 8 – Capillary tube

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

При расчете параметров рабочего тела в характерных точках цикла (рис.2) давления и температуры принимались по термодинамическим таблицам для хладагента R-410a. Тепловые параметры рассчитывались по следующим уравнениям:

$$Q_o = mr^\circ (h1 - h5) \quad (1)$$

$$lk = mr^\circ (h2 - h1) \quad (2)$$

$$Q_{c.k.} = mr^\circ (h3 - h2) \quad (3)$$

$$Q = mr^\circ (h3 - h4) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{lk} \quad (5)$$

$$N_{эл} = I * V * PF \quad (6)$$

$$EER = Q_o / N_{эл} \quad (7)$$

$$SEER = EER / 0.9 \quad (8)$$

где h – энтальпии в соответствующих точках цикла (кДж/кг);

mr – массовый расход (кг/с);

Q_o – холодопроизводительность (кВт);

Q – мощность конденсатора (кВт);

$Q_{c.k.}$ – тепловая энергия солнца добавляемая в систему (кВт);

lk – работа компрессора (кВт);

ε – холодильный коэффициент;

$N_{эл}$ – потребляемая мощность компрессора (кВт);

I – Тока (А), V – Напряжение (В), PF – Коэффициент мощности;

EER – коэффициент энергоэффективности;

$SEER$ – сезонный коэффициент энергоэффективности.

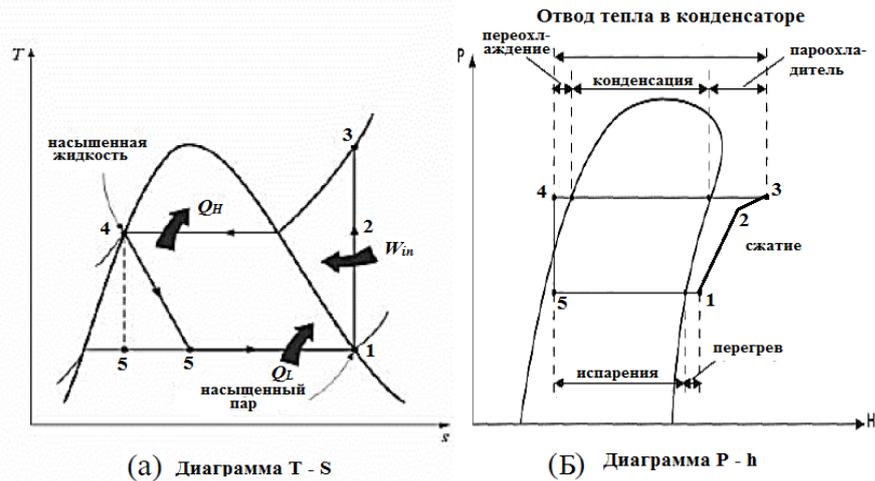


Рис. 2. T-s и p-h диаграмма парокompрессионного холодильного цикла
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Fig. 2. T-s and p-h diagram of vapor compression refrigeration cycle
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Описание работы системы: Гибридная система кондиционирования отличается от традиционной системы, добавлением элементов, позволяющих использовать солнечную тепловую энергию с целью энергосбережения (рис. 3). Основные компоненты системы гибридного цикла охлаждения: компрессор, конденсатор, расширительный клапан, испаритель и солнечный коллектор с запорной арматурой. Клапан и запорная арматура позволяют регулировать цикл охлаждения и изучать работу системы с солнечным коллектором или без него.

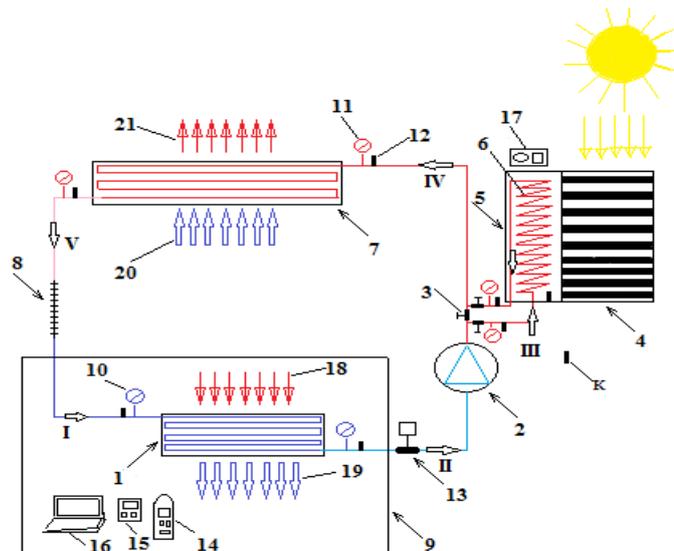


Рис. 3. Принципиальная схема солнечной системы охлаждения. I – V Направление движения теплоносителя в системе; 1 – Испаритель; 2 – компрессор; 3 – запорная арматура; 4 – вакуумный солнечный коллектор; 5 – резервуар горячей воды; 6 – змеевик; 7 – конденсатор с воздушным охлаждением; 8 – капиллярная трубка; 9 – кондиционируемое помещение; 10 – манометр низкого давления; 11 – манометр высокого давления; 12 – датчики температуры; 13 – турбинный расходомер; 14 – цифровой измеритель мощности; 15 – регистратор данных; 16 – персональный компьютер; 17 – цифровой фотометр; 18 – теплый воздух из помещения; 19 – охлажденный воздух; 20 – всасываемый наружный воздух; 21 – выдуваемый подогретый воздух
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Fig. 3. Schematic diagram of a solar cooling system. I – V Direction of coolant movement in the system; 1 – Evaporator; 2 – Compressor; 3 – Shut-off valves; 4 – Vacuum tube solar collector; 5 – Hot water storage tank; 6 – Heat exchanger coil; 7 – Air-cooled condenser; 8 – Capillary tube; 9 – Air-conditioned room; 10 – Low pressure gauge; 11 – High pressure gauge; 12 – Temperature sensors; 13 – Turbine flow meter; 14 – Digital power meter; 15 – Data logger; 16 – Personal computer; 17 – Digital photometer; 18 – Warm air from the room; 19 – Cooled air; 20 – Sucked in outside air; 21 – Blown out heated air
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Система состоит из:

1. Помещения для проведения испытаний объемом 30 м³ (4 х 2,5 х 3 м).
2. Кондиционера сплит-системы «Tosot» холодопроизводительностью 7,034 кВт.
3. Вакуумного солнечного теплового коллектора трубчатого типа.
4. Комплекта измерительных, датчиков и регистратора данных (ноутбук).

На рисунке 4 показана фотография кондиционируемого помещения с внутренним блоком. Испарителем является теплообменник из медных труб, с алюминиевыми ребрами с медным покрытием, к которому подключены измерительные приборы, датчики и регистратор данных с ноутбуком.

На рисунке 5 представлена фотография наружного блока кондиционера, соединенного с солнечным тепловым коллектором. Наружный блок состоит из медного теплообменника с воздушным охлаждением и алюминиевых ребер с медным покрытием. Магистраль между внутренней и внешней частями системы выполнена из медных трубок. Солнечный тепловой коллектор площадью 1,69 м² установлен на крыше здания. Змеевик теплообменника гибридного холодильного цикла установлен за компрессором. Он нагревает хладагент, выходящий из компрессора, горячей водой, находящейся внутри теплоизолированного бака солнечного теплового коллектора.



Рис. 4. Фотография кондиционируемого помещения с внутренним блоком

Fig. 4. Photo of an air-conditioned room with an indoor unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author



Рис. 5. Наружный блок и солнечный коллектор

Fig. 5. Outdoor unit and solar collector

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Компрессор производства ZHUHAI LANDA, используемый в традиционном холодильном цикле имел холодопроизводительность 7,034 кВт. С целью экономии электрической энергии за счет использования солнечной энергии во время испытаний он был заменен компрессором меньшей холодопроизводительности 4,44 кВт производства HIGHLY. Запорная арматура, установленная после компрессора, позволяют исследовать характеристики работы системы в традиционном парокомпрессионном холодильном цикле и в режиме работы гибридной системы с добавлением солнечного теплового коллектора.

В процессе проведения исследований солнечный тепловой коллектор имел ориентацию на юг с углом наклона 45 градусов. Технические характеристики

испытательного стенда приведены в таблице 1.

При проведении экспериментов на испытательном стенде использовались поверенные высокоточные измерительные приборы и датчики: восемь термодатчиков К-типа установлены, как показано на рис.2; регистратор данных *HUATO S220 -T8* (записывает данные в виде таблицы *Microsoft Excel* на ноутбук в заданный промежуток времени); цифровой измеритель мощности *UT233* для измерения напряжения, тока и потребляемой мощности; шесть манометров типа *Borden (BTC)*; анемометр *MS6252B* для измерения расхода воздуха через испаритель и конденсатор, температуры окружающей среды и относительной влажности; расходомер *CM-15-63* для измерения расхода хладагента в системе; цифровой фотометр *VICTOR 1010D* для измерения характеристик излучения, падающего на солнечный коллектор. При монтаже стенда применялся вакуумный насос, после проверки на герметичность система была заправлена хладагентом *R-410A* массой 1800 г.

Таблица 1
Table 1

Технические характеристики испытательного стенда
Technical characteristics of the test bench

| |
|--|
| Кондиционер: Тип (<i>Tosot</i>), модель (<i>Moon Series, TS-H246OZM3</i>), компрессор тип (роторный), источник питания (220 – 240 В/ 1 Ф/ 50 Гц), холодопроизводительность (7,034 кВт/ч), Ток (10 А), мощность (2040 – 2180 Вт), хладагент тип (<i>R-410A</i>), масса (1800г), тип расширения (капиллярная трубка) |
| Конденсатор Тип (медные трубы, алюминиевые плоские ребра), длина трубки (87 см), количество трубок (60) |
| Испаритель Тип (медные трубы, алюминиевые плоские ребра), длина трубки (86 см), количество трубок (40), расход воздуха (1250 м ³ /ч) |
| Резервуар Диаметр (42см), длина (139см), емкость накопителя (193 л) |
| Солнечный коллектор Количество трубок (18), внутренний диаметр (3,7 см), Внешний диаметр (4,7 см), расстояние между трубками (0,5 см), длина трубки (150 см), рабочая длина трубки (137 см) |
| Змеевик внутри резервуара Материал (медь), вид (спираль), диаметр трубки (½ дюйма), диаметр спирали (14 см), количество витков (35) |
| Запорная арматура Количество (3), тип (Задвижки, медные), диаметр (½ дюйма) |
| Магистраль Трубка от компрессора к резервуару - длина (115 см), диаметр (½ дюйма), Трубка от резервуара к конденсатору - длина (120 см), диаметр (½ дюйма), Трубка от капиллярной трубки к испарителю - длина (480 см), диаметр (¼ дюйма), Трубка от испарителя к компрессору - длина (480 см), диаметр (5/8 дюйма) |
| Технические характеристики альтернативного компрессора Модель (<i>ASH184TV</i>), Водоизмещение (18,4 см ³ /обо), Холодопроизводительность (4440w), Конденсатор (40Hf/450v), Высота (293,5mm), Условия испытаний (<i>ASHRAE/T</i>) [18] |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

После монтажа системы проведены полевые испытания в г. Багдаде. Измеренные данные были записаны для последующего анализа с использованием программы *CoolPack*. Программа позволяет проводить расчет необходимых тепловых параметров и проводить сравнение разных режимов работы стенда с точки зрения производительности и энергопотребления.

Результаты (Results)

Исследования производительности и энергопотребления разработанной системы проводились в четырех режимах – с солнечным тепловым коллектором (два режима) и без него (два режима).

Первый режим представляет собой традиционную систему компрессионного холодильного цикла с компрессором холодопроизводительности 7,034 кВт; второй режим представляет собой гибридную компрессионную холодильную систему с компрессором холодопроизводительности 7,034 кВт; третий режим представляет собой традиционную систему компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора холодопроизводительностью 4,44 кВт; четвертый режим представляет собой систему гибридного компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора холодопроизводительностью 4,44 кВт.

Сравнение системы охлаждения с вакуумным солнечным коллектором и без него

После исследования работы системы в четырех режимах с солнечным тепловым коллектором и без него с компрессором 7,034 кВт и 4,44 кВт, были получены данные представленные на рисунках 6-11.

На рисунке 6 представлена потребляемая мощность компрессора. Из него следует, что потребляемая компрессором энергия в первом и втором режимах, выше, чем в третьем и четвертом, причина в том, что компрессор, используемый в цикле, имеет большие габариты по сравнению с третьим и четвертым режимами и затрачивает большее количество энергии, для выполнения необходимой работы в цикле. В третьем и четвертом режимах он потребляет меньше энергии, поскольку используемый компрессор имеет небольшие размеры, а добавленная в цикл тепловая энергия позволяет снизить работу компрессора на втором и четвертом режимах.

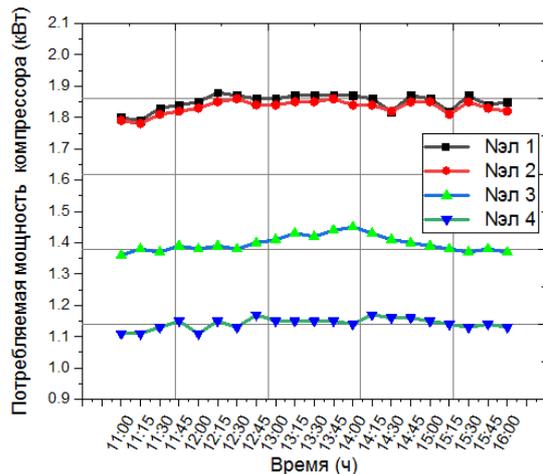


Рис. 6. Потребляемая мощность компрессора

Fig. 6. Compressor power consumption

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 7 показана мощность конденсатора в период максимума нагрузки с 11 до 16 часов дня. Видно, что мощность, отводимая от конденсатора в первом и втором режимах выше, чем в третьем и четвертом, причина в том, что размер компрессора был больше, но тепло, поступающее в систему через солнечный тепловой коллектор на втором и четвертом режимах приводило к увеличению температуры и давления газообразного хладагента перед его поступлением в конденсатор, что способствовало выделению большего количества тепла.

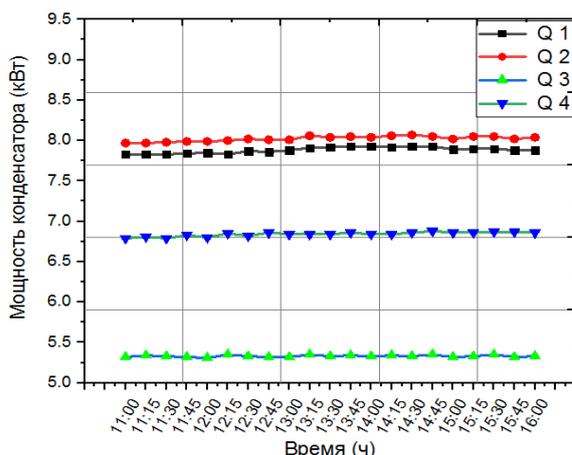


Рис. 7. Мощность конденсатора во время работы

Fig. 7. Condenser power during operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 8 Холодопроизводительность испарителя видно, что холодопроизводительность системы с солнечным тепловым коллектором в первом и втором режимах выше, чем в третьем и четвертом режимах. Причина в больших размерах компрессора, но тепло, добавляемое солнечным коллектором во втором и

четвертом режиме, усиливает процесс конденсации в конденсаторе, что повышает производительность испарителя.

На рисунке 9 показано изменение холодильных коэффициентов для четырех режимов с течением времени. Из графика видно, что холодильный коэффициент в четвертом режиме выше, чем в первом, втором и третьем режимах за счет тепла, добавляемого через солнечный тепловой коллектор, что привело к увеличению холодопроизводительности системы, что в свою очередь увеличило холодильный коэффициент.

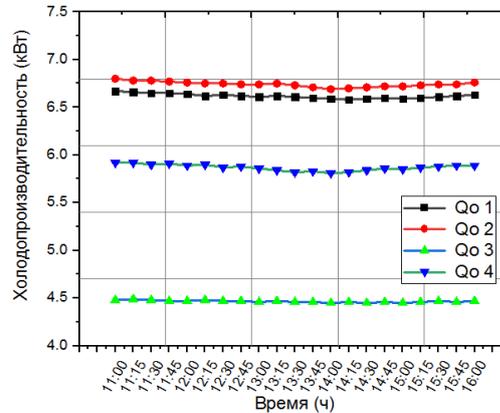


Рис. 8. Холодопроизводительность испарителя с течением времени

Fig. 8. Evaporator cooling capacity over time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

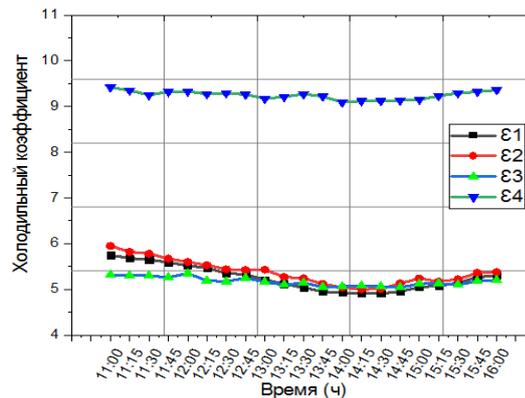


Рис. 9. Холодильный коэффициент в период эксплуатации

Fig. 9. Refrigeration coefficient during operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунках 10 и 11 видно, что коэффициент энергоэффективности и сезонный коэффициент энергоэффективности системы во втором и четвертом режиме выше, чем в первом и третьем. Причина – улучшение холодопроизводительности во втором и четвертом режиме в результате применения солнечного теплового коллектора.

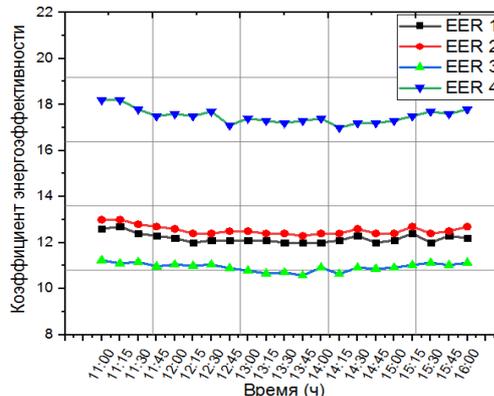


Рис. 10. Коэффициент энергоэффективности за период эксплуатации

Fig. 10. Energy efficiency coefficient for the period of operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

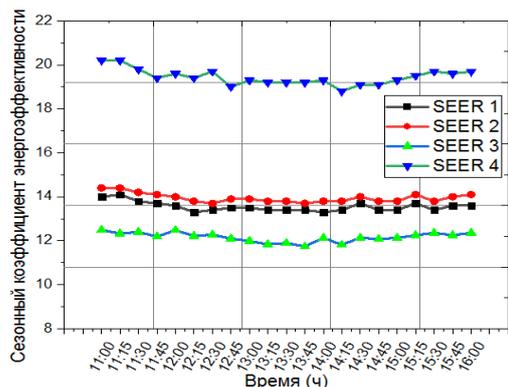


Рис. 11. Сезонный коэффициент энергоэффективности за период эксплуатации

Fig. 11. Seasonal energy efficiency coefficient for the period of operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 12 представлено количество тепловой энергии добавляемой в систему. Количество тепловой энергии, поглощаемой системой охлаждения от теплообменника солнечного теплового коллектора в четвертом режиме больше, чем во втором. Это объясняется тем, что уменьшение мощности компрессора привело к уменьшению объемного расхода, давления и температуры хладагента, что позволило поглощать большее количество тепловой энергии.

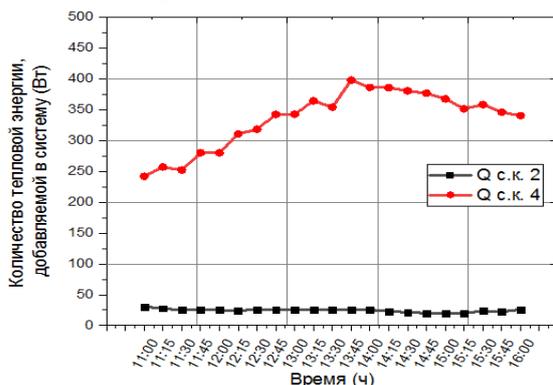


Рис. 12. Количество тепловой энергии, добавляемой в систему

Fig. 12. The amount of thermal energy added to the system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Оценка энергосбережения солнечной системы охлаждения в ночное время.

Солнечная тепловая гибридная система кондиционирования воздуха нуждается в добавлении источника тепловой энергии в холодильный цикл в части, следующей за компрессором, что, в свою очередь, помогает снизить потребление электроэнергии и улучшить производительность системы охлаждения во время ее работы. Как показано, источником тепловой энергии, интегрированным с системой кондиционирования, является солнечный тепловой коллектор с вакуумными трубками, которые поглощают тепло солнечного света и преобразуют его в тепловую энергию горячей воды, находящейся в тепловом аккумуляторе.

Когда летом в шесть утра восходит Солнце, тепловой коллектор начинает собирать солнечную тепловую энергию и хранить ее в резервуаре с водой, а система охлаждения снабжается тепловой энергией до шести часов вечера. После захода Солнца тепловой коллектор начинает постепенно терять запасенную тепловую энергию. Для сохранения эффективности работы гибридной системы в ночное время определен размер теплового аккумулятора и необходимое количество воды. Количество запасенного тепла в аккумуляторе оценивалась по количеству тепловой энергии, поступающей в гибридную систему кондиционирования воздуха, с течением времени.

На рисунке 13 представлена интенсивность солнечной радиации, падающей на солнечный тепловой коллектор в период испытаний.

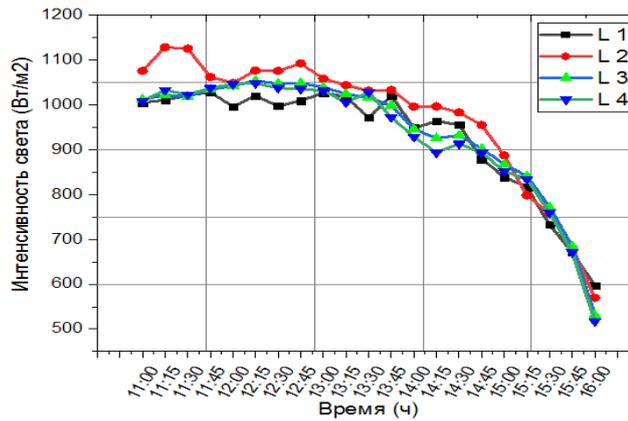


Рис. 13. количество солнечной радиации, падающей на солнечный тепловой коллектор за период испытаний

Fig. 13. amount of solar radiation falling on the solar thermal collector during the test period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 14 показана температура воды в термобаке в период испытаний для второго и четвертого режимов.

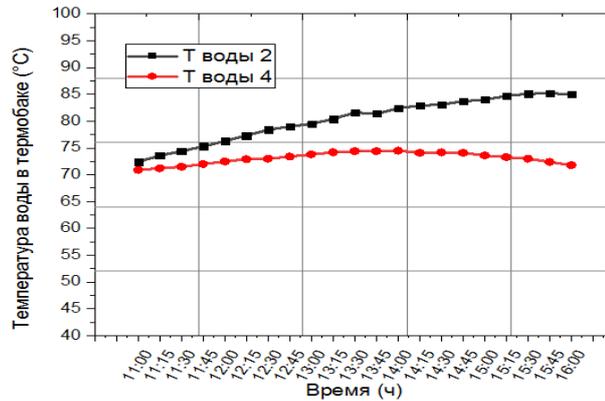


Рис. 14 Температура воды в термобаке в период испытаний

Fig. 14 Water temperature in the thermal tank during the test period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Тепловая энергия, подаваемая в гибридную систему кондиционирования воздуха, рассчитывалась по уравнению (3).

Чтобы определить необходимый объем воды в резервуаре и количество тепловой энергии, добавляемую в систему от солнечного коллектора воспользуемся уравнениями (9) и (10).

$$Q_{c.k.} = m_r \cdot (h_3 - h_2) = m_w \cdot c_{p_w} \cdot (t_2 - t_1) \quad (9)$$

$$m_w = \frac{V_w \cdot \rho}{T} \quad (10)$$

где: $Q_{c.k.}$ – тепловая энергия солнца добавляемая в систему (кВт), m_w – массовый расход воды (кг/с), c_{p_w} – удельная теплоемкость воды 4,179 (кДж/кг·°C), V_w – объем воды в баке (m^3), ρ – плотность воды 1000 (кг/ m^3), t_1 – минимальная температура, которую должна иметь вода в тепловом аккумуляторе рассчитывается как сумма температуры хладагента на выходе из компрессора плюс пять градусов, для обеспечения процесса добавления тепловой энергии в систему (°C), t_2 – максимальная температура, достигаемая водой (°C), T – время.

По уравнению (11) была рассчитана максимальная теплоемкость, которую необходимо подвести в систему в течение периода эксплуатации при отсутствии солнца в ночное время, а также максимально необходимый объем теплоаккумулирования и объем воды в баке.

$$V_w = Q_{c.k.} \cdot \frac{12 \cdot 3600}{\rho \cdot c_{p_w} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (11)$$

где - 12 в числителе формулы (11) часы работы системы в отсутствии солнечного излучения, остальные обозначения те же.

В таблице 2 представлены результаты расчета тепловой нагрузки, необходимой для подачи от термобака и теплоаккумулирующей емкости во второй половине суток (ночи).

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета тепловой нагрузки, необходимой для подачи от термобака, и объем теплоаккумулирующей емкости

Calculation results of the heat load required for supply from the thermal tank and heat capacity

| Тип режима работы | Рабочие часы | $Q_{с.к}$ кВт | t_2 °C | t_1 °C | V_w Литр |
|-------------------|--------------|---------------|----------|----------|------------|
| Второй режим | 13:30 | 0,0254 | 81.6 | 58.8 | 11.5 |
| | 13:45 | 0,0253 | 81.4 | 61.2 | 13.0 |
| | 14:00 | 0,0254 | 82.4 | 61.1 | 12.3 |
| Четвертый режим | 13:30 | 0,3539 | 74.4 | 59.4 | 244 |
| | 13:45 | 0,3976 | 74.4 | 59.6 | 278 |
| | 14:00 | 0,3860 | 74.5 | 60.1 | 277 |

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Количество воды, необходимое в баке для сохранения тепловой энергии от солнечного коллектора и подачи ее в систему во второй половине суток, имеет обратно-пропорциональную зависимость от температуры воды в баке. По мере повышения температуры в баке количество воды, необходимое для нагрева, уменьшается, и наоборот. Соответственно, для определения максимального объема воды, необходимого для хранения в резервуаре, принимается наименьшая температура, достигаемая водой в резервуаре при максимальной потребляемой мощности.

Например для температуры воды t_2 65, 81, 95 °C:

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (65 - 60,1)) = 815 \text{ л,}$$

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (81 - 60,1)) = 190 \text{ л,}$$

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (95 - 60,1)) = 114 \text{ л.}$$

Эти расчеты показывают, что солнечный тепловой коллектор способен обеспечить теплом гибридную систему кондиционирования при максимальной потребности в тепловой энергии в отсутствие излучения (после заката солнца), если температура воды достигнет 81 °C и выше.

Заключение (Conclusions)

Проведены эксперименты на стенде с гибридной системой кондиционирования воздуха в климате города Багдада. Выполнено сравнение ее параметров с парокомпрессионной системой кондиционирования воздуха.

Синтез солнечного теплового коллектора с парокомпрессионной системой кондиционирования воздуха снизил потребление электрической энергии компрессором и повысило производительность системы.

Определены термодинамические параметры рабочих тел системы в характерных точках цикла для четырех режимов работы системы:

1. традиционного компрессионного холодильного цикла с компрессором мощностью 7,034 кВт;
2. гибридного компрессионного холодильного цикла с компрессором мощностью 7,034 кВт;
3. традиционного компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора до 4,44 кВт;
4. гибридного компрессионного холодильного цикла, с уменьшенной мощностью компрессора до 4,44 кВт.

Результаты анализа показали, что потребление электрической энергии гибридной системы кондиционирования снизилось на 64%, а холодильный коэффициент ϵ составил 9,09 вместо исходного 4,93.

Литература

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.

2. Y. V. Vankov, A. K. Al-Okbi, and M. H. Hasanen, "Solar hybrid air conditioning system to use in Iraq to save energy," In E3S Web of Conferences, vol. 124, p. 01024, EDP Sciences, 2019.
3. Kumar MA, Patel D. Performance assessment and thermodynamic analysis of a hybrid solar air conditioning system. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;46:5632-8.
4. Kurniawan Y, Berkah FT, SU MT. Development of hot water storage in hybrid-solar thermal air conditioning system. InJournal of Physics: Conference Series 2020 Apr 1 (Vol. 1511, No. 1, p. 012123). IOP Publishing.
5. <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html> (дата обращения ноябрь 2023).
6. <https://www.statista.com/statistics/1302597/iraq-emissions-intensity-from-electricity-generation/> (дата обращения ноябрь 2023).
7. Munaaim, M. Arkam C., Karam M. Al-Obaidi, and M. Azizul Abd Rahim. "Performance Comparison of Solar Assisted and Inverter Air-Conditioning Systems in Malaysia." Journal of Design and Built Environment (2017): 53-61.
8. Al-Okbi A, Vankov Y, Kadhim H. Improving performance of direct expansion air conditioning systems while reducing electricity consumption through using hybrid energy. InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 289, p. 01014). EDP Sciences.
9. Abdelgaied M, Kabeel AE, Zakaria Y. Performance improvement of desiccant air conditioner coupled with humidification-dehumidification desalination unit using solar reheating of regeneration air. Energy Conversion and Management. 2019 Oct 15;198:111808.
10. Al-Okbi A, Vankov Y, Hussain HM. A hybrid air conditioning system using solar energy to save electrical energy with improving performance. InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 288, p. 01066). EDP Sciences.
11. Huang L, Zheng R, Piontek U. Installation and operation of a solar cooling and heating system incorporated with air-source heat pumps. Energies. 2019 Mar 14;12(6):996.
12. Xu, S. M., X. D. Huang, and R. Du. "An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology." Solar energy 85, no. 9 (2011): 1794-1804.
13. Bilgili, Mehmet. "Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system." Solar Energy 85, no. 11 (2011): 2720-2731.
14. Nwasuka, Nnamdi Cyprian, Nduka Nwankwojike, and Uchechukwu Nwaiwu. "Performance Evaluation of a Solar Hybrid Air-Conditioner." (2021).
15. Preisler, Anita, and Markus Brychta. "High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems." Energy Procedia 30 (2012): 668-675.
16. Bouraba, Abdenour, Mohamed Saighi, Hind Saidani-Scott, and Abderrahmane Hamidat. "Cooling mechanism of a solar assisted air conditioner: An investigation based on pressure-enthalpy chart." international journal of refrigeration 80 (2017): 274-291.
17. Assadi, M. Khalaji, S. I. Gilani, and TC Jun Yen. "DESIGN a solar hybrid air conditioning compressor system." In MATEC Web of Conferences, vol. 38, p. 02001. EDP Sciences, 2016.
18. <https://hitachi-compressors.com/highly-h-series-ASH184TV-rotary-compressors.php> (дата обращения ноябрь 2023).

Авторы публикации

Аль-Окби Ахмед Кхалиль – Аспирант, Казанского государственного энергетического университета. Ассистент преподавателя в University of Technology, Iraq, Baghdad.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанского государственного энергетического университета.

References

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.
2. Y. V. Vankov, A. K. Al-Okbi, and M. H. Hasanen, "Solar hybrid air conditioning system to use in Iraq to save energy," In E3S Web of Conferences, vol. 124, p. 01024, EDP Sciences, 2019.
3. Kumar MA, Patel D. Performance assessment and thermodynamic analysis of a hybrid solar air conditioning system. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;46:5632-8.
4. Kurniawan Y, Berkah FT, SU MT. Development of hot water storage in hybrid-solar thermal air conditioning system. InJournal of Physics: Conference Series 2020 Apr 1 (Vol. 1511, No. 1, p. 012123). IOP Publishing.

5. <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html>
6. <https://www.statista.com/statistics/1302597/iraq-emissions-intensity-from-electricity-generation/>
7. Munaaim, M. Arkam C., Karam M. Al-Obaidi, and M. Azizul Abd Rahim. "Performance Comparison of Solar Assisted and Inverter Air-Conditioning Systems in Malaysia." *Journal of Design and Built Environment* (2017): 53-61.
8. Al-Okbi A, Vankov Y, Kadhim H. Improving performance of direct expansion air conditioning systems while reducing electricity consumption through using hybrid energy. *InE3S Web of Conferences* 2021 (Vol. 289, p. 01014). EDP Sciences.
9. Abdelgaied M, Kabeel AE, Zakaria Y. Performance improvement of desiccant air conditioner coupled with humidification-dehumidification desalination unit using solar reheating of regeneration air. *Energy Conversion and Management*. 2019 Oct 15;198:111808.
10. Al-Okbi A, Vankov Y, Hussain HM. A hybrid air conditioning system using solar energy to save electrical energy with improving performance. *InE3S Web of Conferences* 2021 (Vol. 288, p. 01066). EDP Sciences.
11. Huang L, Zheng R, Piontek U. Installation and operation of a solar cooling and heating system incorporated with air-source heat pumps. *Energies*. 2019 Mar 14;12(6):996.
12. Xu, S. M., X. D. Huang, and R. Du. "An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology." *Solar energy* 85, no. 9 (2011): 1794-1804.
13. Bilgili, Mehmet. "Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system." *Solar Energy* 85, no. 11 (2011): 2720-2731.
14. Nwasuka, Nnamdi Cyprian, Nduka Nwankwojike, and Uchechukwu Nwaiwu. "Performance Evaluation of a Solar Hybrid Air-Conditioner." (2021).
15. Preisler, Anita, and Markus Brychta. "High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems." *Energy Procedia* 30 (2012): 668-675.
16. Bouraba, Abdenour, Mohamed Saighi, Hind Saidani-Scott, and Abderrahmane Hamidat. "Cooling mechanism of a solar assisted air conditioner: An investigation based on pressure-enthalpy chart." *international journal of refrigeration* 80 (2017): 274-291.
17. Assadi, M. Khalaji, S. I. Gilani, and TC Jun Yen. "DESIGN a solar hybrid air conditioning compressor system." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 38, p. 02001. EDP Sciences, 2016.
18. <https://hitachi-compressors.com/highly-h-series-ASH184TV-rotary-compressors.php>

Authors of the publication

Ahmed K. Al-Okbi - University of Technology, Iraq, Baghdad, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **26.10.2023 г.**

Отредактировано **21.11.2023 г.**

Принято **22.11.2023 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 66.045

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПИНЧ-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЁТОМ ИХ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Агапов ¹Д.С., Картошкин ¹А.П., Калюттик ²А.А., Кондрашов ²А.В.

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, г. Пушкин, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

different76@list.ru¹

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Проектирование сети теплообменных аппаратов для регенерации теплоты и интеграции тепловых процессов в целом является весьма актуальной задачей энергосбережения. Такой мощный и широко применяемый инструмент для синтеза и дизайна сети теплообменных аппаратов как пинч-технология обладает рядом ограничений. Настоящее исследование направлено на расширение возможностей пинч-технологии. Пинч-технология способна эффективно работать только со стационарными потоками теплоты. В практике встречаются циклические и периодические процессы, что ограничивает возможности применения пинч-технологии. Это и явилось причиной настоящего исследования с целью расширения границ применения пинч-технологии. **ЦЕЛЬ.** Совершенствование метода пинч-технологии для расширения возможностей интеграции циклических и периодических тепловых процессов, а также учёта их локализации. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи произведён анализ принципа определения теплообменных связей, предложены алгоритмы их выбора и синтезированы новые критерии оптимизации. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложен критерий структурного совершенства системы, являющийся отношением регенерируемой в системе теплоты к её теоретически возможному значению. Теоретическими результатами являются предложенные критерий структурного совершенства и обобщённый показатель структурно-параметрического совершенства системы. Практическим результатом исследования явилось предложенное техническое устройство для преобразования нестационарного потока в ряд стационарных потоков. Предложенное устройство преобразования расширяет возможности пинч-технологии, а введённые критерии позволяют вести синтез или дизайн системы, опираясь на новые целевые показатели, такие как степень интеграции тепловых потоков. Также практическим результатом данного научного исследования является программа для синтеза теплообменных сетей. Созданная в процессе работы программа позволяет вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Благодаря проведённым исследованиям удалось усовершенствовать такой мощный инструмент как пинч-технология и существенно расширить его возможности. Предложено совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов и учёта их локализации. Для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов предложено техническое устройство, позволяющее преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных, а для учёта локализации тепловых потоков предложен программный продукт, позволяющий вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Кроме того, введены два показателя, характеризующие структурное и структурно-параметрическое совершенство системы.

Ключевые слова: Пинч-технология; интеграция тепловых процессов; теплота; критерий структурного совершенства; теплообменный аппарат.

Для цитирования: Агапов Д.С., Картошкин А.П., Калютик А.А., Кондрашов А.В. Совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов с учётом их локализации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 115 – 125. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115 – 125.

IMPROVEMENT OF PINCH TECHNOLOGY FOR THE POSSIBILITY OF INTEGRATION OF NON-STATIONARY THERMAL PROCESSES, TAKEN INTO ACCOUNT OF THEIR LOCALIZATION

Agapov ¹D.S., Kartoshkin ¹A.P., Kalutik ²A.A. Kondrashov² A.G.

¹St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

different76@list.ru

Abstract: *RELEVANCE.* Designing a network of heat exchangers for heat recovery and integration of thermal processes in general is a very urgent task of energy saving. Such a powerful and widely used tool for the synthesis and design of a network of heat exchangers as pinch technology has a number of limitations, and this study is aimed at expanding its capabilities. Pinch technology can only work effectively with stationary heat flows. In practice, cyclic and periodic processes are encountered, which limits the possibilities of using pinch technology. This was the reason for this study with the aim of expanding the boundaries of application of pinch technology. *THE PURPOSE.* Improving the pinch technology method to expand the possibilities for integrating cyclic and periodic thermal processes, as well as taking into account their localization. *METHODS.* When solving the problem, the principle of determining heat exchange connections was analyzed, other algorithms for their selection were proposed, and new optimization criteria were synthesized. *RESULTS.* A criterion for the structural perfection of a system is proposed, which is the ratio of the heat regenerated in the system to its theoretically possible value. The theoretical results are the proposed criterion of structural perfection and a generalized indicator of the structural-parametric perfection of the system. The practical result of the study was the proposed technical device for converting an unsteady flow into a series of stationary flows. Also, the practical result of this scientific research is a program for the synthesis of heat exchange networks. The proposed conversion device expands the capabilities of pinch technology, and the introduced criteria will make it possible to synthesize or design a system based on new target indicators. The program created during the work allows for the synthesis of a heat exchange network in automatic and semi-automatic modes. *CONCLUSION.* Thanks to the research carried out, it was possible to improve such a powerful tool as pinch technology and significantly expand its capabilities. An improvement of pinch technology has been proposed to enable the integration of non-stationary thermal processes and take into account their localization. To enable the integration of non-stationary thermal processes, a technical device has been proposed that allows converting a non-stationary flow into several stationary ones, and to take into account the localization of heat flows, a software product has been proposed that allows for the synthesis of a heat exchange network in automatic and semi-automatic modes. In addition, two indicators have been introduced that characterize the structural and structural-parametric perfection of the system.

Keywords: Pinch technology; integration of thermal processes; heat; criterion of structural perfection; heat exchanger.

For citation: Agapov D.S., Kartoshkin A.P., Kalutik A.A. Kondrashov A.G. Improvement of pinch technology for the possibility of integration of non-stationary thermal processes, taken into account of their localization. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 115-125. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-115-125.

Введение (Introduction)

Эффективность функционирования технических систем (механических,

гидравлических, тепловых и других) зависит от их совершенства, характеризующегося определёнными целевыми показателями, например, КПД, на которые в свою очередь влияют как структура самой системы, так и её рабочие параметры [1].

Применительно к теплоэнергетическим системам параметрическое совершенство характеризуется эксергетическим КПД, как для отдельных элементов, так и системы в целом. В работе [2] предложена связь между эксергетическим КПД технологического элемента и эксергетическим КПД сложной тепловой схемы.

Задаваясь относительно незначительным изменением регулировочных параметров системы и фиксируя её отклик, возможно отыскание оптимума целевого параметра, коим является суммарная эксергия всех энергетических потоков на выходе или производство энтропии. При этом также возможно определение вклада отдельного элемента системы в общую её эффективность.

Однако отыскание, таким образом, оптимальных рабочих (режимных) параметров системы производится только в пределах одного структурного решения и не преодолевает качественный барьер изменения структуры. Следовательно, первым этапом термодинамического совершенствования системы должен выступать её структурный синтез.

В целом структурный синтез — трудно формализуемый этап, включающий в себя анализ и организацию элементов, обеспечивающую оптимальную структуру или конструкцию системы. Как правило, это дискретное множество структурных решений, выбор которых осуществляется известными методами линейного, нелинейного и дискретного программирования. Для систем малой размерности (до 10 тепловых потоков) вполне пригодны методы линейного и нелинейного программирования, в то время как увеличение количества тепловых потоков приводит к многократному повышению размерности решаемой задачи. В этом случае более эффективными становятся методы поиска решений, основанные на эвристических алгоритмах. Впервые такая задача для синтеза сети теплообменных аппаратов была предложена и решена на основе одной из фундаментальных задач комбинаторной оптимизации в области математической оптимизации или исследовании операций, так называемой «задачи о назначениях», которая состоит в поиске минимальной суммы дуг во взвешенном двудольном графе. Первыми исследователями были Kesler M., Parker R., Kobayashi S., Umeda T., Ichikawa A. Позднее исследования продолжили Jezowski, J., Klemeš J., Kravanja Z., Grossmann I., и другие. Позднее профессор Linnhoff, B., предложил пинч-технология для синтеза теплообменных сетей [4, 5], которая в последствии легла в основу некоторых программных продуктов, таких как *Aspen HYSYS* и др. [6]. Основу пинч-технологии составляет как метод определения целевых показателей системы, так и эвристический способ выбора теплообменных связей с определением их мощности.

Несмотря на то, что пинч-технология представляет собой весьма мощный и успешно применяемый в различных промышленных отраслях инструмент для структурного синтеза не только теплосистем, но и водных коммуникаций, она имеет ряд ограничений. Так, например, все тепловые потоки, которыми она оперирует, являются стационарными, что затрудняет использование циклических и периодических процессов. Кроме того, не учитывается локализация источников теплоты, а значит, их удалённость не влияет на выбор теплообменных связей. Такие трудности практического характера преодолеваются усреднением параметров и декомпозицией системы [7], что теоретически не всегда приводит к оптимальному решению. Очевидно, что снятие этих ограничений позволит существенно расширить поисковую область и получить лучшие решения.

Целью настоящего исследования является совершенствование метода пинч-технологии для расширения возможностей интеграции циклических и периодических тепловых процессов, а также учёта их локализации.

Научная значимость исследования состоит в определении степени интеграции тепловых потоков и обобщенного показателя оценки термодинамического совершенства систем теплотехнического и технологического оборудования.

Практическую значимость исследования представляют средство для интеграции нестационарных тепловых потоков (патент на полезную модель №157238/27.) и программный код для автоматизированного проектирования сети теплообменников, позволяющий учитывать экспертные рекомендации (свидетельство № 2015612919) и локализацию источников теплоты.

Важным достоинством пинч-технологии является то, что её можно применять как на этапе проектирования производства, так и при реконструкции действующего предприятия. Практическое применение пинч-технологии по различным источникам [8]

позволяет снизить затраты на потребляемую энергию в среднем на 30-40% [9]. Опыт авторов [3] показывает, что для современных производств этот показатель составляет 10–15%, а для производств до 1990-го года может достигать 40-50%. Следует отметить, что это достигается только за счёт интеграции тепловых процессов. К настоящему времени пинч-технология широко применяется в различных отраслях: в пищевой промышленности [10], в энергетике [11], в коммунальном хозяйстве [12], водоснабжении [13] и других [14]. Однако в рамках одного структурного решения существуют возможности параметрической оптимизации, позволяющие достичь значительных результатов ресурсосбережения [13].

Материалы и методы (Materials and methods)

Для синтеза структурного решения по пинч-технологии необходимо произвести экстракцию данных о тепловых потоках рассматриваемой системы (предприятия). Такими данными являются начальные и конечные температуры потоков, а также их мощность или потоковая теплоёмкость (произведение удельной теплоёмкости на массовый расход). При этом потоки, у которых начальная температура больше конечной называются горячими, а у которых наоборот — холодными. Выработка оптимального структурного решения как раз и основывается на нахождении теплообменных связей между горячими и холодными потоками. Таким образом, составляются матрицы горячих (1) и холодных (2) потоков.

$$H = \begin{pmatrix} T_{г,н,1} & T_{г,к,1} & C_{р,г,1} \\ T_{г,н,2} & T_{г,к,2} & C_{р,г,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{г,н,i} & T_{г,к,i} & C_{р,г,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{г,н,n-1} & T_{г,к,n-1} & C_{р,г,n-1} \\ T_{г,н,n} & T_{г,к,n} & C_{р,г,n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$C = \begin{pmatrix} T_{х,н,1} & T_{х,к,1} & C_{р,х,1} \\ T_{х,н,2} & T_{х,к,2} & C_{р,х,2} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{х,н,i} & T_{х,к,i} & C_{р,х,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ T_{х,н,n-1} & T_{х,к,n-1} & C_{р,х,n-1} \\ T_{х,н,n} & T_{х,к,n} & C_{р,х,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

На основании матриц горячих H и холодных C потоков составляется базис температур (3), включающий все температуры горячих и холодных потоков.

$$T_{H \cup C} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_j \\ \dots \\ T_{k-1} \\ T_k \end{pmatrix} \quad (3)$$

В случае стационарных потоков такая операция не вызывает затруднений, так как все температуры потоков имеют дискретное значение. Однако в случае нестационарных потоков такая операция практически невозможна, так как требует бесконечно большого числа температурных значений в базисе (3). Примером такого потока могут служить циклические и периодические процессы. Рассмотрим наиболее общий случай (нестационарный поток) с переменной по времени τ температурой T, рисунок 1.

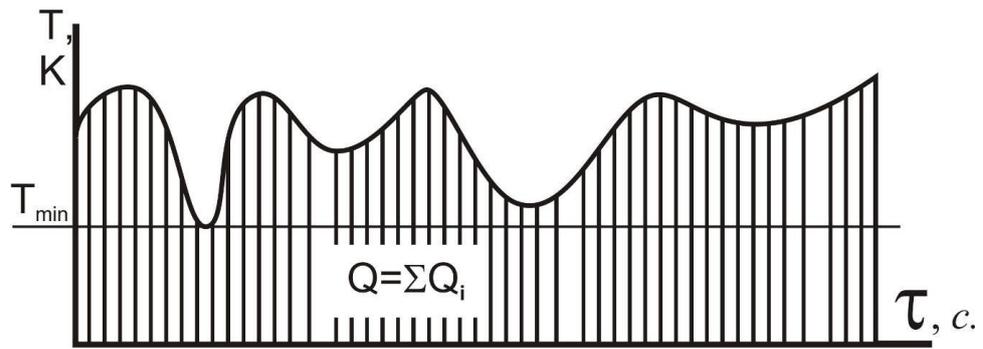


Рис. 1. Зависимость температуры от времени для нестационарного теплового потока

Fig. 1. Dependence of temperature on time for unsteady heat flow

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для возможности для интеграции такого потока было предложено и запатентовано техническое устройство (свидетельство о государственной регистрации полезной модели «Теплообменный аппарат» № 157238 от 12 января 2015 года) рисунок 2.

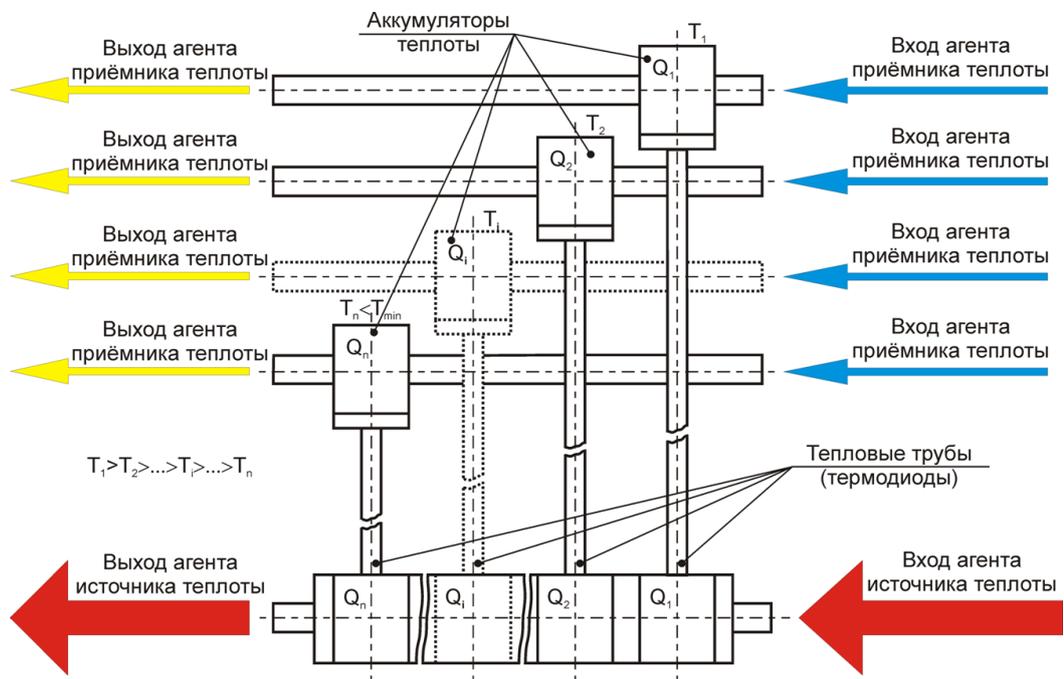


Рис. 2. Теплообменный аппарат, преобразующий нестационарный поток в несколько стационарных

Fig. 2. A heat exchanger that converts an unsteady flow into several stationary ones

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В нём нестационарный поток последовательно проходит ряд теплообменников, которые через тепловые трубы сообщаются с тепловыми аккумуляторами фазового перехода с различными температурами плавления теплоаккумулирующего материала. От тепловых аккумуляторов фазового перехода отбирается теплота при постоянной температуре – температуре плавления теплоаккумулирующего материала. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений рассмотрены в работах профессора Куколева М.И. [15] других исследователей [14].

Таким образом, нестационарный поток разбивается на несколько стационарных, рисунок 3. Сведения о таких потоках могут быть внесены в матрицы (1) и (2) и разложены по базису температур (3).

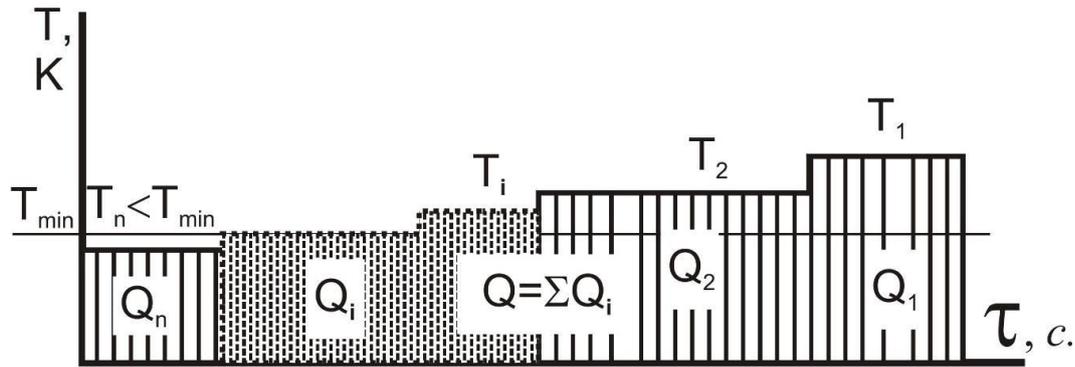


Рис. 3. Стационарные тепловые потоки на выходе из устройства преобразования

Fig. 3. Stationary heat flows at the outlet of the conversion device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для дальнейшего структурного синтеза системы необходимо определить максимальную мощность теплообменных связей между каждым «горячим» и «холодным» источником теплоты. В общем случае схематичное изображение горячих и холодных потоков может быть представлено на рисунке 4. На рисунке 4 красным цветом представлены горячие потоки, а синим – холодные. Ширина прямоугольников выражает потоковую теплоёмкость (мощность) потока, а верхние и нижние основания прямоугольников соответствуют температурным границам потока.

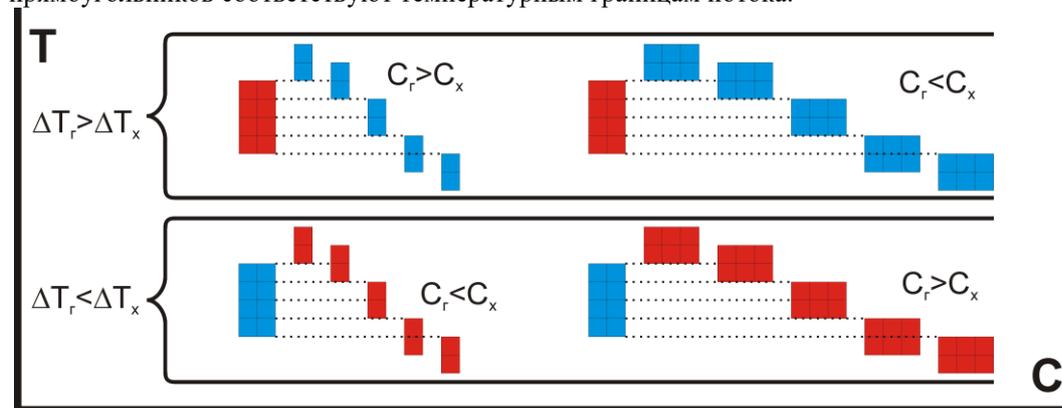


Рис. 4. Возможные варианты соотношений горячих и холодных потоков.

Fig. 4. Possible options for the ratio of hot and cold flows.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для этого предложена формула 4

$$Q = \begin{cases} \min(Q'_r; Q'_x), \min(Q'_r; Q'_x) \geq 0 \\ 0, \min(Q'_r; Q'_x) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

где Q'_r — наибольшая теплота, которую сможет отдать горячий поток холодному потоку, определяется по выражению (5); Q'_x — наибольшая теплота, которую сможет воспринять холодный поток от горячего потока, определяется по выражению (6).

$$Q'_r = c_{p,r} \cdot (T'_{r,n} - \min(\max(T'_{x,n}; T'_{r,k}); T'_{r,n})) \quad (5)$$

$$Q'_x = c_{p,x} \cdot (\max(\min(T'_{x,k}; T'_{r,n}); T'_{x,n}) - T'_{x,n}) \quad (6)$$

где $T'_{r,n}$ — сдвинутая начальная температура горячего потока, К, определяется по выражению (7); $T'_{r,k}$ — сдвинутая конечная температура горячего потока, К, определяется по выражению (8); $T'_{x,n}$ — сдвинутая начальная температура холодного потока, К, определяется по выражению (9); $T'_{x,k}$ — сдвинутая конечная температура холодного потока, К, определяется по выражению (10).

$$T'_{r,n} = T_{r,n} - \Delta T/2 \quad (7)$$

$$T'_{r,k} = T_{r,k} - \Delta T/2 \quad (8)$$

$$T'_{x,n} = T_{x,n} + \Delta T/2 \quad (9)$$

$$T'_{x,k} = T_{x,k} + \Delta T/2 \quad (10)$$

где $T_{r,n}$ — начальная температура горячего потока, К; $T_{r,k}$ — конечная температура горячего потока, К; $T_{x,n}$ — начальная температура холодного потока, К; $T_{x,k}$ —

конечная температура холодного потока, K .

Сдвигание температур на величину $\Delta T/2$ необходимо для обеспечения в точке пинча заданного значения ΔT и работоспособности теплообменных аппаратов в этой точке.

Определённое таким образом значение Q представляет собой максимальное значение теплоты, которое может быть передано от горячего источника к холодному. При этом теплота может передаваться не от всего «горячего» потока, а только от его части, или подводиться не ко всему «холодному» потоку, а только к части его. При этом потоки разделяются, и возникают ещё, как минимум, три возможных варианта интеграции двух потоков: последовательная, параллельная и парапараллельная.

Последовательный способ заключается в том, что каждый поток (и горячий и холодный) вступают в интеграцию при своих теплоёмкостях. Параллельная интеграция заключается в том, что каждый поток, как горячий, так и холодный, делится в свою очередь на два параллельных потока. Полученные таким делением потоки имеют те же самые значения начальных и конечных температур, что и у начального потока, из которого они получились. Однако теплоёмкость каждого из них будет меньше, чем у начального потока. Суммарная же теплоёмкость двух потоков, полученных делением, будет равна теплоёмкости потока, из которого они получились. В интеграцию вступают только одна часть горячего потока и одна часть холодного потока. При этом теплоёмкости потоков, вступающих в интеграцию, подбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальную теплоту интеграции между ними. При этом часто бывает так, что теплота одного из оставшихся потоков, которые не пошли на интеграцию, равна нулю. Как правило, такой способ интеграции всегда имеет значение возможной теплоты интеграции больше нуля. Парапараллельная интеграция аналогична параллельной интеграции, но с тем отличием, что потоки, вступающие в интеграцию, имеют равные теплоёмкости. Значение этих теплоёмкостей равны значению наименьшей из теплоёмкостей потоков, из которых они образованы. Подробнее эти способы интеграции и программные алгоритмы их реализующие рассмотрены в источниках [1, 3].

Как следует из формул (4 ... 10), определённая таким образом теплота интеграции не зависит от локализации источников теплоты, а определяется только их потоковой теплоёмкостью, а также начальными и конечными температурами источников. Однако при транспортировке и передаче теплоты неизбежно возникнут потери, которые будут тем больше, чем выше будет разность температур между источниками и дальше расстояние транспортировки. Программный продукт [6], реализующий возможность учитывать потери теплоты при транспортировке, путём процентного снижения мощности горячих источников позволяет вести синтез теплообменной сети в ручном, автоматическом и полуавтоматическом режиме.

Для оценки совершенства структурного синтеза вводятся понятия степени интеграции тепловых процессов и критерий термодинамического совершенства технической системы.

Степень интеграции тепловых процессов χ - это отношение теплоты интеграции к её максимально возможному значению для данной технической системы, то есть при $\Delta T=0$. Для существующих систем степень интеграции определяется по формуле (11), а для вновь проектируемых систем по формуле (12).

$$\chi = \frac{Q_p(\Delta T_{\text{пинч}})}{Q_p(\Delta T_{\text{пинч}}=0)} \quad (11)$$

$$\chi = \frac{\left| \sum_{i=1}^{i=m} h \right| - \left| \sum_{i=1}^{i=n} c \right| - |Q_{\Pi}| - |Q_o|}{2 \cdot Q_p(\Delta T_{\text{пинч}}=0)} \quad (12)$$

где Q_p — теплота регенерации, $\sum h$ и $\sum c$ — соответственно суммы теплот горячих и холодных потоков, Q_{Π} и Q_o — соответственно теплоты горячих и холодных утилит.

Очевидно, что в теории показатель степени интеграции тепловых процессов χ может варьироваться от нулевого значения до единицы, хотя на практике значение единицы недостижимо, так как теплообменные аппараты не могут работать с нулевой разностью температур. Тем не менее, следует отметить, что на практике возможно достижение весьма высокого значения этого показателя (порядка 90-95% и выше).

В процессе выполнения данного исследования возникла необходимость уточнения таких понятий как: «интеграция» «регенерация» и «утилизация» теплоты. Под

регенерацией следует понимать вторичное использование теплоты в том же производственном цикле. Утилизацией теплоты является дальнейшее использование отводимой в производственном цикле теплоты для непроеизводственных нужд. Понятие «интеграция теплоты» это создание теплообменных связей как внутри рассматриваемой системы, так и с внешними источниками теплоты. Таким образом, это более широкое понятие и включает в себя два предыдущих, регенерацию и утилизацию теплоты [16].

Как было сказано выше, в рамках одного структурного решения существуют возможности параметрической оптимизации, позволяющие достичь значительных результатов ресурсосбережения. Степень интеграции тепловых процессов характеризует лишь структурное совершенство системы. Совершенство протекания термодинамических процессов в системе характеризуется её эксергетическим КПД η_{ex} [17]. Таким образом, возникает необходимость разработки обобщенного показателя η оценки термодинамического совершенства системы, включающей в себя оба показателя, как структурного χ , так и параметрического совершенства η_{ex} . В качестве такой зависимости предлагается использовать формулу (13).

$$\eta = \eta_{ex} + (1 - \eta_{ex}) \cdot \eta_{ex} \cdot \chi \quad (13)$$

Результаты (Results)

Пинч-технология является весьма мощным инструментом для проектирования новых и модернизации существующих предприятий. Несмотря на то, что она была предложена в химической технологии для дизайна теплообменных сетей, она нашла применение в энергетике и даже в водоснабжении и водоотведении. Тем не менее, она способна работать только со стационарными потоками теплоты. На практике нередко встречаются циклические и периодические процессы, что ограничивает возможности применения пинч-технологии. Это и явилось причиной настоящего исследования с целью расширения границ применения пинч-технологии. Практическая реализация такого расширения осуществляется на основе предложенного технического устройства, позволяющего преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных.

Также на основе пинч-метода предложен критерий структурного совершенства системы, являющийся отношением регенерируемой в системе теплоты к её теоретически возможному значению.

Обсуждение (Discussions)

Благодаря проведённым исследованиям удалось усовершенствовать такой мощный инструмент как пинч-технология и существенно расширить его возможности.

Теоретическими результатами являются предложенные критерий структурного совершенства и обобщённый показатель структурно-параметрического совершенства системы.

Практическим результатом исследования явилось предложенное техническое устройство для преобразования нестационарного потока в ряд стационарных потоков. Также практическим результатом данного научного исследования является программа для синтеза теплообменных сетей.

Предложенное устройство преобразования расширяет возможности пинч-технологии, а введённые критерии позволят вести синтез или дизайн системы, опираясь на новые целевые показатели. Созданная в процессе работы программа позволяет вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

Заключение (Conclusions)

В данной работе предложено совершенствование пинч-технологии для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов и учёта их локализации. Для возможности интеграции нестационарных тепловых процессов предложено техническое устройство, позволяющее преобразовать нестационарный поток на несколько стационарных, а для учёта локализации тепловых потоков предложен программный продукт, позволяющий вести синтез теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

Кроме того, введены два показателя, характеризующие структурное и структурно-параметрическое совершенство системы.

Литература

1. Агапов, Д. С. Структурная и параметрическая оптимизация систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Агапов Дмитрий Станиславович. – Санкт-Петербург, 2016. – 22 с.
2. Луканин, П. В. Энергосберегающие технологии на предприятиях целлюлозно-бумажной

промышленности: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Луканин Павел Владимирович, 2022. – 357 с. – EDN AJSODJ.

3. Картошкин, А. П. Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации технологического оборудования энергетических систем / А. П. Картошкин, Д. С. Агапов. – Санкт-Петербург: Проспект Науки, 2021. – 311 с. – ISBN 978-5-6046442-1-8.

4. AIChE Journal Vol 24, Issue 4, July 1978, Pages: 633–642, Bodo Linnhoff and John R. Flower "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks"

5. Linnhoff, Bodo; Sahdev, Vimal (2000). "Pinch Technology". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi:10.1002/14356007.b03_13. ISBN 3527306730.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612919 Российская Федерация. Пинч анализ и теплообменная сеть: № 2014663873: заявл. 29.12.2014: опубл. 26.02.2015 / Д. С. Агапов.

7. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. Основы интеграции тепловых процессов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2000. – 458 с.

8. Dhole V.R., Smith R., Linnhoff B. Computer Application for Energy – Efficient System / Paper in Encyclopedia of Energy Technology and the Environment. 4Volume. Set.: New York. John Wiley and Sons. Inc. – 1995. pp. 935 – 960.

9. Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: The Pinch Analysis / W. Su, Y. Ye, C. Zhang [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 256. – P. 120696. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120696.

10. Optimal configuration and economic analysis of PRO-retrofitted industrial networks for sustainable energy production and material recovery considering uncertainties: Bioethanol and sugar mill case study / U. Safder, J. Y. Lim, P. Ifaei [et al.] // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 182. – P. 797-816. – DOI 10.1016/j.renene.2021.10.047.

11. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration / F. Schlosser, J. Vogelsang, J. Hesselbach [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 133. – P. 110219. – DOI 10.1016/j.rser.2020.110219.

12. Development of an integrated network for waste-to-energy and central utility systems considering air pollutant emissions pinch analysis / S. Hwangbo, G. Sin, G. Rhee, C. K. Yoo // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119746. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119746.

13. Design of optimal heat exchanger network with fluctuation probability using break-even analysis / A. M. Hafizan, S. R. Wan Alwi, Z. A. Manan [et al.] // Energy. – 2020. – Vol. 212. – P. 118583. – DOI 10.1016/j.energy.2020.118583.

14. Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage / M. Chennaif, H. Zahboune, M. Elhafyani, S. Zouggar // Energy. – 2021. – Vol. 227. – P. 120444. – DOI 10.1016/j.energy.2021.120444.

15. Куколев, М. И. Модели тепловых процессов в накопителях энергии для обоснования проектных решений: специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Куколев Максим Игоревич. – Санкт-Петербург, 2006. – 280 с.

16. Агапов, Д. С. Регенерация, утилизация и интеграция теплоты / Д. С. Агапов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 2(242). – С. 25.

17. Exergoeconomic performance comparison, selection and integration of industrial heat pumps for low grade waste heat recovery / M. Wang, C. Deng, Y. Wang, X. Feng // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 207. – P. 112532. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.112532.

Авторы публикации

Агапов Дмитрий Станиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» (АТТС) Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ). Email: *different76@list.ru*.

Картошкин Александр Петрович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автомобили, тракторы и технический сервис» (АТТС) Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ). Email: *akartoshkin@yandex.ru*.

Калюттик Александр Антонович – канд. техн. наук, доцент, директор высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). Orcid ID 0000-0002-2965-357X Email: *aa_kalyutik@spbstu.ru*.

Кондрашов Алексей Владимирович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ). *Email: kondrashov22@gmail.com*

References

1. Agapov, D.S. Structural and parametric optimization of systems of industrial heating and technological equipment: specialty 05.14.04 "Industrial Heat and Power Engineering": abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Agapov Dmitry Stanislavovich. – St. Petersburg, 2016. – 22 p.
2. Lukanin, P.V. Energy-saving technologies at pulp and paper industry enterprises: specialty 05.14.04 "Industrial Heat and Power Engineering": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Lukanin Pavel Vladimirovich, 2022. – 357 p.
3. Kartoshkin, A.P. Resource saving in the design and operation of technological equipment of energy systems / A.P. Kartoshkin, D.S. Agapov. – St. Petersburg: Prospekt Nauki, 2021. – 311 p. – ISBN 978-5-6046442-1-8.
4. AIChE Journal Vol 24, Issue 4, July 1978, Pages: 633–642, Bodo Linnhoff and John R. Flower "Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks"
5. Linnhoff, Bodo; Sahdev, Vimal (2000). "Pinch Technology". *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi:10.1002/14356007.b03_13. ISBN 3527306730.
6. Certificate of state registration of a computer program No. 2015612919 Russian Federation. Pinch analysis and heat exchange network: No. 2014663873: application. 12/29/2014: publ. 02/26/2015 / D. S. Agapov.
7. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky L.L. Basics of thermal process integration. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2000. – 458 p. Smith R., Klemesh J., Tovazhnyansky L.L. Basics of thermal process integration. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2000. – 458 p.
8. Dhole V.R., Smith R., Linnhoff B. Computer Application for Energy – Efficient System / Paper in Encyclopedia of Energy Technology and the Environment. 4Volume. Set.: New York. John Wiley and Sons. Inc. – 1995. pp. 935 – 960.
9. Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: The Pinch Analysis / W. Su, Y. Ye, C. Zhang [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 256. – P. 120696. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.120696.
10. Optimal configuration and economic analysis of PRO-retrofitted industrial networks for sustainable energy production and material recovery considering uncertainties: Bioethanol and sugar mill case study / U. Safder, J. Y. Lim, P. Ifaei [et al.] // *Renewable Energy*. – 2022. – Vol. 182. – P. 797-816. – DOI 10.1016/j.renene.2021.10.047.
11. Large-scale heat pumps: Applications, performance, economic feasibility and industrial integration / F. Schlosser, J. Vogelsang, J. Hesselbach [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 133. – P. 110219. – DOI 10.1016/j.rser.2020.110219.
12. Development of an integrated network for waste-to-energy and central utility systems considering air pollutant emissions pinch analysis / S. Hwangbo, G. Sin, G. Rhee, C. K. Yoo // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 252. – P. 119746. – DOI 10.1016/j.jclepro.2019.119746.
13. Design of optimal heat exchanger network with fluctuation probability using break-even analysis / A. M. Hafizan, S. R. Wan Alwi, Z. A. Manan [et al.] // *Energy*. – 2020. – Vol. 212. – P. 118583. – DOI 10.1016/j.energy.2020.118583.
14. Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage / M. Chennaif, H. Zahboune, M. Elhafyani, S. Zouggar // *Energy*. – 2021. – Vol. 227. – P. 120444. – DOI 10.1016/j.energy.2021.120444.
15. Kukolev, M. I. Models of thermal processes in energy storage devices to substantiate design decisions: specialty 05.14.04 "Industrial Thermal Power Engineering": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Kukolev Maxim Igorevich. – St. Petersburg, 2006. – 280 p.
16. Agapov, D. S. Regeneration, utilization and integration of heat / D. S. Agapov // *Plumbing, Heating, Air Conditioning*. – 2022. – No. 2(242). – P. 25.
17. Exergoeconomic performance comparison, selection and integration of industrial heat pumps for low grade waste heat recovery / M. Wang, C. Deng, Y. Wang, X. Feng // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 207. – P. 112532. – DOI 10.1016/j.enconman.2020.112532.

Authors of the publication

Dmitry S. Agapov – St. Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Pushkin, Russia. *Email: different76@list.ru*.

© Агапов Д.С., Картошкин А.П., Калютик А.А.

Alexander P. Kartoshkin – St. Petersburg State Agrarian University (SPbSAU), Pushkin, Russia. *Email:* akartoshkin@yandex.ru.

Alexander A. Kalyutik – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). St. Petersburg. Orcid ID 0000-0002-2965-357X *Email:* aa_kalyutik@spbstu.ru.

Alexey V. Kondrashov – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU). St. Petersburg. *Email:* kondrashov22@gmail.com.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **31.10.2023 г.**

Отредактировано **22.11.2023 г.**

Принято **23.11.2023 г.**



ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ РАДИАЦИИ ПЕЧИ ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДОВ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ НАСТЕННЫХ ГОРЕЛОК

Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: 0000-0002-6411-3640

vafdaniil@yandex.ru, yvankov@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Возможность прогнозирования условий работы отдельных элементов высокотемпературных технологических установок нефтехимических производств еще на этапе проектирования или модернизации является актуальной по многим причинам. ЦЕЛЬ. Проведение численных исследований тепловых параметров и особенностей турбулентного движения дымовых газов в радиационной части печи пиролиза углеводородов с центральным расположением змеевиков при несимметричным расположением горелок малой тепловой мощности на боковых футерованных стенах и на своде камеры. Такие печи применяются для получения низших олефинов, которые являются первичными продуктами для производства синтетических смол, каучуков, пластических масс и волокон. МЕТОДЫ. В радиантной камере печи происходят взаимосвязанные процессы горения газообразного топлива, турбулентного течения продуктов сгорания, лучисто-конвективного теплообмена и реакции крекинга углеводородов в трубчатых змеевиках с образованием смеси легких углеводородов, богатых олефинами. Образование продуктов пиролиза углеводородов становится существенным при обеспечении температуры парогазовой смеси в трубчатых реакторах в пределах 800-855 °С в присутствии пара разбавления. Необходимая для этого теплота получатся в основном за счет теплового излучения продуктов сгорания и раскаленных футерованных поверхностей камеры радиации. Физические процессы, протекающие в топочной камере, смоделированы двухмерными уравнениями модели горения углеводородов в воздухе, переноса энергии излучением и уравнениями движения. Использован пакет прикладных программ, который основан на численном решении упомянутой системы уравнений переноса. В результате численных исследований построены поля скоростей и температуры дымовых газов, образующихся при сгорании смеси топливного газа в топочной камере трубчатой печи. В данной работе предполагается, что на одной боковой стенке камеры радиации в восьми горизонтальных рядах размещены настенные горелки в количестве 64 штук, а на другой стене камеры такие же горелки установлены в семи ярусах по 8 горелок в каждом ряду и один ряд горелок на своде камеры. Продукты сгорания, исходящие из этих горелок образуют сложные поля скоростей и температуры в объеме в обеих половинах камеры радиации. РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам численных расчетов построены поля температуры и скоростей дымовых газов в обеих частях камеры радиации. Рассчитаны температуры внутренних поверхностей стенок футеровки. Определены распределения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков к реакционным трубам по высоте печи пиролиза пропан-бутановой фракции. Проведены сравнения некоторых полученных результатов для случаев, когда все горелки установлены только на боковых стенках камеры и при указанном выше расположении горелок. Результаты расчетов для первого варианта хорошо согласуются с некоторыми опытными данными, полученными при пуско-наладочных работах в действующей установке. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчеты показывают, что применение большого количества настенных газовых горелок малой мощности приводят к возникновению сложных полей скоростей продуктов сгорания и температуры в камерах радиации трубчатых печей. В то же время разброс значений температуры в объеме топочной камеры намного меньше, чем для случая, когда все горелки большей мощности установлены только на своде или на поде радиантной камеры. Путем изменения расположения ярусов горелок можно добиться сравнительно равномерного поступления теплоты к нагреваемому продукту по длине пирозмеевика.

Ключевые слова: горение газа; тепловое излучение; тепло и массообмен; температура; турбулентность; численный расчет; пиролиз пропана.

Для цитирования: Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводородов с несимметричным расположением настенных горелок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 126 – 140. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-126 – 140.

THERMAL CALCULATION OF THE RADIATION CHAMBER OF A HYDROCARBON PYROLYSIS FURNACE WITH A NON-SYMMETRIC ARRANGEMENT WALL-MOUNTED BURNERS

Vafin D.B., Vankov Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vafdaniil@yandex.ru ORCID: 0000-0002-6411-3640

Abstract: *RELEVANCE.* The possibility of predicting the operating conditions of individual elements of high-temperature technological units of petrochemical industries even at the design or modernization stage is relevant for many reasons. *THE PURPOSE.* Carrying out numerical studies of thermal parameters and features of the turbulent movement of flue gases in the radiative part of the hydrocarbon pyrolysis furnace with a central arrangement of coils with an asymmetric arrangement of burners of low thermal power on the side lined walls and on the vault of the chamber. Such furnaces are used to produce lower olefins, which are the primary products for the production of synthetic resins, rubbers, plastics and fibers. *METHODS.* In the radiant chamber of the furnace, interrelated processes of combustion of gaseous fuel, turbulent flow of combustion products, radiant-convective heat exchange and cracking reactions of hydrocarbons in tubular coils occur with the formation of a mixture of light hydrocarbons rich in olefins. The formation of pyrolysis products of hydrocarbons becomes essential when the temperature of the vapor-gas mixture in tubular reactors is within 800-855 °C in the presence of dilution steam.. The heat required for this will be obtained mainly due to the thermal radiation of the combustion products and the hot lined surfaces of the radiation chamber. The physical processes taking place in the combustion chamber are modeled by two-dimensional equations of the model gorenje hydrocarbons in the air, energy transfer by radiation and equations of motion. The package of applied programs is used, which is based on the numerical solution of the mentioned system of transfer equations. As a result of numerical studies, the velocity and temperature fields of flue gases formed during the combustion of a fuel gas mixture in the furnace chamber of a tube furnace were constructed. In his work, it is assumed that on one side wall of the radiation chamber, wall burners in the amount of 64 pieces are placed in eight horizontal rows, and on the other wall of the chamber, the same burners are installed in seven tiers and one row of burners on the vault of the chamber. The combustion products emanating from these burners form complex velocity and temperature fields in the volume in both halves of the radiation chamber. *RESULTS.* As a result of numerical calculations, the fields of temperature and flue gas velocities in both parts of the radiation chamber are constructed. The temperatures of the inner surfaces of the lining walls are calculated. The distributions of the surface densities of radiant heat fluxes to the reaction pipes along the height of the pyrolysis furnace of the propane-butane fraction are determined. Comparisons of some of the results obtained were carried out for cases when all burners are installed only on the side walls of the chamber and with the above arrangement of burners. *CONCLUSION.* Calculations show that the use of a large number of low-power wall burners leads to the emergence of complex velocity and temperature fields in the radiation chambers of tubular furnaces. At the same time, the spread of temperature values in the volume of the furnace chamber is much smaller than for the case when all burners of higher power are installed only on the vault and on the hearth of the furnace. By changing the location of the tiers of burners, it is possible to achieve a relatively uniform supply of heat to the heated product along the length of the pyro coil.

Keywords: radiation; heat transfer; combustion; turbulence; temperature; numerical experiment; pyrolysis of hydrocarbons.

For citation: Vafin D.B., Vankov Y.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with a non-symmetric arrangement wall-mounted burners. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (5): 126-140. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-126-140.

Введение (Introduction)

Сырьем для получения широко используемых в настоящее время полиэтилена, полипропилена, поливинилхлорида полистирола и многих других являются этилен и пропилен – олефины-мономеры. Их получение в настоящее время производится пиролизом нефтяных фракций, в частности легкого бензина, этана, пропана. Наиболее распространенными аппаратами для проведения пиролиза стали трубчатые печи. В змеевики конвекционных секций таких печей подается сырье, которое подогревается дымовыми газами в основном за счет конвективного теплообмена. Сырье испаряется и смешивается с водяным паром и нагревается до температуры примерно до 650 °С, при которой начинаются реакции разложения. Разбавление водяным паром приводит к снижению парциального давления углеводородов, в результате возрастает селективность процессов в направлении роста выхода целевых продуктов. Кроме этого наличие водяного пара снижает парциальное давление высококипящих ароматических углеводородов в трубчатых реакторах в камере радиации, что снижает образование кокса в пирозмеевике и смол на поверхностях труб закалочного-испарительного аппарата. Пиролиз углеводородов происходит в трубчатых реакторах камеры радиации печи за счет теплоты сгорания газообразного топлива в горелках разного типов.

Выход целевых продуктов определяется правильной организацией подвода теплоты парогазовой смеси в трубчатых реакторах за десятые доли секунды (0,2 – 0,3 с). Для этого приходится обеспечить высокий уровень температурной нагрузки реакционных труб экрана, что приводит к их нахождению на пределе жаростойкости материалов. Существующие печи пиролиза, как правило, имеют вертикально подвешенные змеевики с движением сырья в несколько потоков (до десяти).

Основное количество теплоты (более 90 %) пирозмеевику поступает за счет радиационных потоков и раскаленных футерованных стен камеры радиации и дымовых газов. Для расчета тепловых потоков в объеме радиационной камеры необходимо знать распределение температуры продуктов сгорания и концентрации их излучающих компонентов. Локальные значения этих величин получаются в результате совместного численного интегрирования всех дифференциальных уравнений, моделирующих физические и химические процессы в топочном объеме. При проектировании трубчатых и других печей до сих пор в основном пользуются интегральными методами, которые требуют применения имеющихся опытных данных и предположения не известных заранее параметров в камере радиации. Такие методы дают возможность определения суммарного подвода теплоты нагреваемому продукту внутри труб, потери теплоты с дымовыми газами и в окружающую среду.

В представленной работе приведены результаты численных расчетов радиационно-конвективного теплообмена, горения топочного газа в воздухе и турбулентного движения продуктов реакции горения в радиационной секции печи крекинга пропан-бутана с несимметричным расположением горелок малой мощности на футерованных боковых стенах секции и на своде камеры радиации. Расчеты выполнены для условий действующей установки, когда все горелки установлены симметрично на стенах обеих половин радиационной секции и для случая, когда расположение горелок на половине с переходом в секцию конвекции оставались прежними, а на другой половине один ряд горелок перемещен на свод камеры. Результаты расчетов позволили построить поля течения и температуры продуктов сгорания в камере радиации для этих двух вариантов. Для этих вариантов приведены сравнения распределений плотностей тепловых потоков по высоте пирозмеевика. Для этих же вариантов показаны особенности изменения температуры дымовых газов в разных сечениях радиационной секции и температуры поверхностей боковых футеровок стен.

Сравнение температуры продуктов сгорания полученных расчетным путем на переходе в конвекционную секцию печи с экспериментальными значениями реальной установки показывает, что использованный пакет прикладных программ дает возможность прогнозирования локальных тепловых параметров в камере радиации трубчатой печи. При использовании интегральных методов теплового расчета топки предполагают одинаковую температуру в объеме топочной камеры, по результатам наших расчетов видно, что такое предположение не является верным. Даже при

расположении большого количества горелок малой тепловой мощности в восьми ярусах на стенах радиационной секции печи образуются сложные распределения температуры в топочной камере и сложные поля течения дымовых газов. Можно отметить, что перестановкой мест размещения рядов горелок можно изменить распределение плотностей лучистых тепловых потоков по высоте камеры.

Литературный обзор (Literature Review)

Обзор имеющихся литературных источников по методам теплового расчета топочных устройств и рассмотрение различных проблем, связанных с вопросами анализа тепло- и массообмена можно найти в работах [1-4] и во множестве других источниках. В настоящее время применяют интегральные (суммарные), зональные и методы теплового расчета топочных устройств, основанных на моделировании топочных процессов дифференциальными уравнениями. Численные методы теплового расчета различных топок, позволяющие учитывать многообразные физико-химические процессы, протекающие в топках начали разрабатывать в 80-е годы двадцатого столетия с появлением мощных ЭВМ.

Интегральные полуэмпирические методы используют определенные физические закономерности, и применением экспериментальных связей между безразмерными критериями подобия получают расчетные зависимости для искомых величин. Такие методы не позволяют предсказать локальные температуры дымовых газов, стенки экранных труб, футеровки, распределение поверхностных плотностей лучистых и конвективных тепловых потоков по длине реакционных труб в камере и другие многие параметры. В то же время использование экспериментальных данных на существующих аналогичных установках такие методы дают возможность вычисления суммарных тепловых потоков к нагреваемому сырью и температуру продуктов сгорания в переходном коробе из секции радиации в конвекционную секцию печи. При проектировании и модернизации трубчатых печей все еще в основном применяют балансовые методы и выходят научные статьи, выполненные применением таких методов [5 - 7].

В различных вариантах зональных методов расчета топочных устройств ограничивающие поверхности топок и объемы излучающих газов заменяются ограниченным числом эквивалентными оптически однородными зонами. В каждой зоне предварительно устанавливают постоянные данные для термодинамических и оптических свойств, которые скачкообразно изменяются при переходе из одной зоны в другую. Перенос энергии излучением определяется решением интегрального уравнения переноса тепловой радиации путем его замены системой приближенных алгебраических уравнений с осреднением в пределах каждой зоны поверхностных плотностей лучистых потоков. При этом система алгебраических уравнений, количество которых равняется числу заранее определенных зон, решается после задания поля скоростей и источников тепловыделений или для их получения надо каким-то образом решать газодинамические задачи. В зависимости от назначения есть большое количество вариантов зональных методов, ссылки на некоторые из которых имеются в [8, 9].

Большой вклад в разработке и использования зональных методов для теплового расчета различных топочных устройств внесли Суринов Ю.А., Невский А.С., Шорин С.Н., Адрианов В.Н., Рубцов Н.А., Лисиенко В.Г., Седелкин В.М. и др [10]. Когда термодинамические, газодинамические и радиационные свойства газов в топочных объемах имеют большие градиенты, приходится расчетную область разбить на большое число поверхностных и объемных зон и в каждой из этих зон задавать необходимые данные, что приводит к увеличению трудоемкости и уменьшению точности расчетов.

Метод теплового расчета камер радиации трубчатых печей применением численного интегрирования дифференциальных уравнений был предложен в работе [11].

Дифференциальный метод расчета топочных устройств основывается на моделировании различных взаимосвязанных термодинамических, газодинамических и процессов горения топлива в топочных камерах высокотемпературных аппаратов интегро-дифференциальным уравнением переноса энергии излучением, дифференциальными уравнениями сохранения энергии, переноса импульса и уравнений моделей горения. Методам решения уравнения переноса лучистой энергии посвящено большое количество работ, некоторые из них проанализированы в [1, 3, 8 - 15]. Такого типа методы применяются для исследования многочисленных практических и научных задач. Используя такие подходы разработаны несколько универсальных коммерческих вычислительных систем типа *ANSYS FLUENT*, *CFX*, *FlowVision* и др. Имеются работы, подготовленные с применением пакета программ VP2/3, σ -Flow [16], *FLOREAN* [17],

которые дают возможность расчета пространственных течений при сжигании газового, жидкого и твердого топлива при лучистом переносе энергии. В работе [18] путем численного решения системы соответствующих уравнений проведен анализ образования окислов азота при воздушном ступенчатом сжигании газообразного топливного газа. В работе [19] проведено численное моделирование турбулентного течения в поле потока теплового излучения. Различные проблемы в высокотемпературных аппаратах подготовленные с использованием коммерческих программ описаны в работах [20-22].

Материалы и методы (Materials and methods)

Для термического крекинга этана, пропана и легких бензинов в настоящее время используются трубчатые печи с свободно висящими вертикальными змеевиками. Целевые продукты процесса пиролиза, которыми являются ненасыщенные углеводороды, только при температурах выше 750 °С становятся термодинамически стабильными, а их выход максимальным в диапазоне температур 780 – 870 °С для различных составов сырья. Относительное количество целевого продукта уменьшается с увеличением времени пребывания сырья в трубчатом реакторе больше 0,4 с. Эти факторы зависят от организации горения газообразного топлива в камере радиации печи и от конфигурации змеевика. Оптимальными считаются многопоточные змеевики типов SRT-II, SRT-III и SRT-IV [23].

В представленной работе проанализированы различные параметры в радиационной секции печи пиролиза, упрощенная схема которой показана на рисунке 1.

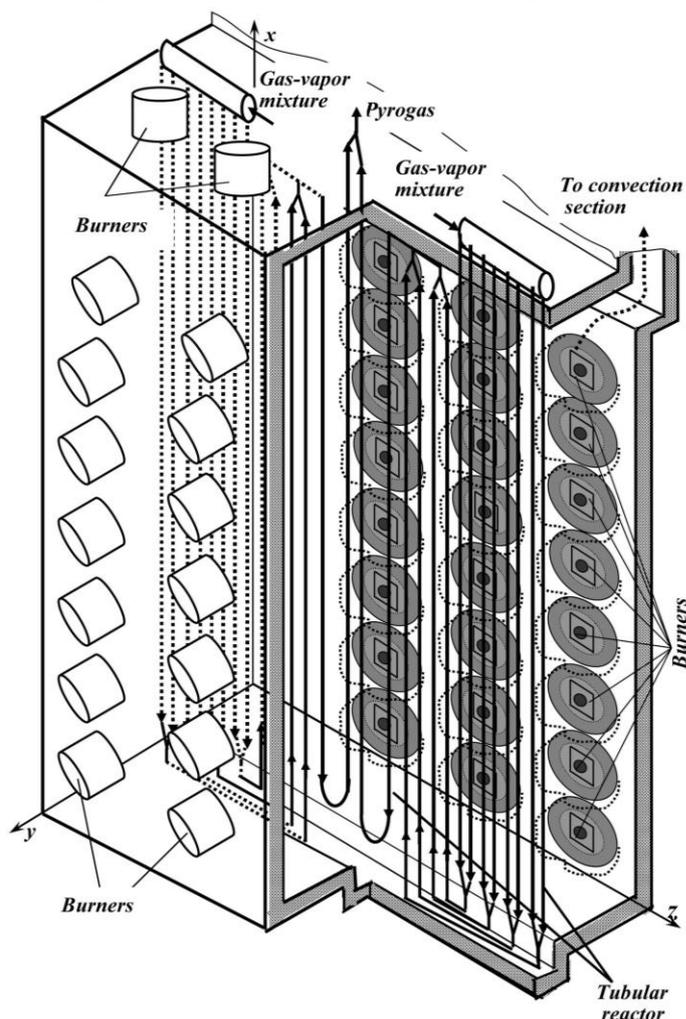


Рис. 1. Схема части радиационной камеры Fig.1. Scheme of a part of the radiation chamber of a tubular hydrocarbon pyrolysis furnace.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Некоторые вопросы особенностей тепло- и массообмена в камере радиации печи пиролиза этана, когда все ярусы горелок расположены на боковых стенах камеры были рассмотрены в статье [24]. Для проведения процесса пиролиза углеводородов в змеевиках радиационной секции теплота подводится за счет внутренней энергии продуктов сгорания топливного газа и за счет переизлучения раскаленных поверхностей футеровки стенок

камеры радиации печи. Высокотемпературный крекинг углеводородов способствует образованию метана, этилена, пропилена, бутилена, водорода и других продуктов. В работах [3, 4] были рассмотрены тепловые и аэродинамические параметры в камере радиации существующих трубчатых печей пиролиза этана-рецикла и бутан-пропана, предназначенных для получения этилена и пропилена. На боковых стенках камеры радиации этих печей в восьми рядах были установлены по 64 настенные горелки типа LPMW-5 мощностью по 186 кВт, как показано на правой части рис.1. В данной работе предполагается, что расположение ярусов горелок с правой стороны такое же как в существующих печах, а в левой части один ряд таких же горелок установлен на своде левой части камеры радиации и семь ярусов на левой боковой стенке. Используемые горелки образуют ограниченные кольцевые факелы вокруг трубы горелки. Изменение расположения горелок было произведено с целью обеспечения более равномерного обогрева змеевиков радиантной секции печи по высоте камеры.

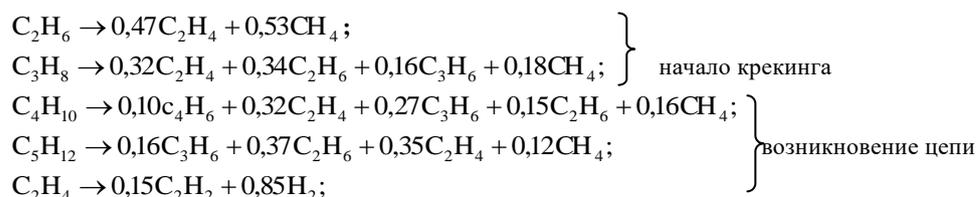
Как было уже отмечено выше, такие печи состоят из конвекционной и радиационной секций. Высота радиантной камеры, вдоль которой при расчетах направлена ось x , составляет 11 м. Ось z направили по глубине камеры, размер которой – 10 м. Общая ширина камеры радиации вдоль оси y – 2,04 м. По середине радиационной секции размещен трубчатый реактор (экран) двухстороннего обогрева, состоящий из 4-х змеевиков, каждый из которых имеет по восемь проходов. Входной проход и следующий проход отдельного змеевика состоят из двух параллельных труб. Остальные шесть проходов состоят из одной трубы. Нисходящие участки змеевиков имеют больший размер, чем восходящие. Выпускные проходы двух змеевиков подсоединяются попарно к одной входной линии каждого из двух закально-испарительных аппаратов (ЗИА).

Процентный объемный состав синтез газа на горение: метан – 78,35; водород – 18,5; этан – 1,6; азот – 1,3; кислород – 0,25%. Низшая теплота сгорания такого синтез газа – 29 МДж/м³. Температура газа на входе в горелки принята равной 60 °С. Температура подаваемого к горелкам воздуха принята равной 2 °С. Воздух на горение подается из окружающей среды через первичные воздушные заслонки, которые позволяют регулировать его расход. Тепловая нагрузка горелок регулируется в зависимости от теплоты сгорания синтез газа, которая зависит от его процентного состава, путем регулирования давления газа на входе в горелки. Избыточное давление топливного газа перед горелками изменяется в пределах 0,08...0,2 МПа. Настройки горелок должны обеспечить коэффициент избытка воздуха равный $\alpha = 1,1$.

В конвекционной секции установки происходит предварительный подогрев пара разбавления, углеводородного сырья, перегрев пара и питательной воды за счет внутренней энергии дымовых газов, поступающих и радиационной секции. После конвекционной секции водяной пар смешивается с углеводородным сырьем, затем подается в радиантную камеру по переходному трубопроводу, расположенному снаружи печи. На действующих установках температура парогазовой смеси перед подачей в трубы пирозмеевиков измеряется термопарами Т1, а на выходе из трубчатого реактора термопарами Т2 измеряется температура пирогаза. Термопарами Т3 измеряется температуры дымовых газов на переходе из радиационной секции в конвекционную. Для обеспечения необходимого состава пирогаза температура парогазовой смеси на входе в пирозмеевики должна поддерживаться около 650 °С, а температура целевого продукта пиролиза (пирогаза) на выходе из пирозмеевиков ~835°С.

С повышением температуры пирогаза на выходе из пирозмеевиков камеры радиации растет конверсия углеводородов. Интенсификацию процесса крекинга углеводородов приходится осуществлять за счет увеличения температуры процесса пиролиза и уменьшения продолжительности нагрева сырья в пирозмеевике. Это приводит к увеличению температуры поверхности выходных проходов труб змеевика, которая может достичь значений 1100 - 1150 °С, которая является пределом жаропрочности большинства легированных сталей [25, 26]. Уже на этапе проектирования и модернизации печей необходимо организовать горение газообразного топлива и расположение горелок так, которое обеспечивало бы достижения подвода необходимого количества теплоты парогазовой смеси при температуре материала труб реактора, не превышающей допустимых значений.

В данной работе изменение тепловых и аэродинамических параметров в радиационной секции за счет изменения расположения ярусов горелок рассмотрено для печи крекинга пропан-бутана. Кинетическая модель процесса пиролиза, предложенная Жоровым Ю.М. и др., в этом случае включает такие основные реакции [27]:



Разложение исходных компонентов сырья происходит за счет поглощения теплоты и поэтому для протекания этих реакций необходимо подвести теплоту в трубчатый экран. При крекинге пропан-бутана выход этилена меньше, чем при крекинге этана и может достигнуть 30,2 % по массе, однако происходит хорошее образование пропилена (до 15,2 %). В пирогазе до 1,3 % по массе составляет водород. Конверсия исходного сырья при пиролизе достигает значений 85...90 %.

В ходе протекания крекинга первичных углеводородов возникает еще ряд промежуточных реакций, которые приводят к возникновению ароматических углеводородов. Конденсация ароматических углеводородов приводит к образованию кокса. Максимальный выход целевых продуктов - этилена и пропилена получается только при своевременном прекращении развития вторичных реакций. Для этого продукты пиролиза после выхода из трубчатого реактора в закалочно-испарительных аппаратах резко охлаждают до температур 350...470 °С.

Если не обеспечивать оптимальный подвод теплоты пирозмеевикам в радиационной секции печи относительное количество целевых продуктов уменьшается. Поэтому еще на этапе проектирования печи надо подобрать подходящие типы горелок и предусмотреть их расположение в камере радиации, обеспечивающее равномерное распределение тепловых потоков по длине пирозмеевика. Этого можно добиться при использовании метода теплового расчета установок, который обеспечить прогнозирование локальных тепловых параметров в камере радиации. Проектировщики до сих пор в основном пользуются методами суммарного теплового баланса, основанного на использовании опытных данных. В данной работе для теплового расчета применяется собственный пакет программ [1].

Радиационная секция печи почти симметрична относительно трубчатого экрана, поэтому задача сложного тепло и массообмена решается отдельно для каждой четверти камеры по отдельности. Трубчатый экран в наших расчетах рассматривается как твердая стенка с эффективной излучательной способностью 0,79 [1]. Общая толщина футерованных многослойных стен радиационной секции составляет 0,31 м, эффективный коэффициент теплопроводности - 0,35 Вт/(м·К). При расчетах потерь теплоты через ограждающие конструкции температуру наружных поверхностей камеры задали равной 40°С. Излучательная способность внутренних поверхностей футеровки принята равной 0,67.

Вклад в теплообмен в топочной камере вносят излучение, вынужденная конвекция, турбулентная теплопроводность и тепловыделения за счет горения топлива:

$$\frac{D}{Dt} (U + \frac{\rho \bar{u}^2}{2}) = \text{div} \mathbf{q}_R + \text{div} \mathbf{q}_c + \text{div} \mathbf{q}_{te} + \text{div} \mathbf{q}_{ch}. \quad (1)$$

где U – внутренняя энергия продуктов сгорания; $\bar{\mathbf{u}}$ – вектор осредненной по времени скорости; ρ – средняя плотность газовой смеси; $\text{div} \mathbf{q}_R$, $\text{div} \mathbf{q}_c$, $\text{div} \mathbf{q}_{te}$, $\text{div} \mathbf{q}_{ch}$ – дивергенции векторов плотности лучистого, конвективного, кондуктивного потоков и химической теплоты сгорания топлива.

Основное значение при расчете сложного теплообмена в камерах радиации имеет дивергенция лучистого потока, входящая в правую часть уравнения энергии (1) и объемная плотность тепловыделений в областях горения газозвушной смеси.

Для вычисления дивергенция радиационных потоков $\text{div} \mathbf{q}_R$, которая входит в уравнение сохранения энергии (1) в наших расчетах в каждом спектральном диапазоне решается уравнение переноса излучения, получаемое в методе дискретных ординат [28]:

$$\mu_m \frac{\partial I_m^k}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m^k}{\partial y} = \alpha_\lambda \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} I_{b\lambda} d\lambda - (\alpha_k + \beta_k) I_m^k + \frac{\beta_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_a} w_{m'} \phi_{m'm} I_{m'}^k. \quad (2)$$

В то же время температурное поле формируется и в зависимости и от двух других слагаемых правой части уравнения (1), т.е. от особенностей поля скоростей. Поле скоростей получается в результате решения уравнения движения, которое в векторной форме имеет вид

$$\rho (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} = -\nabla p - \left[\nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}^{(l)} \right] - \left[\nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}^{(T)} \right] + \bar{\mathbf{f}}, \quad (3)$$

где $\bar{\boldsymbol{\tau}}^{(l)}$ – тензор вязких напряжений; $\bar{\boldsymbol{\tau}}^{(T)}$ – тензор напряжений Рейнольдса; $\bar{\mathbf{f}}$ – массовые силы.

В нашей работе [29] было показано, что с достаточной для инженерных расчетов точностью большинство интересующих вопросов тепло- и массообмена в камерах радиации трубчатых печей малой ширины можно исследовать в двухмерной постановке.

Объемная плотность тепловых выделений q_{ch} при сгорании газового топлива определяется решением уравнений переноса отдельных компонент смеси, записанных в обобщенном виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_{\phi}. \quad (4)$$

Вычисление эффективных коэффициентов вязкости μ_{ef} и переноса Γ_{ϕ} производится в результате решений уравнений модели турбулентности в приближении k - ϵ , которые также имеют обобщенный вид (4). Представленная система уравнений дополняется уравнением неразрывности турбулентного течения продуктов сгорания и уравнением состояния смеси газов:

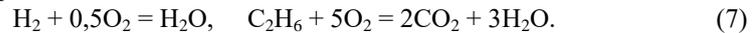
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad p = \frac{\rho}{\mu_{mix}} RT. \quad (5)$$

В системе уравнений (1-5) использованы такие обозначения: u, v – осредненные компоненты скорости турбулентного течения газов вдоль принятых осей x и y ; I_m^k – в пределах k -й полосы оптического спектра среднее значение интенсивности излучения вдоль определенных направлений $S_m \{m = 1, N_o\}$, которые задаются набором угловыми координатами $\{\mu_m, \xi_m\}$; $I_{bl}(T)$ – интенсивность излучения абсолютно черного тела осредненная по Планку в пределах k -й спектральной полосы при температуре T ; α_k, β_k – средние значения в пределах полосы коэффициенты поглощения и рассеяния излучения; w_m – весовые коэффициенты [28]; $\phi = \{k, \epsilon, m_{CH_4}, m_{H_2}, m_{C_2H_6}, m_{CO}, m_{O_2}, m_{H_2O}, m_{CO_2}\}$; k, ϵ – кинетическая энергии турбулентных пульсаций и скорость ее диссипации; $m_{CH_4}, m_{H_2}, m_{C_2H_6}, m_{CO}, m_{O_2}, m_{H_2O}, m_{CO_2}$ – массовые концентрации метана, водорода, этана, окиси углерода, кислорода воздуха, водяных паров и двуокиси углерода; p – статическое давление, μ_{mix} – эффективная молярная масса смеси газов; R – газовая постоянная универсальная.

Спектральные коэффициенты поглощения компонентов продуктов сгорания зависят от распределения объемных долей водяного пара, двуокиси углерода и в меньшей степени окиси углерода в топочном объеме. Вычисление количества указанных компонент газа производилось применением модели полного сгорания метана в две стадии:



и уравнений горения водорода и этана:



В ходе итерационного процесса решения дискретных аналогов указанных уравнений уравнение (2) решался в каждом диапазоне спектральной модели широкой полосы, с учетом полос 1,5; 2,7; 6,3; 10 мкм спектра излучения H_2O и 2,7; 4,3; 15 мкм CO_2 . Перекрывающиеся спектральные полосы 2,7 мкм H_2O и CO_2 объединили. Уравнение (2) решался также для оставшейся суммарной прозрачной для излучения полосы в пределах от 0,5 до 20 мкм. По результатам этих расчетов в каждом контрольном объеме разностной сетки вычислены интегральные плотности потоков теплового излучения.

Для замыканий системы уравнений (1-5) для каждого из них надо поставить граничные условия, которые обсуждены в работах [1, 3]. Детальное обоснование применения указанных уравнений для моделирования топочных процессов со ссылками на первоисточники и подробное описание методов их численного интегрирования также имеется в [1, 3].

Используемые в исследуемой печи горелки являются с естественной тягой. Синтез газ для горения и воздух подается из окружающей среды. Тепловая мощность горелок регулируется за счет изменения давления подачи топлива. Перед горелками номинальное избыточное давление должно составить около 15 МПа. Расход воздуха регулируется воздушными заслонками. За счет тяги дымососа печи в радиантной камере создается пониженное давление примерно на 1,2 кПа.

Расход сырья – пропан-бутана, подаваемого на всю печь $G_c = 4,53$ кг/с; пара разбавления – 2, 25 кг/с. Температура парогазовой смеси на входе в пирозммеевик – 650

°С. Температура пирогаза на выходе из пиролизеовика – 835 °С. Расход топливного газа на печь – 0,93 кг/с.

При двухмерных тепловых расчетах выходные отверстия ряда горелок рассматривались в виде сплошной плоской щели вдоль оси z , обеспечивающие такой же расход смеси топлива и воздуха, как и у горелок всего ряда. Такое предположение позволяет получить вполне реалистические значения температуры и скоростей дымовых газов в радиационной секции. Температура дымовых газов при переходе из радиационной секции в конвекционную, полученная расчетным путем хорошо согласуются с измеренными значениями в действующей установке. Даже в этом случае из-за значительного количества входов для топливозвоздушной смеси при численном интегрировании разностных аналогов системы дифференциальных уравнений возникает расходимость решений. Устойчивость решения получается только при использовании метода нижней релаксации практически для всех уравнений. Удовлетворительная сходимость решений достигается после четырех тысяч итераций.

Результаты (Results)

С помощью описанного выше пакета прикладных программ, выполнены численные исследования особенностей тепловых и аэродинамических параметров в радиационной секции печи пиролиза пропан-бутана для двух вариантов расположения горелок. На рисунке 2 представлено поле температуры в камере радиации печи с несимметричным расположением настенных горелок.

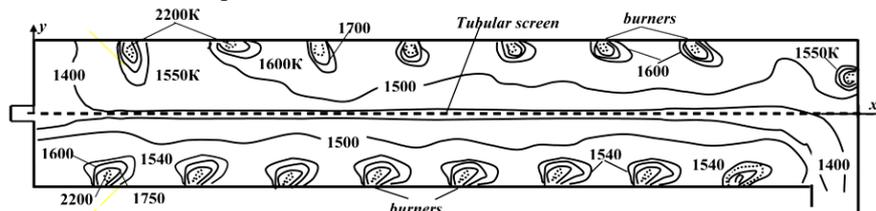


Рис. 2. Вид изотерм в камере радиации с несимметричным расположением горелок
Fig. 2. View of isotherms in the radiation chamber with an asymmetrical arrangement of burners

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В правой половине камеры, как и в действующей печи восемь ярусов горелок установлены на боковой стене (на рис. 2 эта часть показана внизу). В исследовательских целях в левой половине секции один ряд горелок попробовали переместить на свод, а остальные семь рядов горелок остались на боковой стенке. На рис. 3 показаны графики, показывающие характер изменения температуры продуктов сгорания по высоте камер радиационной секции, на разных расстояниях y от центрального трубчатого экрана в двух половинах секции печи.

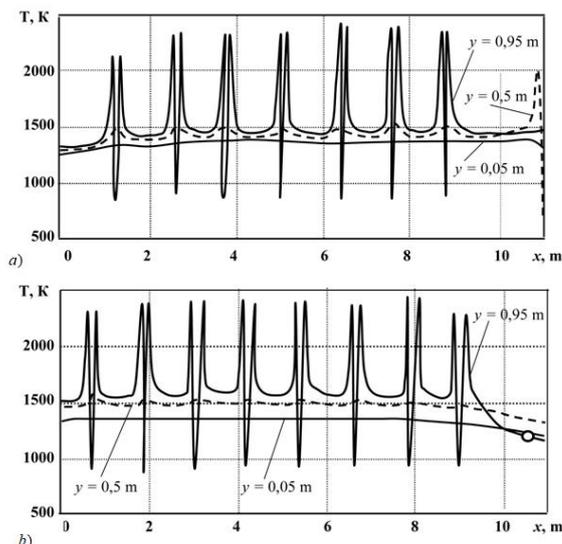


Рис. 3. Характер изменения температуры газов по высоте камеры радиации на разных расстояниях y от пиролизеовиков: a – в левой половине камеры; b – в правой половине; \bullet – температура дымовых газов на выходе из камеры радиации, измеренная по датчикам действующей установки

Fig. 3. The nature of the change in the temperature of gases along the height of the radiation chamber at different distances y from the pyro-coils: a – in the left half of the chamber; b – in the right half; \bullet – the temperature of the flue gases at the outlet of the radiation chamber, measured by the sensors of the current installation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Вид рисунков 2 и 3 четко показывает, что при установлении большого количества горелок малой мощности, расположенных в нескольких ярусах в радиантной камере поле температуры получается весьма неравномерным. Температура продуктов сгорания меняется как по высоте и ширине камеры радиации, так и по ее глубине вдоль оси z . Непосредственно при выходе из горелок температура смеси топливного газа и воздуха еще низкая. В небольшом объеме факела температура резко повышается, однако не достигает значений адиабатной температуры. Затем за счет отдачи теплоты за счет излучения и перемешивания дымовыми газами из более отдаленных областей камеры температура плавно уменьшается. В коробе для перехода дымовых газов из камеры радиации в конвекционную секцию печи температура наименьшая.

На рисунке 3 б) в виде кружочка показана температура продуктов сгорания $t_g \approx 1150$ °С, измеренная штатной термопарой действующей установки во время режимно-наладочных испытаний. Значение температуры во время этих работ менялось в диапазоне от 1146 до 1165 °С. По результатам расчетов температура дымовых газов поперек переходного канала меняется в пределах 1147-1171 °С. Видно достаточно хорошее соответствие наших расчетных значений с опытными значениями.

Как это видно на рисунках 2 и 3 наибольшие градиенты температуры продуктов сгорания возникают около мест размещения настенных горелок. При этом около стен левой и правой половин камеры радиации в данном случае поля температуры отличаются. В камере действующей установки они были практически одинаковыми. Ближе к трубам пирозмеевика возникает почти одинаковая температура продуктов сгорания.

За пределами теплового пограничного слоя у пирозмеевика температура дымовых газов находится в диапазоне 1418..1465 К (1145...1192 °С). На расстоянии 0,5 м от трубчатого экрана в правой половине камеры температура на уровне 1500 К, а в левой половине изменяется от 1380 до 2220 К. Это во первых связано с расположением нижнего яруса горелок выше, чем в правой половине камеры и размещением на своде камеры ряда горелок. В коробе для перехода в конвекционную секцию печи температура продуктов сгорания снижается до 1423 К, что хорошо согласуется с показаниями термопар на действующей установке ТЗ (≈ 1150 °С), полученными во время пуско-наладочных работ.

На рисунке 4 показаны графики изменения температуры внутренних поверхностей футеровки боковых стен по высоте радиационной камеры. На этом же рисунке представлен график изменения температуры дымовых газов за пределами теплового пограничного слоя левой боковой стенки T_s .

Температуры поверхностей T_{w1} и T_{w2} левой и правой стен несколько отличаются, что связано с разным расположением ярусов горелок. Разрывы графиков связаны с поступлением из горелок относительно холодной газозвоздушной смеси. Только в небольших объемах части факелов температура продуктов сгорания приближается к адиабатной температуре горения.

Температура T_{w2} внутренней поверхности боковой стенки правой части камеры радиации колеблется около значения 1400К, несколько снижаясь между рядами горелок и к выходу. Температура левой поверхности T_{w1} изменяется от значения 1280 К у пода камеры до 1550 К ближе к ярусам горелок. Температура стенок непосредственно у труб горелок существенно ниже.

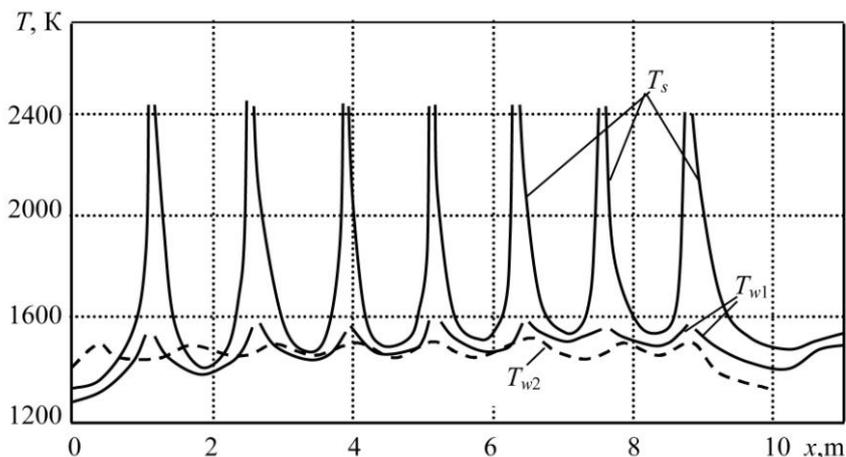


Рис. 4. Температура внутренней поверхности боковых футеровок камеры Fig. 4. The temperature of the inner surface of the side linings of the camera

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам расчетов построены изолинии функций тока, в сечении x у радиационной секции, проходящей через оси центральных труб настенных горелок, которые представлены на рисунке 5.

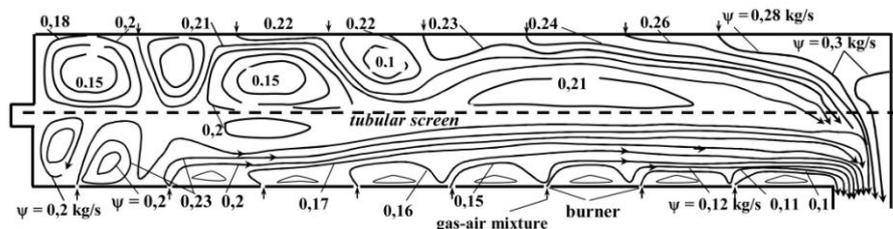


Рис. 5. Вид изолиний функций тока в камере радиации Fig. 5. View of streamline functions in the radiation chamber

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка 5 видно, что в радиационной секции возникает сложное поле течения продуктов сгорания с присутствием обратных зон течений в областях между ярусами горелок. Образование зон обратных течений около мест установления горелок обеспечивает устойчивость горения топливного газа в воздухе. Значительно большие зоны обратных течений образуются у пода радиационной камеры, пирозмеевиков на высоте расположения 3-го ряда снизу горелок правой половины и на уровне 5-го, 6-го ярусов левой половины топочного объема. Эти зоны и обеспечивают относительно равномерное поле температуры около труб змеевиков. Значения скорости продуктов сгорания в большинстве областей радиационной камеры находятся в пределах $0,5 \dots 1,5$ м. Имеется незначительное сходство между полями скоростей и температуры, что указывает на небольшое влияние конвективного переноса теплоты при формировании поля температуры.

На рисунке 6 показаны графики изменения поверхностных плотностей суммарных (лучистых и конвективных) тепловых потоков по высоте трубчатого экрана в радиационной секции исследованной в данной работе печи (сплошная линия) и действующей установки (штриховая линия). Как показали предыдущие наши исследования [1-3], распределения плотностей радиационных тепловых потоков мало отличаются от представленных графиков.

Из рисунке 6 видно, что при установке большого количества горелок малой мощности с их расположением в значительном количестве рядов (в данном случае по 8 ярусов в каждой половине камеры) получается достаточно равномерное распределение суммарных тепловых потоков по высоте трубчатого экрана. При расположении одного ряда горелок на своде левой половины радиационной секции приводит к увеличению тепловых потоков к трубам змеевиков в верхней части камеры. В то же время внизу камеры радиации тепловые потоки меньше, чем при расположении всех горелок на боковых стенах. Это видимо, связано с нахождением нижнего яруса горелок на большем расстоянии от пода камеры. Уменьшение поверхностных плотностей тепловых потоков внизу камеры и у свода объясняется сравнительно низкой температурой поверхности пода и свода камеры, которая уменьшается с увеличением расстояния нижнего ярусов горелок от их поверхностей.

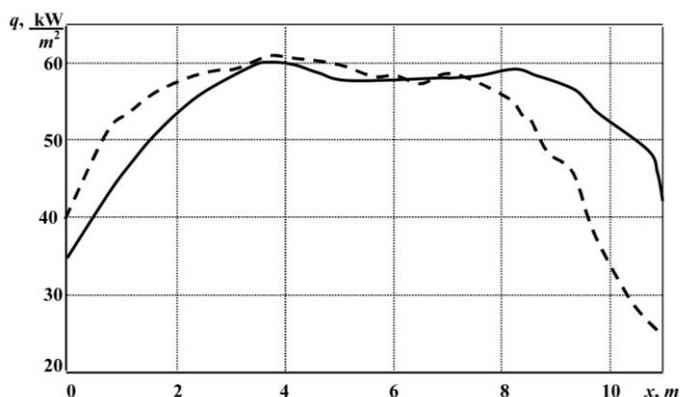


Рис. 6. Изменение поверхностных плотностей теплового излучения по высоте трубчатого экрана Fig. 6. Distribution of surface densities of heat fluxes along the height of the tubular screen

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам расчетов получили следующие суммарные данные: мощность ввода теплоты в камеру радиации топливом – 0,13 МВт; теплота воздуха на горение – 0,043 МВт; мощность тепловыделений при сгорании топлива – 44,15 МВт; расход теплоты на нагрев и проведение эндотермических реакций в пирозмеевиках – 21 МВт; мощность потери теплоты в окружающую среду через стенки камеры радиации - 0,41 МВт, а с уходящими газами из печи – 0,476 МВт. Остальная часть теплоты расходуется в конвекционной секции. Представленные данные удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными действующей установки. Потери теплоты через многослойные стенки радиационной камеры составляют 0,93% от полезно используемой теплоты, что в 2 раза меньше, если в данной печи использовали бы акустические или веерные горелки настильного пламени.

Во время пуско-наладочных работ были проведены замеры объемной доли углекислого газа и кислорода в дымовых газах газоанализатором TESTO-350, которые составили 0,15 и 0,02 соответственно. Содержание CO_2 соответствует расчетному значению, а содержание O_2 примерно два раза больше. Это можно объяснить с присосами воздуха через небольшие щели гляделок в конструкции ограждающих поверхностей камеры и превышением коэффициента избытка воздуха от заданного значения 1,1. Измерения также показали наличие незначительного количества CO – 0,0004...0,0018 ppm, что говорит о наличии небольшого недожога топливного газа.

Обсуждение (Discussions)

Проведенные расчеты показывают, что применение большого количества горелок небольшой мощности, расположенных в нескольких рядах, все равно не обеспечивает полного равномерного поля температуры в объеме камеры радиации, в то же время температура дымовых газов в основном сильно изменяется только в непосредственной близости от горелок. Когда применяются более мощные горелки настильного сжигания топлива такой же общей теплопроизводительности, например, шести акустических горелок в двух ярусах на одной боковой стене [1], тем более при установке мощных инжекционных подовых горелок, температурное поле и распределение тепловых потоков по трубчатому экрану получаются сильно неравномерными. Расчеты показывают также, что для увеличения тепловых потоков к трубчатому экрану в нижней части камеры радиации нижний ряд горелок надо расположить ближе к поду камеры. Можно продумать возможность расположения одного ряда горелок непосредственно на поде камеры.

Применение большого количества горелок малой мощности уменьшает области факелов с высокими температурами, это способствует снижению образования окислов азота.

Чтобы трубчатая печь пиролиза пропан-бутана функционировала в установленном режиме, необходимо систематически следить за плотностью обшивки печи и во время устранять возможные присосы воздуха. Увеличение коэффициента избытка воздуха на 0,1 приведет к росту потери теплоты с дымовыми газами от 0,4 до 0,8 %. Необходимо также своевременно проверить исправность контрольно-измерительных приборов и периодически измерить температуру уходящих дымовых газов, так как повышение их температуры на 10...15 °С приводит к росту потерь теплоты с уходящими газами на 0,6...0,8 %. Увеличение температуры уходящих дымовых газов может происходить из-за загрязнения наружных поверхностей змеевиков в результате химического недожога газообразного топлива. Из-за этого уменьшится подвод теплоты нагреваемому продукту в змеевиках радиационной секции, что приведет к снижению выхода целевых продуктов.

Литература

1. Данил Вафин. Сложный теплообмен / Радиационный теплообмен в энергетических установках /Д.Б. Вафин. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing,. ISBN: 978-3-8433-1124-3, 2011. – 250 с.
2. Ермоласва В.А., Семочкина К.Ю. Расчет технологических характеристик трубчатой печи // International Journal of Humanities and Natural Sciences . 2021. v.10-1. - P. 220-222.
3. Vafin D.B. Thermal Regime of the Radiative Chamber of the Butane-Propane Pyrolysis Furnace // AIP Conference Proceedings_V 2402 (15/11/21).
4. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия вузов: Проблемы энергетики.– 2022, - т. 24, № 3, С.198-210.
5. Khujaev P. Radiative heat transfer in the furnace with variable volume // Bulletin of Science and Practice. 2018. v. 4. N 11. – P. 248-253.
6. Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., Gudkov A.G. Winter greenhouse combined heating system // Magazine of Civil Engineering. 2020. 95(3). – P. 131-139.
7. Веткин А.В., Сурис А.Л. Исследование теплотехнических и экологических

- характеристик процесса горения газообразных топлив// Теплоэнергетика. – 2015, №3, С. 62 – 66.
8. Filla M. Prediction of the radiative heat transfer in pyrolysis furnace by exact and approximate methods//Riv. Combust. -1980. -v.34, N9-12. – P. 373-382.
 9. Кулешов О.Ю., Муслимов Е.И. Седелкин В.М. Математическое моделирование зонального и локального результирующего теплообмена в экранированных топках // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. т. 5. №2. – с. 78-83.
 10. Блох А.Г., Журавлев Ю.А, Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
 11. Abdullin A.M., Vafin D.B. Numerical simulation of local heat transfer in furnaces of tube chambers using the differential approximations for radiative heat transfer//Journal of Engineering Physics. 1991. v.60. N2.- P. 237-242.
 12. Tencer, J.T. Error Analysis for Radiation Transport / Dissertation doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin, 2013. – 142 p.
 13. Вафин Д.Б., Садыков А.В., Бутяков М.А. Сравнительные характеристики трубчатых печей с инжекционными и акустическими горелками // Известия вузов: Проблемы энергетики.– 2015. - № 1-2, С.68 - 75.
 14. Вафин. Д.Б., Бутяков М.А. Трехмерное моделирование работы акустических горелок в трубчатых печах// Известия вузов: Проблемы энергетики.– 2016. - № 9 - 10, С.48 - 55.
 15. Садыков А.В., Бутяков М.А. К решению уравнения переноса излучения методом дискретных ординат// Известия вузов: Проблемы энергетики.– 2017. – т.19, № 5 – 6. С.25 - 534
 16. Декстерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы σ -Flow для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. 2003. т.8. Ч.1. С. 250.
 17. Askarova A.S., Bolegenova S.A. Maximov V.Y., Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. 2015. v. 53. N5. P. 751-757.
 18. Xiangcum Qi, Mo Yang, Yuwen Zhang. Numerical analysis of NOx production under the air staged combustion. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, 3 (2017). DOI: 10.5098/hmt.8.3.
 19. Oyewola O.M., Ismail O.S., Bosomo J.O. Numerical simulations of the turbulence in the thermal-radiation flow field. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, (2022). DOI: 10.5098/hmt.17.8.
 20. Sebastian E., Georg L., Kai S., Gabor J., Dominique T. Optimal tube bundle arrangements in side-fired methane steam reforming furnaces. Frontiers in Energy Research. 2020. v. 8. Article 583346.
 21. Miroslav R., Andreii K., Marcel F. and others. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. Processes 2020, 8, 469; doi: 10.3390/pr8040469.
 22. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2022. – т. 24, №1. С. 86- 98.
 23. Хайрутдинов И.Р. К вопросу оптимизации процесса пиролиза углеводородного сырья и эффективного использования получаемых продуктов // Бутлеровские сообщения. – 2009. – т.17, №6. – С. 53-59.
 24. Vafin D.B., A.V. Sadykov A.V. Thermal calculation of the radiation chamber of an ethane pyrolysis furnace. JOP Conf. Series: Materials and Engineering 862 062008 (2020).
 25. Litventsev I Pyrolysis // The Chemical Journal, 2006.- v.5. P. 42-46.
 26. Afanasiev S.V., Ismaylov O.Z., Pyrkin A.V. et.al. Structural heterogeneity of reaction pipes from austenitic hightemperature alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 022049. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/537/2/022049.
 27. Долганов И.М., Бунаев А. А. Математическое моделирование пиролиза пропан-бутановой фракции с учетом накопления кокса // Neftegaz.RU. – 2020. - №3. – С. 17-20.
 28. Fiveland W.A. Discrete-ordinate solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures // Trans.ASME: J. Heat Transfer. 1984. v.106, N4. P. 699-706.
 29. Вафин Д.Б., Бутяков М.А. Трехмерное поле температуры и скорости в топках трубчатых печей с акустическими горелками // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2017. -№2. - С. 49-55.

Авторы публикации

Вафин Данил Биалович – д-р. техн. наук, профессор кафедры Промышленной теплоэнергетики и теплоснабжения, Казанского государственного энергетического университета.

Ваньков Юрий Витальевич - д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Промышленной теплоэнергетики и теплоснабжения, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Danil Vafin. Complex heat transfer / Radiation heat transfer in power plants. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing,. ISBN: 978-3-8433-1124-3, 2011. – 250 c.
2. Ermolaeva V.A., Semochkina K.Yu. Calculation of technological characteristics of a tube furnace // International Journal of Humanities and Natural Sciences . 2021. v.10-1. - P. 220-222.
3. Vafin D.B. Thermal Regime of the Radiative Chamber of the Butane-Propane Pyrolysis Furnace // AIP Conference Proceedings_V 2402 (15/11/21).
4. Vafin D.B. Thermal and aerodynamic parameters of the radiation chamber of the hydrocarbon pyrolysis furnace // News of universities: Energy problems.– 2022, - vol. 24, no. 3, pp. 198-210.
5. Khujayev P. Radiative heat transfer in the furnace with variable volume // Bulletin of Science and Practice. 2018. v. 4. N 11. – P. 248-253.
6. Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., Gudkov A.G. Winter greenhouse combined heating system // Magazine of Civil Engineering. 2020. **95(3)**. – P. 131-139.
7. Vetkin A.V., Suris A.L. Investigation of thermal engineering and environmental characteristics of the process of combustion of gaseous fuels// Thermal power engineering. - 2015, No. 3, P. 62 - 66.
8. Filla M. Prediction of the radiative heat transfer in pyrolysis furnace by exact and approximate methods//Riv. Combust. -1980. -v.34, N9-12. – P. 373-382.
9. Kuleshov O.Yu., Muslimov E.I. Sedelkin V.M. Mathematical modeling of zonal and local resulting heat transfer in shielded furnaces // Dynamics of systems, mechanisms and machines. - 2017. v. 5. No. 2. - P. 78-83.
10. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov L.N. Heat transfer by radiation: a handbook. - M.: Energoatomizdat, 1991. - 432 p..
11. Abdullin A.M., Vafin D.B. Numerical simulation of local heat transfer in furnaces of tube chambers using the differential approximations for radiative heat transfer//Journal of Engineering Physics. 1991. v.60. N2.- P. 237-242.
12. Tencer, J.T. Error Analysis for Radiation Transport / Dissertation doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin, 2013. – 142 p.
13. Vafin D.B., Sadykov A.V., Butyakov M.A. Comparative characteristics of tube furnaces with injection and acoustic burners // News of universities: Energy problems - 2015. - No. 1-2, P.68 - 75.
14. Vafin. D.B., Butyakov M.A. Three-dimensional modeling of the operation of acoustic burners in tube furnaces // News of universities: Energy problems.– 2016. - No. 9 - 10, P.48 - 55.
15. Sadykov A.V., Butakov M.A. To the solution of the radiation transfer equation by the method of discrete ordinates // News of universities: Energy problems.– 2017. – v.19, No 5 – 6. P.25 - 534
16. Dektarev A.A., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Litvintsev K.Yu. Using the \square -Flow program for numerical research of technological objects // Computational Technologies. 2003. vol.8. Part 1. p. 250.
17. Askarova A.S., Bolegenova S.A. Maximov V.Y., Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. 2015. v. 53. N5. P. 751-757.
18. Xiangcum Qi, Mo Yang, Yuwen Zhang. Numerical analysis of NOx production under the air staged combustion. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, 3 (2017). DOI: 10.5098/hmt.8.3.
19. Oyewola O.M., Ismail O.S., Bosomo J.O. Numerical simulations of the turbulence in the thermal-radiation flow field. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, (2022). DOI: 10.5098/hmt.17.8.
20. Sebastian E., Georg L., Kai S., Gabor J., Dominique T. Optimal tube bundle arrangements in side-fired methane steam reforming furnaces. Frontiers in Energy Research. 2020. v. 8. Article 583346.
21. Miroslav R., Andreii K., Marcel F. and others. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. Processes 2020, 8, 469; doi: 10.3390/pr8040469.
22. Solov'ev S.A., Solov'eva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Yu.V., Shakurova R.Z. Numerical study of thermal conductivity of composite thermal insulation material with microgranules // News of universities. Energy problems. – 2022. – vol. 24, No. 1. P. 86-98.
23. Khairutdinov I.R. On the issue of optimizing the pyrolysis process of hydrocarbon raw materials and the effective use of the resulting products // Butlerovskie messages. - 2009. – vol.17, No. 6. – pp. 53-59.
24. Vafin D.B., A.V. Sadykov A.V. Thermal calculation of the radiation chamber of an ethane pyrolysis furnace. JOP Conf. Series: Materials and Engineering **862** 062008 (2020).
25. Litventsev I Pyrolysis // The Chemical Journal, 2006.- v.5. P. 42-46.
26. Afanasiev S.V., Ismaylov O.Z., Pyrkin A.V. et.al. Structural heterogeneity of reaction pipes from austenitic hightemperature alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 022049. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/537/2/022049.
27. Dolganov I.M., Dunaev A. A. Mathematical modeling of pyrolysis of propane-butane fraction taking into account coke accumulation// Neftgaz.RU. – 2020. –No 3. – P. 17-20.
28. Fiveland W.A. Discrete-ordinate solutions of the radiative transport equation for rectangular enclosures // Trans.ASME: J. Heat Transfer. 1984. v.106, N4. P. 699-706.

© Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В.

29. Vafin D.B., Butakov M.A. Three-dimensional field of temperature and velocity in furnaces of tubular furnaces with acoustic burners // Bulletin of the Tupolev KSTU. – 2017. -No. 2. - P. 49-55.

Authors of the publication

Danil B. Vafin - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено ***05.04.2023 г.***

Отредактировано ***31.05.2023 г.***

Принято ***04.10.2023 г.***

Сдано в набор 15.10.2023 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 27.12.2023 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5293
Дата выхода в свет 30.12.2023 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

