

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*

(24) 1 / 2022

POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY

Scientific & Technical Journal

Известия вузов. 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	PIETRO ZUNINO
Заместитель главного редактора	АХМЕТОВА И.Г.
Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
Редактор	БАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Свидетельство о регистрации СМИ:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.
Подписка:	Каталог интернет - подписки «Почта России» - индекс П6740
Сайт:	https://www.energyret.ru/
Издатель:	Казанский государственный энергетический университет
Адрес издателя:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Адрес редакции:	420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51
Тел./факс:	+7 (843) 527-92-76
Email:	problems_ener@mail.ru
Типография:	ИПК «БРИГ», г.Казань,
Адрес типографии:	420097, г. Казань, ул. Академическая, д.2, ОФИС 009

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2022
Т.24, № 1
Январь-февраль
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 работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

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. Язык публикаций: русский, английский.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АРАКЕЛЯН Э.К.
БУХМИРОВ В.В.
ГУМЕРОВ Ф.Х.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ИВШИН И.В.
ЛАПТЕВ А.Г.
ТЮТИКОВ В.В.
ЧИЧИРОВА Н.Д.
ЗВЕРЕВА Э.Р.
ЯКИМОВ Н.Д.
ФРОЛОВ В.Я.
РАССЫЛКИН А.С.

КОРОВКИН Н.В.
ВИНОГРАДОВ А.В.
ДОВГУН В.П.
СИНЮКОВА Т.В.
ЩИННИКОВ П.А.
MICHAIL KOLCUN
НИКОЛАЕВА Л.А.
САДЫКОВ М.Ф.
ДМИТРИЕВ А.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2022
Vol. 24, № 1
January-February
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**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: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

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. Language of publications: Russian, English.

Sections:

POWER ENGINEERING

ELECTRIC ENGINEERING

INSTRUMENT MAKING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES AND
SYSTEMS

Editorial board:

EDIK K. ARAKELYAN
VYACHESLAV V. BUKHMIROV
FARID M. GUMEROV
YURY V. VANKOV
IGOR V. IVSHIN
ANATOLY G. LAPTEV
VLADIMIR V. TYUTIKOV
NATALIYA D. CHICHIROVA
ELVIRA R. ZVEREVA
NIKOLAY D. YAKIMOV
VLADIMIR YA. FROLOV

NIKOLAY V. KOROVKIN
ALEXANDR V. VINOGRADOV
VALERY P. DOVGUN
TATYANA V. SINYUKOVA
PAVEL A. SHCHINNIKOV
MICHAIL KOLCUN
LARISA A. NIKOLAEVA
MARAT F. SADYKOV
ANDREY V. DMITRIEV
ALEXANDR I. FEDOTOV
ALEXANDR V. GOLENISHEV-
KUTUZOV

ANTON RASSÖLKIN

Address

Tel./fax:

Email:

Site:

Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Russian Federation

+7 (843) 527-92-76

problems_ener@mail.ru

<https://www.energyret.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИКА

БЫК Ф.Л., МЫШКИНА Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем.	3
ЗВЕРЕВА Э.Р., МАКАРОВА А.О., БАХТИЯРОВА Ю.В., КОРОЛЕВ В.И., ИЛЬИН Н.П., ТУРАНОВ А.Н., ЗУЕВА О.С. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива.	16
КОТИН Д.А., ИВАНОВ И.А. Использование однофазного синхронного многообмоточного генератора с постоянными магнитами для электроснабжения автономного потребителя.	29
ЛЕВИН В.М., ГУЖОВ Н.П., БОЯРОВА Д.А. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию. ...	39
МОТОВИЛОВ А.И., СОЛОВЬЕВ И.И. Повышение пропускной способности неоднородной электрической сети регулированием уравнивающей ЭДС.	52
ТРЕЩЁВА М.А., АНИКИНА И.Д., ТРЕЩЁВ Д.А. Обоснование мощности теплового насоса, используемого в системе охлаждения конденсатора паровой турбины ПГУ-ТЭЦ.	61
ЗВОНАРЕВА Ю.Н., АХМЕТОВА Р.В., ТУРСУНОВ К.И., ШОРОХОВ И.Р. Влияние принимаемых технических решений при эксплуатации энергетических систем в г. Ташкент. .	74
СОЛОВЬЕВ С.А., СОЛОВЬЕВА О.В., АХМЕТОВА И.Г., ВАНЬКОВ Ю.В., ШАКУРОВА Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами.	86
ПАЗУШКИНА О.В., ЗОЛИН М.В., СИЛКИН И.А. анализ работы деаэрационных устройств на производственной котельной.	99
ПЛОТНИКОВ Л.В., БРОДОВ Ю.М., ЖИЛКИН Б.П., ОСИПОВ Л.Е., ДЕСЯТОВ К.О. Спектральный анализ газодинамических характеристик пульсирующих потоков газа в выпускной системе поршневого двигателя.	114

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., КОЗЕЛКОВ О.В., МАЛАЦИОН А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока.	126
ДАДАБАЕВ Ш.Т., ГРАЧЕВА Е.И. Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов.	141

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИВАНОВ Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных изоляторах.	151
ГИБАДУЛЛИН Р.Р., НИЗАМИЕВ М.Ф., ИВШИН И.В., ЦВЕТКОВ А.Н., ВЛАДИМИРОВ О.В., ШАКУРОВА З.М. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты.	164

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ДМИТРИЕВ А.В., БАДРЕТДИНОВА Г.Р., БОРИСОВА С.Д., НИКОЛАЕВ А.Н. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси.	176
---	-----

К ОБСУЖДЕНИЮ

СИРОТКИН О.С., СИРОТКИН Р.О. К вопросу о современной трактовке смысла понятия «энергия» и ее свойств.	186
--	-----

C O N T E N T S

POWER ENGINEERING

BYK FL, MYSHKINA LS. Effects of local intelligent energy systems integration.	3
ZVEREVA ER, MAKAROVA AO, BAKHTIYAROVA YUV, KOROLEV VI, ILYIN NP, TURANOV AN, ZUEVA OS. Reuse of low sulfur oil residues as a base for boiler and marine fuel .	16
KOTIN DA, IVANOV IA. Using of a single-phase synchronous multi-winding generator with permanent magnets for the power supply of an autonomous consumer.	29
LEVIN VM, GUZHOV NP, BOYAROVA DA. On the issue of effectiveness of the oil production electrical equipment repairs management with a strategy for technical condition.	39
MOTOVILOV AI, SOLOVEJEV II. Increasing the transmission capacity an inhomogeneous electrical network by regulating the equalizing EMF.	52
TRESHCHEVA MA, ANIKINA ID, TRESHCHEV DA. Justification of the power of the heat pump used in the cooling system of the steam turbine condenser of the CCGT-CHP.	61
ZVONAREVA YN, AKHMETOVA RV, TURSUNOV KI, SHOROHOV IR. The impact of the technical decisions made in the operation of energy systems in Tashkent city.	74
SOLOVEV SA, SOLOVEVA OV, AKHMETOVA IG, VANKOV YV, SHAKUROVA RZ. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules.	86
PAZUSHKINA OV, ZOLIN MV, SILKIN IA. Analysis of the operation of deaering devices at the industrial boiler house.	99
PLOTNIKOV LV, BRODOV YM, ZHILKIN BP, OSIPOV LE, DESYATOV KO. Spectral analysis of gas-dynamic characteristics of pulsing gas flows in the exhaust system of a piston engine.	114

ELECTRICAL ENGINEERING

MALEV NA, POGODITSKY OV, KOZELKOV OV, MALACION AS. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical DC converter.	126
DADABAEV ST, GRACHEVA EI. Technical and economic justification for application of a soft start system for high-voltage electric motors of pumping units.	141

INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION MEASURING DEVICES AND SYSTEMS

IVANOV DA. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators.	151
GIBADULLIN RR, NIZAMIEV MF, IVSHIN IV, TSVETKOV AN, VLADIMIROV OV, SHAKUROVA ZM. A stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators.	164

TECHNOSPHERE SAFETY

DMITRIEV AV, BADRETDINOVA GR, BORISOVA SD, NIKOLAEV AN. Restoration of the heat exchange surface under conditions of its contamination during condensation of a vapor-gas mixture.	176
---	-----

TO THE DISCUSSION

SIROTKIN OS, SIROTKIN RO. On the issue of the modern interpretation of the meaning of the concept of «energy» and its properties.	186
--	-----

ЭФФЕКТЫ ИНТЕГРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Ф.Л. Бык, Л.С. Мышкина

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhina@gmail.com

Резюме: Энергетика России трансформируется, в след тотальной электрификации пришла газификация, кардинально изменившая топливный ландшафт и позволившая предприятиям различных сфер экономики создавать собственные источники энергии на основе газотурбинных и газопоршневых когенерационных установок. Все больше появляется сбалансированных локальных интеллектуальных энергосистем (ЛИЭС) различного назначения, чаще работающих автономно, так как процесс их объединения с ЕЭС России невозможен без выдачи мощности и энергии, что противоречит интересам генерирующих компаний, территориальных сетевых организаций и системного оператора. Преодоление созданных крупными игроками электроэнергетики административных и технологических барьеров и препятствий снижает техническую и экономическую эффективность ЛИЭС, способных приносить значимые полезные системные эффекты. **ЦЕЛЬ.** Обоснование получаемых системных эффектов от интеграции ЛИЭС **МЕТОДЫ.** Системный подход для выявления получаемых эффектов интеграции ЛИЭС с ЕЭС России. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** ЛИЭС рассматриваются в качестве объектов распределенной электроэнергетики, выполняющих определенные системные функции, что сопровождается изменением свойств надежность, экономичность и экологичность производства и передачи тепловой и электрической энергии, что обуславливает получение различных эффектов. Наличие и размер эффектов определяют видом и типом ЛИЭС. Показано, что определенными преимуществами обладает интеграция коммунальных ЛИЭС, созданных для энергоснабжения населения и приравненных к нему потребителей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Интеграция коммунальных ЛИЭС позволяет повысить доступность и бесперебойность электроснабжения, снизить негативное влияние вне рыночной надбавки и перекрестного субсидирования, повысить равномерность графиков нагрузки генерирующего и сетевого оборудования, что повышает эффективность ЕЭС России.

Ключевые слова: распределенная энергетика; локальная интеллектуальная энергосистема; теплоснабжение; электроснабжение; надежность; экономичность; экологичность; эффект.

Для цитирования: Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Эффекты интеграции локальных интеллектуальных энергосистем // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-3-15.

EFFECTS OF LOCAL INTELLIGENT ENERGY SYSTEMS INTEGRATION

FL. Byk, LS. Myshkina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5121-4143>, Lsmyskhina@gmail.com

Abstract: The energy sector of Russia is transforming, followed by total electrification and

gasification, which has radically changed the fuel landscape and allowed enterprises in various sectors of the economy to create their energy sources based on gas turbine and gas piston cogeneration plants. There are more and more balanced local intelligent energy systems for various purposes, more often operating autonomously, since the process of their integration with the unified energy system of Russia is impossible without power and energy output, which is contrary to the interests of generating companies, territorial grid organizations and the system operator. Overcoming the administrative and technological barriers and obstacles created by significant players in the electric power industry reduces the technical and economic efficiency of local intelligent energy systems that can bring considerable beneficial systemic effects. **THE PURPOSE** Substantiation of the obtained system effects from integrating local intelligent energy systems. **METHODS.** A systematic approach to identify the effects of the integration of local intelligent energy systems with the unified energy system of Russia. **RESULTS.** Local intelligent energy systems are considered objects of distributed electric power industry that perform certain system functions, which is accompanied by a change in the properties of reliability, efficiency and environmental friendliness of the production and transmission of heat and electricity, which leads to various effects. The presence and size of the effects are determined by the type and type of the local intelligent energy system. It is shown that the integration of communal local intelligent energy systems, created for the energy supply of the population and equivalent consumers, has a certain advantage. **CONCLUSION.** The integration of communal local intelligent energy systems makes it possible to increase the availability and uninterrupted power supply, reduce the negative impact of off-market surcharges and cross-subsidization, improve the uniformity of load schedules for generating and grid equipment, which increases the efficiency of the unified energy system of Russia.

Keywords: distributed energy; local intelligent energy system; heat supply; power supply; reliability; efficiency; environmental friendliness; effect.

For citation: Byk FL, Myshkina LS. Effects of local intelligent energy systems integration. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-3-15.

Введение

Новый энергетический переход (*Energy Transition*) часто называют «3D-моделью энергии», направленной на декарбонизацию, децентрализацию и цифровизацию [1], что должно позволить достигать целей устойчивого развития и повысит отечественный индекс Энергетической Трилеммы.

Индекс Энергетической Трилеммы отражает соответствие принятой в стране энергетической политики определенным целям. Эффективность энергетической политики оценивается по совокупности показателей, сгруппированных по трем направлениям:

1. Энергетическая безопасность.
2. Справедливый доступ к энергии (физическая и финансовая доступность).
3. Экологическая устойчивость.

Очевидно, что российская энергетическая политика разрабатывается в зависимости от своих внутренних условий, обусловленных природными ресурсами, географическим положением, социально-экономическими условиями и другими факторами, которые по субъектам РФ имеют кардинальные различия. Это важное отличие европейских стран и РФ, состоящей из субъектов сопоставимых по своим размерам и природно-климатическим условиям с некоторыми странами. Наличие существенных различий означает, что не существует единого, универсального пути для успешного энергетического перехода для всех регионов страны и необходимо для каждого из них определять собственный наилучший путь энергетической политики с учетом реальной ситуации и приоритетов, обеспечивающих устойчивое развитие субъектов РФ и страны в целом.

Однако это не означает, что органы законодательной и исполнительной власти каждого регионов не должны учиться друг у друга, узнавая, где и какая политика работает и при каких условиях может быть успешной и результативной, так как цель повышения эффективности производства тепловой и электрической энергии, энергосбережения при их передаче является общей. Очевидно, что региональная энергетическая политика может оказывать значимое влияние на потребителей, стимулируя их менять модель своего поведения на розничном рынке электроэнергии. Не

признавая роль федеральных органов власти, следует отметить, что от субъектов федерации во многом зависит достижение целей устойчивого развития регионов. Следует указать следующие цели, достижение которых определяет состояние региональной энергетики:

- обеспечение доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех;
- создание прочной инфраструктуры, включая содействие внедрению инноваций;
- обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов.

В качестве одного из направлений энергетического перехода в России и за рубежом рассматриваются включение в состав энергосистем объектов распределенной энергетики (ОРЭ), что позволяет добиться [2]:

- децентрализации производства электроэнергии;
- распространения инновационных технологий, направленных на повышение энергетической эффективности производства энергии и энергосбережения при ее передаче;
- формирования интеллектуальных энергосистем на основе использования цифровых технологий в системах управления;
- изменения модели поведения потребителей, стимулируя их трансформацию в активные субъекты рынка электроэнергии.

В качестве первых ОРЭ возникла малая распределенная генерация, работающая на углеводородном топливе и возобновляемых источниках энергии. Их включение в состав систем электроснабжения промышленных, коммерческих, сельскохозяйственных потребителей привело к появлению соответствующих интеллектуальных энергосистем хозяйствующих субъектов (ИЭС ХС), включающих генерацию тепловой и электрической энергии, тепловые и электрические сети, а также тепло и электроприемники, различной категории надежности.

Инвестиционная привлекательность ИЭС ХС обуславливается повышением технологической и экономической эффективности энергоснабжения. С появлением собственного источника электроэнергии повышается надежность электроснабжения, а кроме этого, снижаются затраты на приобретение электроэнергии с розничного рынка у энергосбытовых компаний. Последнее достигается за счет исключения оплаты услуг за передачу электроэнергии и надбавки от перекрестного субсидирования, которые влияют на стоимость электроэнергии, получаемой из систем централизованного электроснабжения. Приобретая определенную энергетическую независимость, многие хозяйствующие субъекты остаются присоединенными к электрическим сетям, переходя на комбинированное электроснабжение от собственных источников и централизованной системы, снижая объем закупаемой электроэнергии с розничного рынка.

Одновременно с появлением ИЭС ХС наблюдается процесс, когда на определенных территориях создаются сбалансированные локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС), способные обеспечить потребителей тепловой и электрической энергии в полном объеме и с требуемым уровнем надежности. ЛИЭС, создаваемые по причине технической невозможности их интеграции в состав ЕЭС России, принято называть изолированными энергосистемами. Однако в последнее время в зоне действия ЕЭС России можно наблюдать появление автономно функционирующих ЛИЭС, то есть в так называемом «островном» режиме. В этих случаях отсутствие электрической связи с системами централизованного электроснабжения в основном обусловлено экономическими причинами, например высокой стоимостью технологического присоединения потребителей к сетям и особенно в дефицитных энергорайонах, где нет достаточно объема свободных мощностей на центрах питания крупных ПС. Зачастую указанные затраты сопоставимы и даже превышают капиталовложений в создание ЛИЭС, даже с учетом необходимых резервов в генерации и в сетевом комплексе, расходов на создание интеллектуальных систем управления на основе цифровизации.

По оценкам рабочей группы «Энерджинет» Национальной технологической инициативы создание объектов распределенной энергетики, позволит до 2035 года добиться снижения цен на электроэнергию на 30–40% [2], и при этом повысить надежность электроснабжения потребителей. Однако этот процесс требует комплексных исследований технических, экономических и социальных аспектов.

Однако вопрос интеграции локальных интеллектуальных энергетических систем (ЛИЭС) в ЕЭС остается актуальным, как один из вариантов развития энергосистемы страны. Научно-теоретическая значимость данной работы состоит в определении эффектов от интеграции ЛИЭС, выявить, где и как это целесообразно осуществлять с позиций обеспечения доступа к недорогостоящим и надежным источникам энергии.

Цель исследования состоит в обосновании системных эффектов от интеграции

ЛИЭС, для достижения которой решались следующие задачи:

- Выявление эффектов, получением которых сопровождается интеграция локальных интеллектуальных энергосистем в ЕЭС России;
- Выбор технологических решений, обеспечивающих согласованность параллельной синхронной работы децентрализованной ЛИЭС с централизованной ЕЭС России.

За рубежом наиболее близким аналогом ЛИЭС являются микрогрид, но они принципиально различаются. В отличие от России, на западе доминирует ориентация на создании микрогрид на базе малой распределенной генерации работающей на возобновляемых источниках энергии. В российских условиях, особенно в регионах с резко континентальным климатом, для которых характерны большие амплитуды колебаний температур, продолжительные и очень холодные зимы, наиболее целесообразно использование когенерационных технологий, которые, как известно, на 30-50% эффективнее раздельного производства тепловой и электрической энергии [3]. В этом состоят отличия зарубежных исследований [4, 5, 6, 7, 8, 9] от российских [10, 11, 12]. Для отечественных ученых и специалистов возникает сложная проблема обеспечить доступ к недорогостоящему и надежному электро- и теплоснабжению, в сочетании с экологичным производством энергии.

Предметом исследований являются системные эффекты, которыми сопровождается интеграция ЛИЭС в состав ЕЭС, то есть сделана попытка выявить и оценить насколько повышается доступность, надежность и экологичность от их объединения. Практическая значимость полученных результатов позволит внести изменения для выполнения «Схем и программ перспективного развития электроэнергетики субъектов РФ» и «Схем теплоснабжения муниципальных образований».

Материалы и методы

В основе исследования лежит методология системного подхода с использованием методов системного анализа, теория управления изменениями и идея организации. Представление о вероятности и математической статистике, теории надежности, математических и имитационных методах моделирования играет важную роль в анализе полученных эффектов.

В данной работе локальные интеллектуальные энергосистемы рассматриваются как техническая система связанных объектов электроэнергетики, выполняющих функции электроснабжения в зоне своей деятельности. В состав ЛИЭС входит мини-ТЭЦ с электрической мощностью до 25 МВт, использующие в качестве первичного энергоресурса природный, попутный нефтяной, доменный, конверторный, коксовый, свалочный и другой газ. Ограничение на электрическую мощность связано с условием работы на розничном рынке. Генераторы мини-ТЭЦ работают с генераторным напряжением 10(6) кВ, что позволяет создавать ЛИЭС на основе сети 0,4–10 кВ, которую принято относить к распределительным сетям среднего и низкого напряжения.

Результаты и Обсуждение

Очевидно, что задача интеграции решается относительно ЛИЭС в зоне действия ЕЭС России и работающих в «островном» режиме. Основным отличием таких ЛИЭС от других объектов распределенной энергетики является их самодостаточность, обуславливающая возможность бездефицитной работы с требуемой балансовой и режимной надежностью как параллельно с ЕЭС, так и автономно.

Повышение надежности обеспечивается появлением двух нормальных работоспособных схемно-режимных состояний, что позволяют повысить бесперебойность электроснабжения потребителей, входящих в ЛИЭС.

Экономическая эффективность интеграции ЛИЭС в основном определяется:

- повышением доходов от продажи избытков электроэнергии энергосбытовыми компаниям, субъектам розничного рынка или сторонним потребителям, самостоятельно оплачивающих сетевым компаниям услуги за передачу электроэнергии;
- снижением расходов на топливо, так как при повышении загрузки когенерационных агрегатов выработка электроэнергии сопровождается дополнительным производством тепла, что снижает загрузку котельного оборудования, для сохранения заданного теплоснабжения.

Естественно, интеграция ЛИЭС ведет к сокращению объема поставок с оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ), где снизится загрузка менее эффективных угольных ТЭС. Системными эффектами будет снижение цены на электроэнергию на ОРЭМ и сокращение объемов вредных выбросов CO₂ в окружающую среду из-за снижения объема сжигаемого топлива. Поэтому реализация проектов по интеграции ЛИЭС во многом соответствуют ESG критериям, что повышает инвестиционную привлекательность технических решений по их присоединению к ЕЭС.

Очевидно, что размер указанных эффектов интеграции ЛИЭС различаются по

регионам. Это зависит от целей создания ЛИЭС, от используемых когенерационных технологий, видов топлива и других факторов. Важными являются соотношение затрат на производство электроэнергии и ее стоимости на розничном рынке, размер установленного тарифа на тепловую энергию и сложившиеся цены на используемое топливо, удаленность от районных центров питания (ЦП) и распределительных узлов (РУ) сети 10(6) кВ территориальной сетевой организации. Существенное значение имеет характер энергорайона, в который может быть интегрирована ЛИЭС - дефицитный или избыточный.

Очевидно, ощутимым преимуществом для интеграции имеют ЛИЭС, где выработка энергии осуществлена на газотурбинных и газопоршневых установках (ГТУ и ГПУ), а в качестве топлива используются промышленные, сельскохозяйственные отходы или побочные продукты основного производства. Обусловлено это полезным и значимым эффектом от дополнительной утилизации вторичных энергоресурсов, выброс которых наносит вред окружающей среде и, следовательно, сопровождается постоянно растущими экологическими сборами. Повышение экологичности ЛИЭС мотивирует хозяйствующих субъектов, создавших такие ЛИЭС, инвестировать либо в расширение производства, что сопровождается ростом электропотребления, либо интегрироваться в состав ЕЭС для выдачи избытков электроэнергии на розничный рынок. Например, для отечественных вертикально-интегрированных нефтяных компаний таким стимулом служит размер санкций за факельное сжигание попутного нефтяного газа (ПНГ), объем которых сокращается при дополнительном производстве и отпуске электроэнергии. Поэтому начиная с 2012 года, в России наблюдается рост доли утилизации ПНГ в технологических процессах, в том числе для производства электричества и тепла, рисунок 1 [13]. В настоящее время нефтедобывающие компании располагают ОРГ с суммарной установленной мощностью более 2 ГВт.

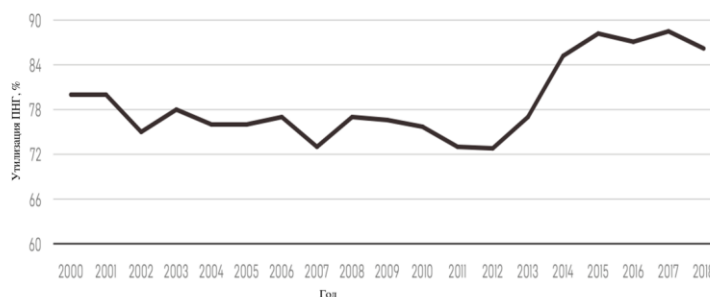


Рис. 1. Утилизация попутного нефтяного газа в технологических процессах, в том числе для производства электричества и тепла, %

Fig. 1. Utilization of associated petroleum gas in technological processes, including for the production of electricity and heat, %

Во многом неоднозначна целесообразность интеграции ЛИЭС, где для генерации электроэнергии используется природный газ. Очевидно, что большинство таких ЛИЭС находится в газифицированных регионах страны, где за последние годы коренным образом изменился топливный ландшафт. По итогам 2021 года, уровень газификации субъектов Российской Федерации составил 71% [14, 15, 16]. Целевым показателем является достижение 82,9 %: к 2035 году, что указано в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. №1523-р. На рисунке 2 показана доступность природного газа на территории России [15].

В регионах, находящихся в Сибирском, Уральском и Центральном Федеральных округах, где в силу климатических условий наблюдается высокий спрос на тепловую энергию, широкое распространение нашли газовые котельные различной мощности, в том числе от 20 до 100 Гкал/час. Соотношение спроса на тепловую и электрическую мощность в малых, средних, больших, крупных и крупнейших городах в указанных регионах составляет от 3:1 до 5:1. В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 31.12.2009 № 1221 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности товаров, работ, услуг при осуществлении закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» предусматривается их реконструкция, направленная на обязательный перевод на когенерационный режим работы. Поэтому следует ожидать роста числа мини-ТЭЦ, что позволит решить проблему неудовлетворительного морального и физического состояния котельных и осуществить переход к теплофикации на новой технологической основе.

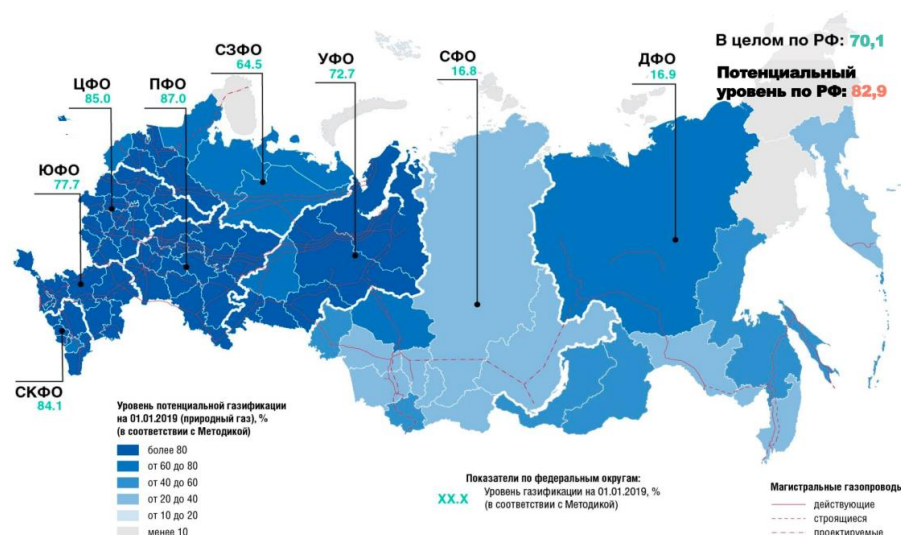


Рис.2. Уровень газификации в России на 1 января 2020 года

Fig. 2. The level of gasification in Russia as of January 1, 2020

Очевидно, что трансформация котельных в мини-ТЭЦ приведет к повышению энергоэффективности производства энергии и следовательно к сокращению расходов топлива. Значение коэффициентов полезного использования топлива (КПИТ) во многом зависит от режима загрузки когенерационных установок, чем выше их коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), тем выше КПИТ.

Зачастую субъекты, владеющие мини-ТЭЦ и тепловыми сетями, выполняют функции единой теплоснабжающей организацией (ЕТО) на определенной территории и одновременно являются субъектами розничного рынка электроэнергии в качестве производителя электроэнергии. В силу действующего на розничном рынке порядка розничным генераторам экономически более выгодно продавать электроэнергию конечным потребителям, а не гарантирующему поставщику, действующему в той же зоне, где расположены мини-ТЭЦ. Такое положение создает экономические предпосылки для создания коммунальных ЛИЭС, осуществляющих электроснабжение населения и приравненных к нему потребителей. Очевидно, чем выше размер установленного субъектами РФ тарифа для населения, тем экономически обоснованным является создание коммунальных ЛИЭС. В приведенной ниже таблице 1 показаны по пять «холодных» регионов с максимальными и минимальными тарифами для населения.

Таблица 1

Тарифы на электроэнергию для населения в зоне действия ЕЭС РФ в июле 2019 года.

Субъект РФ	Количество электроэнергии, доступное на среднемесячную зарплату в регионе, кВт·ч	Тариф без льгот за пользование электроплитами, руб/ 100 кВт·ч
Пятерка регионов с максимальными тарифами		
Республика Калмыкия	4876	483
Республика Адыгея	5079	481
Ивановская область	5115	450
Республика Алтай	5300	523
Псковская область	5578	440
Пятерка регионов с минимальными тарифами		
Иркутская область	34436	111
Ямало-Ненецкий автономный округ	29741	287
Ханты-Мансийский автономный округ — Югра	21977	287
Мурманская область	18885	276
Красноярский край	15891	258

Следует отметить, что коммунальные ЛИЭС обычно находятся в непосредственной близости от районных ПС и зачастую создаются в дефицитных энергорайонах, где обычно максимальна стоимость технологического присоединения новых потребителей к сетям ТСО. Последнее зачастую обуславливает экономическую эффективность появления ЛИЭС. Для предприятий, относящихся к малому и среднему предпринимательству, коммунальные ЛИЭС обладают привлекательностью, ввиду более низкой стоимости технологического присоединения и цены на электроэнергию. Немаловажна и стабильность цены в суточном, сезонном и годовом временных разрезах. Необходимо указать на еще одну важную роль коммунальных ЛИЭС. Осуществляя электроснабжение населения, коммунальные ЛИЭС вносят определенный вклад в снижение негативного влияния перекрестного субсидирования, которое возложено на субъекты экономики в рамках социальной политики. Этот системный эффект можно получить и без интеграции коммунальных ЛИЭС, что позволяет говорить об их преимуществах относительно других по назначению ЛИЭС.

Интеграция промышленных, сельскохозяйственных, коммерческих и коммунальных ЛИЭС сопровождается экономическими эффектами, в основе которых лежат технические свойства ЛИЭС [10, 12, 17–19, 20–23]. Наличие системных эффектов обусловлено возможностью обеспечить:

- разгрузку дефицитных центров питания, осуществляя выдачу мощности в энергорайон. Системный эффект достигается от снижения инвестиционной составляющей в тарифе на передачу электроэнергии, так как сокращается размер необходимых инвестиций на развитие сетевого комплекса ТСО;

- поддержание узловых напряжений в соответствии с нормативами, используя для этого регуляторы возбуждения генераторов ЛИЭС. Системный эффект состоит в сокращении потерь в распределительных электрических сетях, компенсация которых обычно заложена в тариф на передачу электроэнергии.

- выравнивание графика загрузки районных ПС питающих потребителей энергорайона, осуществляя регулирование выдачи мощности из ЛИЭС. Системные эффекты состоят:

- в снижении максимальной нагрузки и повышении плотности графика нагрузки ЕЭС, что ведет к снижению размера требуемых маневренных генерирующих мощностей;

- в повышении эффективности и долговечности работы силовых трансформаторов ПС, так как равномерная нагрузка электроустановок сопровождается снижением потерь и темпов износа паркового ресурса, следовательно, поддерживается индекс технического состояния.

- снижение индикативных показателей надежности электроснабжения в энергорайоне - индекса средней продолжительности прерывания системы и индекса средней частоты прерывания системы (SAIDI, SAIFI) за счет резервирования со стороны ЛИЭС. Системный эффект состоит в получении ТСО дополнительных доходов, от повышения тарифа на передачу электроэнергии за рост качества и надежности электроснабжения.

Наличие указанных и других системных эффектов и их размер влияют на решение об интеграции ЛИЭС, которое во многом зависит от отношения со стороны региональной ТСО и РДУ, обеспечивающих оперативно-диспетчерское управление в зоне нахождения ЛИЭС. Проблема обеспечения параллельной работы ЛИЭС в составе ЕЭС России достаточно сложная техническая задача, сопровождаемая рядом рисков. Технические условия объединения ЛИЭС кардинально отличаются от условий присоединения распределенной генерации. Если присоединение генерации к сетям регламентируется и предполагает выполнение и согласование соответствующей «Схемы выдачи мощности», то для объединения ЛИЭС и ЕЭС России отсутствует утвержденный порядок, нет методических указаний и рекомендаций для решения комплекса специфических задач. Очевидно, что пока не будет технологического регламента интеграции ЛИЭС, пока не появятся четкие правила распределения системных эффектов, процесс интеграции ЛИЭС будет наталкиваться на ведомственные барьеры и препятствия, преодоление которых потребует определенных усилий и соответствующих затрат, снижающих инвестиционную привлекательность интеграции ЛИЭС.

Во многом техническая проблема объединения ЛИЭС с ЕЭС России решается разработанной автоматикой опережающего сбалансированного отделения [17]. Указанная автоматика представляет собой программно-технический комплекс, обеспечивающий режимное и противоаварийное управление в двух указанных выше нормальных состояниях, а также переход из одного нормального состояния в другое и обратно. Данная автоматика выполняет функции децентрализованной интеллектуальной системы

управления нормальными и послеаварийными режимами, исключая отрицательное влияние одной энергосистемы на другую при технологических нарушениях. Основное требование к указанной автоматике – обеспечение быстрого действия отключения ЛИЭС от ЕЭС России при технологических нарушениях в электрической сети. Она не исключает, но использует способность агрегатной автоматики, обеспечивающей устойчивую работу генераторов или их отключение для сохранения в работоспособном состоянии.

Благодаря использованию указанной автоматики в 2021 году выполнена интеграция коммунальной ЛИЭС в г. Новосибирске. В состав ЛИЭС входит многоагрегатная мини-ТЭЦ, состоящая из 5 газопоршневых установок Caterpillar G3520C мощностью 2000 кВт каждая. Подробная информация о пилотной ЛИЭС указана в таблице 2. Газопоршневые установки работают в когенерационном режиме с утилизацией тепловой энергии. Основным видом топлива – природный газ. Дизельное топливо, используется только на дизельных агрегатах, служащих резервом для электроснабжения собственных нужд.

Коммунальная ЛИЭС обеспечивает в микрорайоне «Березовый» в г. Новосибирск население и предприятия малого и среднего бизнеса тепловой и электрической энергией, как это указано в таблице 3. ЛИЭС была создана в 2012 году и работала в островном режиме до 2020 года.

Таблица 2

Характеристики пилотной ЛИЭС

№ п/п	Оборудование	Мощность, кВт	Количество, шт.	Установленная мощность, кВт
Электрическое оборудование				
1.1	Газопоршневая установка G3520 Е «Caterpillar»	2000 (электрическая мощность)	5	10 000 (электрическая энергия)
		2150 (тепловая мощность)		10 750 (тепловая энергия)
1.2	Дизель-генераторная установка ДГУ 1600-10 «Caterpillar»	1600	2	3 200
Котельное оборудование				
2.1	Котлоагрегат «Buderus»	11 200	2	22 400
2.2	Котлоагрегат «Термотехник - ТТ 100»	2 500	2	5 000
2.3	Котлоагрегат «Buderus»	19 200	2	38 400

Использование технического решения обеспечивающей параллельную работу с ЕЭС России позволяет осуществить ограничение токов короткого замыкания, токов замыкания на землю, предотвращение нарушений устойчивости параллельной работы с возникновением асинхронных режимов, исключение ударных моментов на валах синхронных машин, согласование релейной защиты внешней сети с защитами и автоматикой ЛИЭС [17, 21, 22].

Таблица 3

Структура потребителей электрической энергии ЛИЭС «Березовое»

№ пп	Тип нагрузки	Доля
1	Коммунально-бытовая нагрузка	60 %
2	Промышленная нагрузка	25 %
3	Двигательная нагрузка	10 %
4	Осветительная нагрузка	5 %

Экономическая природа полученных эффектов от интеграции ЛИЭС обусловлена следующим:

- увеличением на 18% объема выработки электрической энергии на когенерационных агрегатах, что позволило повысить КИУМ и КПИТ энергоустановки;
- получением дополнительных доходов от энергосбытовой компании, закупающей отпускаемые избытки электроэнергии для поставки на розничный рынок;
- отказом от резервных дизельных агрегатов и их использование для обеспечения надежности электроснабжения электроприемников первой категории надежности, то есть для собственных нужд другой котельной ООО «Генерация Сибири», что позволило

сократить капиталовложения на развитие бизнеса.

- снижением затрат на приобретение 15% объема природного газа, добившись сокращения его использования на котельном оборудовании за счет его вытеснения из покрытия тепловой нагрузки и замещением теплом, получаемого от когенерационных агрегатов.

- оказанием системных услуг в части мультиагентного управления узловыми напряжениями и предоставления регулировочного ресурса в размере 500 кВт Агрегатору управления спросом на электрическую энергию в ЕЭС России и др.

Указанные экономические эффекты позволили инвестору обеспечить окупаемость реализации проекта на интеграцию коммунальной ЛИЭС за 7 месяцев. Из важных эффектов, который предстоит монетизировать, следует отметить ожидаемое повышение надежности электроснабжения потребителей. Расчеты показали, что индексы средней продолжительности и средней частоты прерывания электроснабжения снизятся минимум на 10%. Это результат того, что потребители в составе ЛИЭС получили двухстороннее независимое питание. По существу, электроснабжение потребителей третьей категории надежности будут обеспечивать с уровнем надежности соответствующий второй категории.

Особо следует отметить достигнутые экологические эффекты. Его предлагается рассчитать исходя из сокращения выбросов CO₂ на угольной ТЭС, полученных благодаря отпущенной коммунальной ЛИЭС электроэнергии на розничный рынок.

Для определения величины выбросов CO₂ воспользуемся коэффициентами для расчета выбросов CO₂ при сжигании ископаемого топлива, согласно Методике расчета выбросов парниковых газов, указанной в Национальном докладе РФ о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, выброс CO₂ в весовых единицах может быть рассчитан исходя из объемов сжигаемого топлива:

$$E = M \cdot K ,$$

где E - выброс CO₂ в весовых единицах (тонн, тыс.м³); M - фактическое потребление топлива (тонн, тыс.м³); K - коэффициенты для расчета выбросов CO₂ при сжигании ископаемого топлива, для природного газа K= 1,85 т CO₂/(тыс. м³), для каменного угля K=2,7 т CO₂/т, в зависимости от марки угля.

Выработка 1000 МВтч на ГПУ сопровождается удельным расходом газа 378 нм³/ч (что соответствует расходу топлива при загрузке на 75% ГПУ G3520 E Caterpillar). Следовательно, для производства необходимого объема электрической энергии при принятой загрузке 75% и установленной мощности 2 МВт, суммарный расход топлива составит 252 тыс.нм³. Выбросы энергоустановки составят 466,2 т.

Сокращении выработки на 1000 МВтч на ТЭС при удельном расходе топлива 300 г.у.т./кВтч приведет к экономии сжигаемого топлива на 390 т. Следовательно, уменьшение вредных выбросов составит 1 054, 7 тонн.

Таким образом, эффект сокращения выбросов парниковых газов за счет выработки электроэнергии на ГПУ коммунальной ЛИЭС, а не на ТЭС составляет:

$$\Delta E = 588,5 \text{ т}$$

Аналогичное сокращение парниковых газов возможно путем замещения части выработки электрической энергии на ТЭС выработкой на фотогальванических установках.

Сокращение CO₂ на 588,5 тонн возможно за счет сокращения расходов топлива (в расчетах принят каменный уголь) на 218 тонн., следовательно снижение выработки электрической энергии на ТЭС (ΔЭ) должно составить 558 МВтч.

Для выработки аналогичного объема электрической энергии солнечных электростанций, работающих с КИУМ 0,16, потребуется установка солнечной электростанции мощностью 398 кВт.

$$P_{\text{сэс}} = \frac{\Delta \text{Э}}{\text{КИУМ}_{\text{сэс}} \cdot 8760},$$

При средней удельной стоимости солнечных электростанций 1000\$/кВт, системный экологический эффект интеграции ЛИЭС, отпускающей на розничный рынок 1000 МВт*час в год составит 398 тыс. \$.

Заключение

Интеграция сбалансированных локальных энергосистем под управлением интеллектуальной децентрализованной системой управления сопровождается получением полезных и значимых системных экономических эффектов.

Интеграция локальных интеллектуальных энергосистем повышает эффективность функционирования ЕЭС России, в частности повышая равномерность графиков загрузки центров питания или предоставляя регулировочные ресурсы агрегаторам управления спросом на электроэнергию в ЕЭС России.

Интеграция локальной интеллектуальной энергосистемы в энергорайон, запитанный от дефицитных центров питания, позволяет сократить размер инвестиций, необходимых для расширения районных подстанций. Это приведет к снижению инвестиционной составляющей в сетевом тарифе и позволит перенаправить высвободившиеся средства на цифровизацию сетевого комплекса.

Важно отметить, что даже не интегрированные коммунальные локальные интеллектуальные энергосистемы порождают системный эффект снижая размер перекрестного субсидирования, что создает благоприятные условия для социально-экономического развития территорий, повышая доступность электроснабжения субъектов экономики.

Литература

1. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., и др. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. М: Энергетический центр управления Московской школы управления Сколково, 2018. 87 с. Доступно по: http://www.energsovet.ru/stat/skolko_914.pdf Ссылка активна на 26 октября 2021.
2. Княгинин В.Н., Холкин Д.В. Цифровой переход в электроэнергетике России. Центр стратегических разработок, 2017. 47 с. Доступно по: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf Ссылка активна на 01 ноября 2021.
3. Дильман М.Д., Филиппов С.П. Требования к топливной эффективности перспективных когенерационных установок // Известия РАН. Энергия. 2021, №5, С. 102–111.
4. Recaldea A.A., Alvarez-Alvarado M.S. Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation // Electric Power Systems Research. 2020. V. 188, 106540. Доступно по: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620303448> Accessed to: 18 november 2021.
5. Huty D., Dong S., Brown S. Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications // Energy Conversion and Management. 2020, V. 226, 113499. Available at: <https://eprints.whiterose.ac.uk/166255/> Accessed to: 29 october 2021
6. Tungadio D.H., Bansal R.C., Siti M.W. Optimal Control of Active Power of Two Micro-grids Interconnected with Two AC Tie-Lines // Electric Power Components and Systems. 2017. V. 45. pp. 2188–2199. Available at <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15325008.2017.1384940> Accessed to: 13 november 2021.
7. Tungadio D.H., Sun Y. Predictive controller for interconnected microgrids // Generation, Transmission & Distribution, 2020. V.14, pp. 4273-4283 Available at <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2019.1257> Accessed to: 15 july 2021
8. Abbey C., Cornforth D., Hatziaargyriou N., Hirose K. Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery // IEEE Power & Energy Magazine, 2014. V. 12(3), pp.67-76
9. Bella A., Farina M., Sandroni C., et al. Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services // IEEE Transactions on control systems technology, 2020. V. 28 (6), pp. 2616 - 2624. Available at <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848405>. Accessed to:10 september 2021
10. Samoylenko V., Firsov A., Pazderin, A., Ilyushin P. Distribution grid future planning under uncertainty conditions // Renewable Energy and Power Quality Journal, 2021. V. 19, pp. 499–504.
11. Инновационная электроэнергетика – 21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ИЦ «Энергия». 2017. 584 с.
12. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Loskutov A.A. High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas // Russian Electrical Engineering. 2021, V. 92(2), pp.. 90–96 Available at <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371221020073> Accessed to: 30 september 2021

13. Эффективность нефтяных компаний // Энергетический бюллетень. 2018 Доступно по: <https://ac.gov.ru/publications?period=-1&page=3> Ссылка активна на: 05 сентября 2021 г.

14. Тараборин Р.С. Государственная политика России в сфере газоснабжения: характеристика и перспективы // Экономика и социум. 2020, № 72, С. 188-194.

15. Новая модель газификации субъектов Российской Федерации / Министерство Энергетики РФ Доступно по: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiZ-dCXI671AhUrmIsKHY26BeAQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fminenergo.gov.ru%2Fsystem%2Fdownload-pdf%2F19744%2F131089&usg=AOvVaw2PZfAVgJT4mdp-oBlidZ1V> Ссылка активна на: 10августа 2021 г.

16. Новак заявил, что уровень газификации России по итогам 2021 года составил 72% // ТАСС, 12.01.2021 Доступно по: <https://tass.ru/ekonomika/13404071> Ссылка активна на: 13 января 2022 г.

17. Фишов А.Г., Ивкин Е.С., Гилев О.В., др. Режимы и автоматика минирид, работающих в составе распределительных электрических сетей ЕЭС // Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. С. 44-59.

18. Мышкина Л.С. Малая генерация – средство повышения живучести энергосистемы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19, № 1-2. С.23-30

19. Бык Ф.Л., Мышкина Л.С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 1. С. 45-51.

20. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22, № 6. С.43-54

21. Карджаубаев Н.А., Фишов А.Г. Децентрализованное мультиагентное регулирование напряжения в электрических сетях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018, № 6, С. 183-195.

22. Фишов А.Г., Гуломзода А.Х., Ивкин Э.С., и др. Синхронизация microgrid с внешней электрической сетью и между собой в нормальных и послеаварийных режимах при разных схемах объединения // Релейная защита и автоматика. 2021. № 2. С. 18-28.

23. Byk F. L., Myshkina L. S., Frolova Y. A. Effect of local power systems integration on the distribution network functions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, V. 1019. 14 International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019), 012003.

Авторы публикации

Бык Феликс Леонидович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

Мышкина Людмила Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Khokhlov A, Melnikov Y, Veselov F, Kholkin D, Datsko K. Raspredelennaya energetika v Rossii: potencial razvitiya. M: Energy Management Center of the Moscow School of Management Skolkovo. 2018; 87. Available at: http://www.energsovet.ru/stat/skolkovo_914.pdf Accessed: 26 Oct 2021.

2. Knjagin VN, Holkin DV. Cifrovoy perehod v jelektroenergetike Rossii. Center for Strategic Research. 2017; 47. Available at: https://www.csr.ru/uploads/2017/09/Doklad_energetika-Web.pdf Accessed: 01 Nov 2021.

3. Dilmán MD, Filippov SP. Requirements for the fuel efficiency of promising cogeneration plants *Izvestiya RAN. Energy*. 2021; 5, 102–111.

4. Recalde AA, Alvarez-Alvarado M. S. Design optimization for reliability improvement in microgrids with wind – tidal – photovoltaic generation *Electric Power Systems Research*, 2020; 188, 106540. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620303448> Accessed: 18 Nov 2021. doi :10.1016/j.epsr.2020.106540

5. Huty D, Dong S, Brown S. Suitability of energy storage with reversible solid oxide cells for microgrid applications *Energy Conversion and Management*. 2020; 226, 113499& Available at: <https://eprints.whiterose.ac.uk/166255/> Accessed: 29 Oct 2021. doi:10.1016/j.enconman.2020.113499
6. Tungadio DH, Bansal RC, Siti MW. Optimal Control of Active Power of Two Microgrids Interconnected with Two AC Tie-Lines *Electric Power Components and Systems*. 2017; 45, 2188–2199. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15325008.2017.1384940> Accessed: 13 Nov 2021 doi: 10.1080/15325008.2017.1384940
7. Tungadio DH, Sun Y. Predictive controller for interconnected microgrids *Generation, Transmission & Distribution*, 2020; 14, 4273-4283 Available at: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2019.1257> Accessed: 15 Jul 2021 doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1257
8. Abbey C, Cornforth D, Hatziaargyriou N, et al. Microgrids Operation for More Efficient Disaster Recovery *IEEE Power & Energy Magazine*, 2014; 12 (3), 67-76 doi:10.1109/MPE.2014.2301514 .
9. Bella A, Farina M, Sandroni C, et al. Design of Aggregators for the Day-Ahead Management of Microgrids Providing Active and Reactive Power Services *IEEE Transactions on control systems technology*, 2020; 28 (6), 2616-2624. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8848405> Accessed: 10 Sept 2021. doi: 10.1109/TCST.2019.2939992.
10. Samoylenko V, Firsov A, Pazderin A, et al. Distribution grid future planning under uncertainty conditions *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 2021; 19, 499–504 doi:10.24084/repqj19.329
11. *Innovative electric power industry - 21* / ed. Batenin VM, Bushueva VV, Gurgling N.I. M.: EC "Energy"; 2017.
12. Kulikov AL, Ilyushin PV, Loskutov AA. High-Performance Sequential Analysis in Grid Automated Systems of Distributed-Generation Areas *Russian Electrical Engineering*. 2021; 92(2), 90–96 Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068371221020073> Accessed: 30 Sept 2021 doi:10.3103/S1068371221020073.
13. Jefferktivnost' neftjanyh kompanij // Jenergeticheskij bjulleten'. 2018 Available at: <https://ac.gov.ru/publications?period=-1&page=> Accessed: 05 Sept 2021.
14. Taraborin R.S. Gosudarstvennaja politika Rossii v sfere gazosnabzhenija: harakteristika i perspektivy *Economy and society*. 2020; 72; 188-194.
15. Novaja model' gazifikacii subektov Rossijskoj Federacii. / Ministerstvo jenergetiki Rossijskoj Federacii Available at: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwIZ-dCXl671AhUrmIsKHYY26BeAQFnoECAMQAQ&url=https%3A%2F%2Fminenergo.gov.ru%2Fsystem%2Fdownload-pdf%2F19744%2F131089&usq=AOvVaw2PZfAVgJT4mdp-oBlidZ1V> Accessed: 10 Aug 2021.
16. Novak zajavil, chto uroven' gazifikacii Rossii po itogam 2021 goda sostavil 72% // TASS, 12.01.2021. Available at: <https://tass.ru/ekonomika/13404071> Accessed: 13 Jan 2022.
17. Fishov AG, Ivkin ES, Gilev OV, et al. Modes and automation of minigrid operating as part of the ups distribution electric networks. *Relay protection and automation*. 2021; 3; 44-59.
18. Myshkina LS. Small generation - a means of increasing the survivability of the power system. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19(1-2); 23-30.
19. Byk FL, Myshkina LS. Reliability of objects of distributed energy *Reliability and safety of energy*. 2021; 14(1), 45-51.
20. Byk FL, Kakosha YuV, Myshkina LS. Reliability factor in the design of a distribution network. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22 (6); 43-54.
21. Kyrdzhaubaev NA, Fishov AG. Decentralized multi-agent voltage regulation in electrical networks. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018; 6:183-195.
22. Fishov AG, Ghulomzoda AH, Ivkin ES, et al. Synchronization of the microgrid with the external power grid and with each other in normal and post-emergency modes with different interconnection schemes. *Relay protection and automation*. 2021; 2, 18-28.

23. Byk FL, Myshkina LS, Frolova YA. Effect of local power systems integration on the distribution network functions *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1019, 012003. doi: 10.1088 / 1757-899X / 1019/1/012003.

Authors of the publication

Felix L. Byk – Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

Lyudmila S. Myshkina – Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено ***18.11.2022г.***

Отредактировано ***04.03.2022г.***

Принято ***09.03.2022г.***



ВТОРИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОСЕРНИСТЫХ НЕФТЯНЫХ ОСТАТКОВ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ДЛЯ КОТЕЛЬНОГО И СУДОВОГО ТОПЛИВА

Э.Р. Зверева^{1*}, А.О. Макарова³, Ю.В. Бахтиярова²,
В.И. Королев¹, Н.П. Ильин¹, А.Н. Туранов³, О.С. Зуева^{1**}

¹Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Химический институт
им. А.М. Бутлерова, Казань, Россия

³Казанский институт биохимии и биофизики ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-6312>, 6elvira6@list.ru

**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8733-0595>, ostefzueva@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Комплексом различных физико-химических методов изучены возможности повторного использования нефтяных остатков (нефтешлама) малосернистой высокопарафинистой нефти месторождений полуострова Мангышлак (Казахстан) в качестве перспективного сырья для котельного и судового топлива с улучшенными эксплуатационными и экологическими характеристиками. МЕТОДЫ. Определение условной вязкости нефтешлама (в градусах Энглера, °Е) проводилось с помощью вискозиметра Энглера ВУ-М-ПХП по ГОСТ 6258-85 «Нефтепродукты. Метод определения условной вязкости». Исследования низшей рабочей теплоты сгорания нефтешлама проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 21261-91 «Нефтепродукты». Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания». Определение массовой доли серы в изучаемом нефтешлеме также проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 3877-88 «Нефтепродукты. Метод определения серы сжиганием в калориметрической бомбе». Для анализа полученных результатов были привлечены данные, полученные с помощью метода ядерного магнитного резонанса. Протонные ЯМР спектры записаны на ЯМР спектрометре Bruker AVANCE III, работающем на частоте 600.13 МГц для ¹H и оснащенном инверсным датчиком высокого разрешения для трех ядер (ТХ1, 5 мм). Обработка и анализ данных выполнялись с помощью программы Bruker Topspin 3.6.1. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что по теплоте сгорания и вязкостным свойствам при температуре свыше 50 °С указанный нефтешлам аналогичен котельному мазуту М100. Установлено, что использование карбонатного шлама химической водоочистки в концентрации 0.1 мас. % позволяет дополнительно уменьшить вязкость на 5-6 % и снизить содержание серы в продуктах сгорания, не уменьшая при этом низшую рабочую теплоту сгорания нефтепродукта. Выявлен сложный характер взаимосвязи ширины линий ЯМР с вязкостными свойствами, что может свидетельствовать о существовании ассоциатов высокомолекулярных парафинов даже в слабвязких жидких нефтепродуктах. Обсуждена природа и характерные размеры образующихся ассоциатов. Показано, что добавление средне-дистиллятных дизельных фракций позволит получить более качественный вариант топлива для судовых двигателей, газотурбинных и котельных установок с уменьшенным количеством смолисто-асфальтеновых веществ, пониженными значениями вязкости и температурами застывания, высокой теплотой сгорания и низким содержанием серы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведенный комплекс физико-химических исследований показал возможность использования малосернистого мангышлакского нефтешлама в качестве основы для получения топлива для судовых двигателей, газотурбинных и котельных установок, паровых котлов и промышленных печей.

Ключевые слова: мазут; нефтешлам; условная и динамическая вязкость; теплота сгорания; содержание серы; метод ядерного магнитного резонанса; структура.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств Программ стратегического академического лидерства Казанского государственного энергетического университета (Зверева Э.Р., Королев В.И., Ильин Н.П., Зуева О.С.) и Казанского (Приволжского) федерального университета (Зверева Э.Р., Бахтиярова Ю.В.). Работа Макаровой А.О. и

Туранова А.Н. выполнена при финансовой поддержке государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН. Авторы благодарят ЦКП-САЦ ФИЦ КазНЦ РАН за возможность выполнения ЯМР экспериментов.

Для цитирования: Зверева Э.Р., Макарова А.О., Бахтиярова Ю.В., Королев В.И., Ильин Н.П., Туранов А.Н., Зуева О.С. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 16-28. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-16-28.

REUSE OF LOW SULFUR OIL RESIDUES AS A BASE FOR BOILER AND MARINE FUEL

ER. Zvereva^{1*}, AO. Makarova³, YuV. Bakhtiyarova²,
VI. Korolev¹, NP. Ilyin¹, AN. Turanov³, OS. Zueva^{1**}

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Alexander Butlerov Institute of Chemistry, Kazan Federal University, Kazan, Russia

³Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Science, Kazan, Russia

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-6312>, 6elvira6@list.ru

**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8733-0595>, ostefzueva@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* A complex of various physico-chemical methods has been studied to explore the possibilities of reuse of oil residues (oil sludge) of low-sulfur high-paraffin oil deposits of the Mangyshlak peninsula (Kazakhstan) as a promising raw material for boiler and marine fuel with improved operational and environmental characteristics. *METHODS.* Determination of the conditional viscosity of oil sludge (in degrees Engler, ° E) was carried out using an Engler viscometer VU-M-PCP according to GOST 6258-85 «Petroleum products. The method of determining the conditional viscosity». Studies of the lowest working heat of combustion of oil sludge were carried out using an adiabatic bomb calorimeter ABK-1B (Russia) according to GOST 21261-91 "Petroleum products. Method for determining the highest heat of combustion and calculation of the lowest heat of combustion". Determination of the mass fraction of sulfur in the studied oil sludge was also carried out using an adiabatic bomb calorimeter ABK-1B (Russia) according to GOST 3877-88 «Petroleum products. Method of determination of sulfur by burning in a calorimetric bomb». To analyze the results obtained, data obtained using the nuclear magnetic resonance method were used. Proton NMR spectra were recorded on a Bruker AVANCE III NMR spectrometer operating at a frequency of 600.13 MHz for ¹H and equipped with a high-resolution inverse sensor for three cores (TXI, 5 mm). Data processing and analysis were performed using Bruker Topspin 3.6.1. *RESULTS.* It is shown that in terms of heat of combustion and viscosity properties at temperatures above 50 °C, this oil sludge is similar to boiler fuel oil M100. It was found that the use of carbonate sludge of chemical water treatment at a concentration of 0.1 wt. % allows you to further reduce the viscosity by 5-6% and reduce the sulfur content in the combustion products, without reducing the lower working heat of combustion of the oil product. The complex nature of the relationship between the width of NMR lines and viscous properties has been revealed, which may indicate the existence of associates of high-molecular paraffins even in slightly viscous liquid petroleum products. The nature and characteristic sizes of the resulting associates are discussed. It is shown that the addition of medium-distillate diesel fractions will make it possible to obtain a better fuel option for marine engines, gas turbine and boiler installations with a reduced amount of resinous-asphaltene substances, reduced viscosity values and solidification temperatures, high heat of combustion and low sulfur content. *CONCLUSION.* The conducted complex of physico-chemical studies has shown the possibility of using low-sulfur Mangyshlak oil sludge as a basis for obtaining fuel for marine engines, gas turbine and boiler plants, steam boilers and industrial furnaces

Keywords: fuel oil; oil sludge; conditional and dynamic viscosity; calorific value; sulfur content; nuclear magnetic resonance method; structure.

Acknowledgments: This paper has been supported by the Kazan State Power Engineering University Strategic Academic Leadership Program «Priority 2030» (E.R. Zvereva, V.I. Korolev,

N.P. Ilyin, O.S. Zueva), by the Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (E.R. Zvereva, Yu.V. Bakhtiyarova), and by the government assignment for Federal Research Center Kazan Scientific Center of Russian Academy of Sciences (A.O. Makarova, A.N. Turanov). The authors gratefully acknowledge the Assigned Spectral-Analytical Center of FRC Kazan Scientific Center of RAS for possibility to fulfill the NMR experiments.

For citation: Zvereva ER., Makarova AO., Bakhtiyarova YuV, Korolev VI., Ilyin NP., AN. Turanov AN, Zueva OS. Reuse of low sulfur oil residues as a base for boiler and marine fuel *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24 (1):16-28. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-16-28.

Введение

Главными целями основных положений «Энергетической стратегии России на период до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 1715-Р, является определение путей и условий наиболее эффективного использования энергетических ресурсов, формирование роли энергии как основного фактора, определяющего повышение качества жизни населения. Тенденции развития энергетики свидетельствуют о том, что продукты переработки тяжелой нефти станут основным источником энергии в ближайшие десятилетия. Пока компании с большой осторожностью подходят к сжиганию тяжелого котельного топлива - его применению мешают экологические риски, сложности логистики и повышенный износ оборудования. Однако в некоторых случаях его применение остается безальтернативным, например, на тепловых электрических станциях 20 российских регионов (особенно в Заполярье и на Дальнем Востоке), где в структуре основного топлива, используемого котельными, более 50 % составляет мазут, а также на судовом транспорте в виде различных марок флотского мазута.

Мазут широко применяется в качестве сырья для высокотехнологичных вторичных процессов переработки, а также служит источником энергии для судовых двигателей, газотурбинных и котельных установок, паровых котлов и промышленных печей. Основные потребители мазута – речной и морской флот, сфера жилищно-коммунального хозяйства, предприятия топливно-энергетического комплекса. Тяжёлое нефтяное судовое топливо представляет собой смесь углеводородов, вязкостью 30-700 мм²/с которая остаётся в качестве осадка после прохождения ректификационной колонны и отделения лёгких углеводородов. Физико-химические свойства мазута зависят от химического состава исходной нефти и степени ее переработки. Флотский мазут и мазут М-40 близки по своим характеристикам, но все же флотский мазут – топливо более качественное. В процессе производства этих марок мазута остаточные нефтепродукты смешиваются с 8-12% (для флотского мазута до 30 %) средне-дистиллятных дизельных фракций.

Качество судовых топлив определяются вязкостью, плотностью (не более 991 кг/м³); пониженным содержанием серы (не более 0,5 % и даже не более 0,1 % для районов *SECA* (*Sulfur Emission Control Areas*), пожаробезопасностью и т.д. Согласно дополнениям к Международной конвенции по предотвращению загрязнения воздушной среды с судов, максимальное содержание серы в судовом бункерном мазуте должно сократиться с 3,5% до 0,5%. Судовладельцы вынуждены переходить на новые виды топлива, способные удовлетворять новым экологическим требованиям [1, 2]. В свою очередь, нефтяные компании должны наращивать производство топлив с улучшенными экологическими характеристиками.

Неглубокая переработка нефти, практиковавшаяся ранее, привела к накоплению больших количеств энергоемкого сырья, пригодного к повторной переработке. Нефтяные остатки, называемые нефтешламом, – это отходы, возникающие на всех этапах добычи, транспортировки и переработки нефти. Их состав, в первую очередь, определяется составом исходной нефти. В частности, нефтяные остатки, складываемые вблизи месторождений полуострова Мангышлак (Казахстан), обладают очень интересными особенностями. Большое содержание парафиновых углеводородов и малое количество асфальтенов в их составе позволяют рассматривать их как перспективное сырье для получения судового и котельного топлива. Отличительной чертой нефтяных остатков Мангышлакских нефтей является малое количество серы в ее составе. С учетом того, что полуостров Мангышлак находится на Каспийском море и вблизи акватории крупных рек, где существует потребность в судовом топливе, нас заинтересовал вопрос использования нефтешлама в качестве основы для топлива, в первую очередь, для малосернистого судового топлива. Сравнение подобного нефтяного сырья с мазутом показало, что некоторые виды нефтяных

остатков при температурах более 50 °С очень похожи по составу и своим физико-химическим свойствам на мазут. В частности, они могут характеризоваться схожими значениями вязкости, которую можно снизить при использовании различных присадок к топливу [3-8]. Также близки оба продукта по теплоте сгорания.

Наличие большого количества нефтяных остатков, складываемых на полигонах открытого типа, повышает риск загрязнения грунтовых вод и воздуха. Повторное использование накопленных нефтяных отходов позволит уменьшить вредное воздействие полигонов, сохранить естественный ландшафт и затраты на добычу и переработку природных ресурсов [9-11]. Поэтому разработка экологически чистых методов утилизации нефтяных остатков является актуальной проблемой [12-14].

Поиск новых источников малосернистого углеводородного сырья наряду с возможностью сокращения нефтешламовых отвалов за счет их полезного вторичного использования в целях получения новых топливных ресурсов важны для улучшения экологии полуострова и экономики региона. Целью данной работы явилось изучение возможностей использования остатков малосернистой высокопарафинистой нефти месторождений полуострова Мангышлак (Казахстан) в качестве перспективного сырья для котельного и судового топлива с улучшенными экологическими характеристиками.

Материалы и методы

Характеристика нефтяных остатков. Состав и свойства исходной нефти определяют особенности нефтяных остатков. Нефти месторождений полуострова Мангышлак являются малосернистыми (содержание серы – 0,06-0,12 мас. %), с низкой кислотностью. При небольшом содержании асфальтенов они содержат одновременно большие количества парафинов и смол [15, 16]. Высокое содержание парафиновых углеводородов приводит к высокой температуре застывания нефтешлама (32-34 °С) [16]. При прямой перегонке из Мангышлакских нефтей можно получить дизельное топливо летней марки. Эта дизельная фракция может быть использована для улучшения характеристик судового топлива, приготовленного на основе нефтешлама для улучшения его физико-химических и эксплуатационных характеристик.

Нефтяные остатки были взяты нами с полигона открытого типа вблизи месторождения Жетыбай в Казахстане. Полигон содержит нефтешлам, извлеченный при очистке резервуаров для перевозки нефти с месторождений полуострова Мангышлак. Исследование аналогичных полигонов, проведенное авторами работы [17] показало, что нефтешлам, содержащийся на полигонах, подвержен послойному фазовому разделению. Верхний слой содержит наиболее качественные углеводороды, по своим физико-химическим свойствам подобные исходной нефти. Содержание легких фракций в этом слое достигает до 30 мас. % при низких значениях удельной вязкости и коксуемости [17]. Данный продукт можно использовать аналогично мазуту или добавлять в сырую нефть для повторной переработки. Остатки жетыбайской нефти имеют плотность 0,89-0,94 г/см³, температуру застывания 43-47 °С, коксуемость 3,9-7,3 %. Содержание парафиновых углеводородов составляет 60-70 %, ароматических углеводородов и смолисто-асфальтеновых веществ – около 14-16 % [18]. Условная вязкость образцов нефтешлама при 50 °С находится в диапазоне 4 -14 °Е. Среднее содержание серы в нефтяных остатках Мангышлака 0,18-0,21 % [15].

При комнатной температуре образец исследованного нефтешлама представлял собой бесформенную гелеобразную массу (рис. 1). Определенная экспериментально плотность нефтяных остатков при температуре $T = 20$ °С оказалось равной $\rho = 0,939$ г/см³. Такое значение плотности определяет индекс $API = 18,8$, что означает, что изучаемые нефтяные остатки могут рассматриваться как нефтяная дисперсная система, аналогичная тяжелой сырой нефти. Условная вязкость нефтешлама при 50 °С, равная 4,2 °Е, примерно соответствует вязкости мазута.



Рис. 1. Образцы исследуемых нефтяных остатков при комнатной температуре

Fig. 1. Samples of the studied oil residues at room temperature

Методы

Исследования условной и динамической вязкости нефтепродукта. Определение условной вязкости нефтешлама (в градусах Энглера, °Е) проводилось с помощью вискозиметра Энглера ВУ-М-ПХП по ГОСТ 6258-85 «Нефтепродукты. Метод определения условной вязкости». Определялось время истечения 200 см³ испытуемого нефтепродукта из вискозиметра при температуре испытания 50-90 °С. Для каждой концентрации при заданной температуре измерялись три значения и находилось их среднее арифметическое. Полученные в градусах Энглера данные с помощью таблицы (<https://www.spectro-oils.com/wp-content/uploads/2012/10/Viscosityconversion-tables.pdf>), переводились в значения кинематической вязкости ν в системе СИ (м²/с), а затем по формуле $\eta = \nu \cdot \rho$ рассчитывались значения динамической вязкости системы η . Изменение плотности нефтепродукта ρ при изменении температуры также было учтено (<http://tdhim.ru/plotnostnefteproductov/>)

Изучение низшей рабочей теплоты сгорания нефтепродукта. Исследования низшей рабочей теплоты сгорания нефтешлама проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 21261-91 «Нефтепродукты». Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания». Метод определения заключался в полном сжигании массы испытуемого жидкого топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода и измерении количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива и вспомогательных веществ, а также при образовании водных растворов азотной и серной кислот в условиях испытания.

Определение массовой доли серы в нефтепродукте. Определение массовой доли серы в изучаемом нефтешламе также проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 3877-88 «Нефтепродукты. Метод определения серы сжиганием в калориметрической бомбе». Метод определения заключался в сжигании продукта в калориметрической бомбе в среде кислорода под давлением с последующим определением серы гравиметрическим методом.

Метод ядерного магнитного резонанса. Для анализа полученных результатов были привлечены данные, полученные с помощью метода ядерного магнитного резонанса. Протонные ЯМР спектры записаны на ЯМР спектрометре *Bruker AVANCE III*, работающем на частоте 600.13 МГц для ¹H и оснащенном инверсным датчиком высокого разрешения для трех ядер (TXI, 5 мм). Обработка и анализ данных выполнялись с помощью программы *Bruker Topspin 3.6.1*. Спектры записаны в интервале температур от +30 °С до +90 °С без стабилизации магнитного поля по дейтериевому каналу, т.к. спектры содержат линии, уширенные из-за высокой вязкости образца до 500 Гц. Каждая температура выдерживалась 30 минут, требуемых для термостатирования, подстройки параметров датчика, а затем для записи спектров с использованием импульсной последовательности: 90°- импульс – спад свободной индукции – преобразование Фурье. Параметры записи спектра: длительность 90°-импульса – 8,90 +/- 0,05 мкс, число сканов 64, интервал между импульсами 5 с, количество точек на скан – 120 К, ширина спектра – 12 кГц. Большое количество сканов обусловлено необходимостью повысить соотношение сигнал/шум для более точного определения химических сдвигов в интервале 4-9 ppm. При загрузке образца в ампулу температура не превышала +50 °С, что важно для корректного изучения предыстории образца.

Обсуждение результатов

Исследования условной и динамической вязкости нефтепродукта. Вязкость является одним из важнейших физических свойств нефти, в значительной степени определяющим процессы ее добычи, транспортировки и переработки. При измерениях условной вязкости нефтяных остатков при 50 °С получено среднее значение $\nu = 4,187$ °Е, которое для данного нефтепродукта соответствует динамической вязкости $\eta = 0,0284$ Па·с. Следует отметить, что данное значение оказалось даже меньшим, чем у образцов мазута М100, полученных на ряде нефтеперерабатывающих заводах Татарстана и Башкортостана, с которыми мы работали ранее. Переход в нашем исследовании к динамической вязкости обусловлен двумя основными причинами. Во-первых, в диапазоне небольших вязкостей преобразование условной вязкости, выраженной в °Е, в кинематическую вязкость, выраженную в м²/с, уже носит нелинейный характер, что затрудняет оценку наблюдаемых эффектов. Во-вторых, необходимость сопоставления результатов с вязкостными характеристиками, полученными другими методами, в частности с шириной линии ЯМР, требует перехода к динамической вязкости. В-третьих, существующие теории, описывающие структурообразование в нефтяных дисперсных системах [19, 20], рассматривают именно динамическую вязкость.

Вязкость нефтяных систем возрастает с увеличением молекулярного веса фракций. Поэтому небольшие значения вязкости при температурах выше 50 °С говорят о наличии в

изучаемых нефтяных остатках наряду со смолисто-асфальтовыми веществами достаточного количества масляных фракций, пригодных для использования в качестве топлива или для повторной переработки в смеси с сырой нефтью. В то же время гелеобразное состояние образцов при комнатной температуре говорит о наличии структурообразования, связанного с ассоциацией парафиновых углеводородов, которые в большом количестве присутствуют в изученных образцах. Это структурообразование заметно снижается по мере повышения температуры.

При исследовании температурной зависимости вязкости исследуемого нефтепродукта были получены данные (рис. 2), отражающие уменьшение его вязкости при увеличении температуры. При повышении температуры нефтешлама до 80–90 °С его вязкость снижается примерно до 2 °Е (что примерно соответствует значениям $\eta \approx 0.01$ Па·с). Это говорит о хорошей степени распыляемости данного нефтепродукта через форсунки. Эти значения, как было показано нами ранее [21], могут быть еще снижены за счет добавления карбонатного шлама, препятствующего ассоциации парафиновых углеводородов. На рисунке 2 для сравнения с исходными данными приведены данные по изменению вязкости изучаемых нефтяных остатков в зависимости от температуры при добавлении к нему 0,1 мас. % и 0,3 мас.% карбонатного шлама.

Для описания вязкости сырой нефти и нефтепродуктов предложены различные эмпирические корреляционные соотношения [22-25]. Они могут давать максимально точное совпадение рассчитанных и экспериментальных кривых, что удобно для инженерных расчетов.

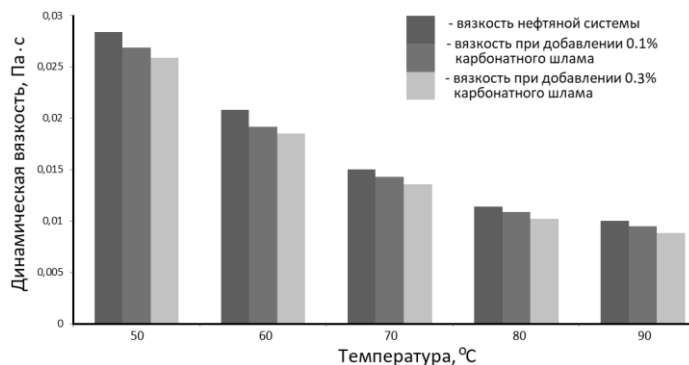


Рис 2. Температурная зависимость динамической вязкости нефтепродукта без использования добавок и с добавлением 0,1 мас. % и 0,3 мас. % карбонатного шлама

Fig. 2. Temperature dependence of the dynamic viscosity of the oil product without the use of additives and with the addition of 0,1 wt. % and 0,3 wt. % carbonate sludge

Изучение низшей рабочей теплоты сгорания нефтепродукта. С целью изучения эксплуатационных характеристик нефтепродукта нами были проведены исследования низшей рабочей теплоты сгорания нефтешлама без и с карбонатной присадкой в концентрации 0,1 wt. %. Данная концентрация является оптимальной при использовании в качестве присадки для котельного топлива. Меньшие значения могут не дать требуемого эффекта, а присутствие карбонатного шлама в концентрации, большей, чем 0,1 мас. % в значительной степени увеличивают зольность топлива, что тоже нежелательно. Нахождение низшей рабочей теплоты сгорания нефтепродукта проводилось согласно ГОСТ 21261-91. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Низшая рабочая теплота сгорания нефтепродукта Q с добавлением карбонатной присадки и без нее и массовая доля серы S в продуктах его сгорания

Концентрация карбонатной присадки, мас. %	0	0,1
Q , МДж/кг	41,272	41,306
S , мас. %	0,2	0,19

Учитывая, что допустимое расхождение по ГОСТ между параллельными опытами составляет 130 кДж/кг (31 ккал/кг), то можно сделать вывод, что калорийность мазута не изменяется при добавлении в него присадки в указанном количестве. Отметим, что сделанные нами ранее измерения низшей теплоты сгорания высокосернистого топочного мазута марки М100 Нижнекамского НПЗ дали значения 41,867 МДж/кг [3]. Значит, по

своей энергоемкости, также как и по реологическим свойствам, эти два нефтепродукта близки друг другу.

Исследование содержания серы в продуктах сгорания нефтешлама. Определение массовой доли серы в продуктах сгорания чистого нефтешлама и нефтешлама с карбонатной присадкой в концентрации 0,1 мас. %. проводилось согласно ГОСТ 3877-88. Результаты данных исследований также приведены в таблице 1. Определенные в экспериментах значения концентрации серы вполне соответствуют показателям низкосернистого котельного судового и энергетического топлива, и принятым дополнениям к Международной конвенции по предотвращению загрязнения воздушной среды судами, согласно которым максимальное содержание серы в судовом бункерном мазуте должно составлять менее 0,5 % (мас.). Использование карбонатного шлама в качестве присадки позволило даже уменьшить найденные значения. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что карбонатная присадка позволяет химически связывать содержащуюся в топливе серу в процессе его сгорания, тем самым уменьшая низкотемпературную (сернокислотную) коррозию поверхностей нагрева и выбросы оксидов серы в атмосферу [26, 27].

Метод ядерного магнитного резонанса. Метод ЯМР позволяет предсказывать фракционный состав сырой нефти и нефтепродуктов [28, 29] и изучать взаимосвязь между физико-химическими свойствами нефти и процессами структурной агрегации компонент в ее объеме [19, 20, 30-32]. В частности, ширина линии ЯМР Δ напрямую связана с вязкостью исследуемой жидкости η . Однако эта связь является неоднозначной. В частности, для слабвязких жидких нефтепродуктов наблюдается обычная пропорциональность этих величин, выражаемая соотношением $\Delta \sim \eta$.

На рисунке 3 приведены спектры ЯМР двух различных проб нефтешлама при 30 °C (слева) и 90 °C (справа) в отсутствие добавок карбонатного шлама.

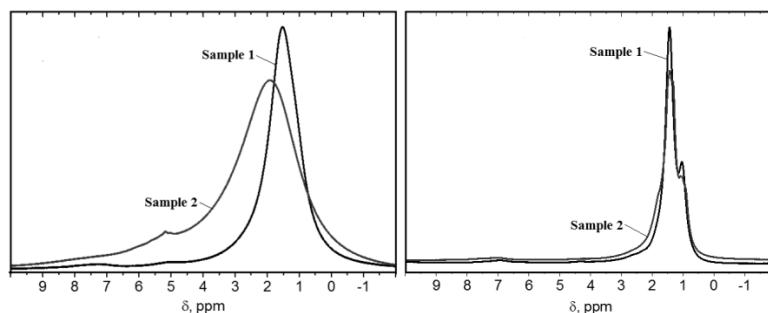


Рис. 3. Спектры ^1H ЯМР двух образцов нефтешлама при 30 °C (слева) и 90 °C (справа) Fig. 3. ^1H NMR spectra of two oil sludge samples at 30 oC (left) and 90 oC (right)

Видно, что начальные спектры ЯМР двух различных образцов, записанные при 30 °C достаточно сильно различаются (рис. 3, слева). Это различие, в первую очередь, может быть обусловлено различными количествами воды в образце и, соответственно, надмолекулярной структурой, которую образуют склонные к ассоциации парафины, в большом количестве присутствующие в нефтях Мангышлака. Температура плавления содержащихся в нефти парафинов 40-50 °C, более высокомолекулярных церезинов – от 57 °C и выше. При загрузке образцов в ампулы температура не превышала 50 °C, что не дало возможности полностью разрушиться имеющимся пространственным структурам. Кроме того, такое поведение может быть обусловлено наличием примесей и неоднородностей в образцах.

При первом нагревании до 90 °C линии сузились и разделились. Спектры, полученные от разных образцов, стали почти идентичными (рис. 3, справа). Этот факт мы хотим выделить особо, поскольку для переработки берется нефтепродукт с разных участков полигона с изначально различными характеристиками, а потом, как показывает опыт, получается практически одинаковый результат. Это может быть следствием разрушения особенностей надмолекулярных структур, образованных парафинами и церезинами. Поскольку в присутствии воды структурообразование заметно усиливается, определенный вклад может давать разное содержание воды в структуре образца. Такое поведение может быть обусловлено и другими факторами, такими, как нарушение структуры водородных связей между ассоциатами и комплексами нефтяных структур, повышение однородности образца вследствие растворения и/или выпадения в осадок твердых структур (например,

частиц примесей или асфальтенов), удаление пузырьков воздуха и растворенных газов. В ходе нагревания вода отделяется и частично испаряется, дополнительные водородные связи разрушаются. В спектрах при 90 °C появилось разделение сигналов от CH_3 и CH_2 групп и от протонов ароматических групп. Спектры образцов нефтепродукта стали очень похожи на сигнал от сырой нефти.

Последующее охлаждение образца и его повторное нагревание через 4 суток выявило очередное сужение линий и небольшое смещение пиков (рис. 4, верхний спектр). Видно, что линии становятся все более узкими по мере нагревания и даже после охлаждения не восстанавливают свою исходную уширенную форму.

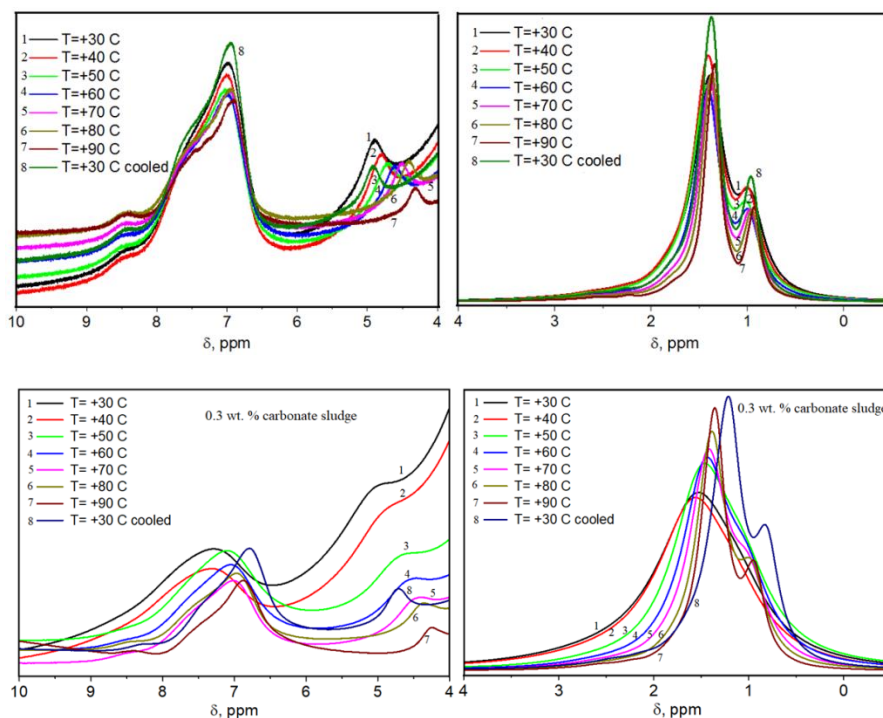


Рис. 4. Наверху: спектр ^1H ЯМР повторно нагретого образца нефтешлама при температурах 30-90 °C, справа область 0-4 ppm, слева – увеличенная в 35 раз часть того же спектра для области 4-10 ppm. Внизу: спектр аналогичного образца с добавлением 0,3 мас.% карбонатного шлама

Fig. 4. At the top: the ^1H NMR spectrum of a reheated oil sludge sample at temperatures of 30-90 °C, on the right is the 0-4 ppm region, on the left is a 35-fold increased part of the same spectrum for the 4-10 ppm region. Below: the spectrum of a similar sample with the addition of 0.3 wt.% carbonate sludge

Имеющиеся пики на спектрах ЯМР нефти и нефтепродуктов могут быть соотнесены со следующими группами: 0-3 ppm – сигналы от CH_3 и CH_2 групп; 4-5 ppm – сигналы от OCH и OCH_2 групп, а также от H_2O ; 6-9 ppm – сигналы от ароматических групп. Более подробное соотнесение сигналов от различных групп спектра описано в работе [28]. На спектрах изучаемой нефтяной системы у ароматических протонов явно выделилось 3 компонента в областях, соответствующих химическим сдвигам вблизи 6,8, 7,5 и 8,3 ppm. Анализ сигнала в диапазоне 4-5 ppm осложнен его низкой интенсивностью на фоне значительных изменений крыла высокоинтенсивной линии от CH_2 групп. В диапазоне химических сдвигов 0-3 ppm в ходе нагревания выделилась линия от CH_3 групп около 0,8 ppm, а у CH_2 групп появились слабо интенсивные линии около 2,1 и 2,4 ppm.

Добавление 0,3 мас. % карбонатного шлама привело к изменению ширины и формы линий ЯМР (рис. 4, нижний спектр). Однако основной причиной изменения в данном случае явились не структурные изменения в образце, а магнитные свойства примесей. С увеличением доли карбонатного шлама их воздействие проявляется как в увеличении ширины линий, так и в сдвиге спектров.

Найденные значения ширин основных линий ЯМР (вклад протонов групп CH_2), коррелирующие с вязкостью, позволили построить график температурной зависимости ширины линии ЯМР (рис. 5), выраженной в условных единицах, для возможности его сравнения с графиком температурной зависимости вязкости.

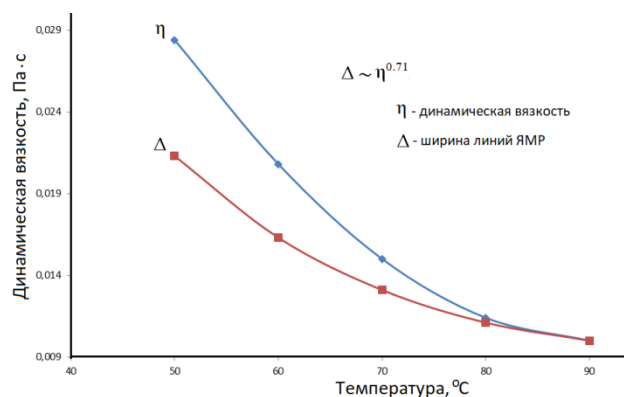


Рис. 5. Температурные зависимости вязкости (η) и ширины линии ЯМР (Δ)

Fig. 5. Temperature dependences of viscosity (η) and NMR line width (Δ)

В теории ЯМР считается, что для слабвязких жидких нефтепродуктов молекулярные движения всех насыщенных и ароматических углеводородных компонентов достаточно быстры, чтобы усреднить магнитные поля соседних спиновых систем. В этом случае $\Delta \sim \eta^n$, в котором $n = 1$. Это соотношение согласуется со стандартным расчетом времен релаксации на основе соотношения Стокса-Эйнштейна между коэффициентом поступательной диффузии и вязкостью. Однако для тяжелых нефтепродуктов, вязкость которых определяется асфальтенами, существуют аномальные особенности локального окружения, приводящие к значению $n = 1/2$ [19, 20, 32]. В нашем случае оказалось, что связь между вязкостью и шириной линии ЯМР также описывается аналогичным соотношением $\Delta \sim \eta^n$, в котором, однако, $n = 0,71$. Подобное соотношение, а также факт незначительного количества асфальтенов в нефтях Мангышлака, может говорить о наличии структурообразования, связанного с ассоциацией, но не асфальтенов, а высокомолекулярных парафинов.

Причина такого нетривиального поведения может заключаться в особенностях структурообразования и кристаллизации нормальных алканов. Многие средне- и длинноцепочечные алканы и их смеси обладают замечательным и нетривиальным физическим свойством – они образуют промежуточные структурированные фазы с особыми свойствами между своей изотропной жидкой фазой и полностью упорядоченной кристаллической фазой [33, 34]. Температурный диапазон существования данного явления для чистых алканов составляет несколько градусов. В смесях он значительно увеличивается. При смешивании различных длинноцепочечных молекул температура существования промежуточной пластической фазы может достигать до 100 °C [34].

Одно из подтверждений существования ассоциатов в нефтяных дисперсных системах было получено в работе [35]. С помощью лазерного анализатора был измерен непосредственный размер частиц парафинистой нефти Усть-Тегусского месторождения, в некоторой степени похожей по своим свойствам на рассмотренную нами нефтяную систему. Оказалось, что наиболее вероятные размеры частиц в нефти при повышении температуры и под влиянием сдвигового воздействия изменились незначительно и остались порядка 100 нм. По мере повышения скорости сдвига число частиц с таким размером чуть уменьшилось при небольшом увеличении числа частиц с размерами 1-2 нм. В целом, полученная картина распределения наночастиц в жидкой нефти при 60 °C совершенно не соответствовала представлениям о небольших (размером до нескольких десятков нанометров) смолисто-асфальтеновых частицах, находящихся в жидкой углеводородной среде. Тем не менее, именно реальное распределение наночастиц в нефти позволяет понять причины возникновения неньютоновского реологического поведения многих жидких образцов нефти и в частности, объяснить нетривиальную связь между шириной линии ЯМР и вязкостью с показателем степени n , значительно отличающимся от единицы, наблюдаемую даже для маловязких жидких нефтепродуктов.

Закключение

Проведенные исследования нефтяных остатков, складываемых вблизи нефтяных месторождений полуострова Мангышлак (Казахстан), показали существование интересных особенностей их состава и структуры. Большое содержание парафиновых углеводородов и малое количество асфальтенов в их составе позволяют рассматривать их как перспективное сырье для получения судового и котельного топлива. Малое количество серы в их составе является еще одной их отличительной положительной характеристикой. Изучение их

физико-химических свойств показало, что при температурах выше 50 °С образцы нефтяных остатков по своим вязкостным свойствам очень близки к мазуту М100. Добавление карбонатного шлама в концентрации 0,1 % (мас.) позволит добиться дополнительного снижения вязкости на 5-6 %.

Таким образом, проведенный комплекс физико-химических исследований показал возможность использования малосернистого мангышлакского нефтешлама в качестве основы для получения топлива для судовых двигателей, газотурбинных и котельных установок, паровых котлов и промышленных печей. Предварительный прогрев до 90 °С и Добавление средне-дистиллятных дизельных фракций позволит на основе нефтяных остатков получить более качественный вариант топлива с уменьшенными значениями вязкости и температурами застывания, хорошей калорийностью и низким содержанием серы.

Литература

1. McGill R, Remley W, Winther K. Alternative fuels for marine applications – A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement. 85 p. (2013) iea-amf.org
2. Kołwzan K., Narewski M. Alternative Fuels for Marine Applications // *Latvian Journal of Chemistry*, 4, 398 (2012).
3. Зверева Э.Р., Хабибуллина Р.В., Дремичева Е.С., и др. Изучение влияния деэмульгирующей присадки на свойства котельного топлива // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 9-10. С. 146-150.
4. Зверева Э.Р., Зуева О.С., Хабибуллина Р.В., и др. Повышение показателей качества котельного топлива при использовании присадок // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 1-2. С. 28-36.
5. Zvereva E.R., Khabibullina R.V., Makarova A.O., et al. *Petroleum Chemistry*. 2019. V. 59. P. 106-110.
6. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., Makarova A.O. Nanomaterial Effect Study in the Viscosity Characteristics of Fuel Oil and Alternative Fuels Used at Fuel and Energy Complex Enterprises // *J Eng Appl Sci*. 2016. V. 11. pp. 2950-2954.
7. Zvereva E.R., Zueva O.S., Khabibullina R.V., et al. Effect of Carbon-Nanotube-Based Additives on Rheological Properties of Liquid Boiler Fuel // *Chem. Technol Fuels Oils*. 2016. V. 52. pp. 488-494.
8. Zvereva E.R., Makarova A.O., Zueva O.S. Methods and Materials of Nanotechnologies for Improving the Boiler Fuel Properties // *Solid State Phenom*. 2018. V. 284. pp. 767-772.
9. da Silva L.J., Alves F.C., de França F.P. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries // *Waste Manage Res*. 2012. V. 30. pp. 1016-1030.
10. Johnson O.A., Affam A.C. Petroleum sludge treatment and disposal: A review // *Environmental Engineering Research*. 2019. V. 24. pp. 191-201.
11. Дремичева Е.С., Зверева Э.Р., Бурганова Ф.И., и др. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 1. С. 119-130.
12. Hu G., Li J., Zeng G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review // *J Hazard Mater*. 2013. V. 261. pp. 470-490.
13. Chen G., Cheng C., Zhang J., Sun Y., Hu Q., Qu C., Dong S. Synergistic effect of surfactant and alkali on the treatment of oil sludge // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. V. 183. № 106420.
14. Hu G., Feng H., He P., Li J., Hewage K., Sadiq R. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches // *Journal of Cleaner Production*. 2020. V. 251. № 119594.
15. Aliev N.U., Sakhatova G.S., Yagudeev T.A. Prospects for the processing of Mangyshlak oils. (2013) http://www.rusnauka.com/31_NNM_2013/Tecnic/10_147613.doc.htm
16. Bisenova M.A. Reasons for contamination of Zhetybai oilfield by microorganisms and corrosive activity of well products // *Oilfield Engineering*. 2014. № 8. С. 51-54.
17. Vdovenko S., Boichenko., Kochubei V. Composition and properties of petroleum sludge produced at the refineries // *Chemistry & Chemical Technology*. 2015. V. 9. № 2. pp. 257-260.
18. Almagambetova M.Zh., Konyrbayeva G.Kh. Research of oil sludge and their application in production // *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2015. V. 353. № 1. pp. 12-16.
19. Korb J-P., Voropalawut N., Nicot B., Bryant R.G. Relation and Correlation between NMR Relaxation Times, Diffusion Coefficients, and Viscosity of Heavy Crude Oils // *J. Phys. Chem. C*. 2015. V. 119. pp. 24439-24446.

20. Korb J-P. Multiscale nuclear magnetic relaxation dispersion of complex liquids in bulk and confinement // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2018, 104, pp.12-55.
21. Zvereva, E.R., Khabibullina, R.V., Akhmetvalieva, G.R., et al. 2017. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil, in: *Proceedings of the International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2017) in Advances in Engineering Research*. 133, 914-920.
22. Zadymova N.M., Skvortsova Z.N., Traskin V.Y., et al. Heavy oil as an emulsion: composition, structure, and rheological properties // *Colloid journal*. 2016. V. 78. № 6. P. 735-746.
23. Malkin A.Y. Oil as an Object of Rheology (Review) // *Pet. Chem*. 2019. V. 59. pp. 1092-1107.
24. Imamverdiyev Y.N., Hajirahimova M.Sh. Evaluation of Oil Viscosity Based Various Empirical Correlations for Azerbaijan Crude Oils // *I.J. Information Technology and Computer Science*. 2019. V. 6. pp. 18-27.
25. Aralov O.V., Buyanov I.V., Savanin A.S., et al. Research of methods for oil kinematic viscosity calculation in the oil-trunk pipeline // *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017. V.7. № 5. P. 97-105.
26. Дремичева Е.С., Зверева Э.Р. Изучение коррозионных процессов нефтяного оборудования // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 138-143.
27. Дмитриева О.С., Лорай С.Ф., Зинуров В.Э., и др. Определение оптимальных зон ввода твердых присадок в воздухопровод котла // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19. № 9-10. С. 106-111.
28. Sadykov B.R., Kalabin G.A., Starikov V.P., et al. Determination of the fractional composition of merchantable oil using quantitative [¹H] NMR spectra // *Petroleum Chemistry*. 2012. V. 52. № 1. pp. 22-27.
29. Sanchez-Minero F., Silva-Oliver G., Flores S., et al. Predicting SARA composition of crude oil by means of NMR // *Fuel*. 2013. V. 110. P. 318-321.
30. Zielinski L., Saha I., Freed D.E., et al. Probing Asphaltene Aggregation in Native Crude Oils with Low-Field NMR // *Langmuir*. 2010. V. 26. pp. 5014-5021.
31. Gao G., Cao J., Xu T., et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil as proxies for oil source and thermal maturity based on ¹H and ¹³C spectra // *Fuel*. 2020. V. 271. № 117622.
32. Hirasaki G., Lo S.-W., Zhang Y. NMR properties of petroleum reservoir fluids // *Magn. Reson. Imaging*. 2003. V. 21. pp. 269-277.
33. Srivastava S. P., Handoo J., Agrawal K. M., Joshi G. C. Phase-transition studies in n-alkanes and petroleum-related waxes-A review // *J. Phys. Chem. Solids* 1993, 54, pp. 639-670.
34. Cholakova D., Denkov N. Rotator phases in alkane systems: In bulk, surface layers and micro/nano-confinements // *Adv. Colloid Interface Sci*. 2019. 269, pp. 7-42.
35. Семихина Л.П., Пашнина А.М., Ковалева И.В., Семихин Д.В. Влияние температуры и напряжения сдвига на реологические свойства нефтяных дисперсных систем // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2018. Т. 4. № 3. С. 36-52.

Авторы публикации

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии в энергетике и нефтегазопереработке», Казанский государственный энергетический университет.

Макарова Анастасия Олеговна – мл. научн. сотр. лаборатории биофизической химии и наносистем, Казанский институт биохимии и биофизики КазНЦ РАН.

Туранов Александр Николаевич – канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр. лаборатории биофизической химии и наносистем, Казанский институт биохимии и биофизики КазНЦ РАН.

Бахтиярова Юлия Валерьевна – канд. хим. наук, зав. каф. «Высокомолекулярные и элементоорганические соединения», Химический институт имени А.М. Бутлерова – Казанский (Приволжский) федеральный университет.

Ильин Николай Павлович – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Королев Владислав Игоревич – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Зуева Ольга Стефановна – канд. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Физика», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. McGill R, Remley W, Winther K. *Alternative fuels for marine applications*. A Report from the IEA Advanced Motor Fuels Implementing Agreement. 85 p. (2013) iea-amf.org.
2. Kołwzan K, Narewski M. Alternative Fuels for Marine Applications. *Latvian Journal of Chemistry*, 4, 398 (2012) doi: 10.2478/v10161-012-0024-9.
3. Zvereva ER, Khabibullina RV, Dremicheva ES, et al. Study of the effect of a demulsifying additive on the properties of boiler fuel. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2016;9-10:146-150.
4. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Improving the quality of boiler fuel when using additives. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2016;1-2:28-36.
5. Zvereva ER, Khabibullina RV, Makarova AO, et al. *Petroleum Chemistry*. 2019;59:106-110. doi: 10.1134/S0965544119010158/.
6. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Nanomaterial Effect Study in the Viscosity Characteristics of Fuel Oil and Alternative Fuels Used at Fuel and Energy Complex Enterprises. *J Eng Appl Sci*. 2016;11:2950-2954. doi: 10.36478/jeasci.2016.2950.2954
7. Zvereva ER, Zueva OS, Khabibullina RV, et al. Effect of Carbon-Nanotube-Based Additives on Rheological Properties of Liquid Boiler Fuel. *Chem. Technol Fuels Oils*. 2016;52:488-494. doi: 10.1007/s10553-016-0734-x.
8. Zvereva ER, Makarova AO, Zueva O.S. Methods and Materials of Nanotechnologies for Improving the Boiler Fuel Properties. *Solid State Phenom.* 2018;284:767-772. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.767.
9. da Silva LJ, Alves FC, de França FP. A review of the technological solutions for the treatment of oily sludges from petroleum refineries. *Waste Manage Res*. 2012;30:1016-1030. doi: 10.1177/0734242X12448517.
10. Johnson OA, Affam AC. Petroleum sludge treatment and disposal: A review. *Environmental Engineering Research*. 2019;24:191-201. doi: 10.4491/eer.2018.134.
11. Dremicheva ES, Zvereva ER, Burganova FI, et al. Prospects of the technology of co-combustion of biomass and coal at energy facilities. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(1):119-130.
12. Hu G, Li J, Zeng G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review. *J. Hazard Mater.* 2013;261:470-490. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.07.069.
13. Chen G, Cheng C, Zhang J, et al. Synergistic effect of surfactant and alkali on the treatment of oil sludge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019;183:106420. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106420.
14. Hu G, Feng H, He P, et al. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches. *Journal of Cleaner Production*. 2020;251:119594. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119594.
15. Aliev NU, Sakhatova GS, Yagudeev TA. Prospects for the processing of Mangyshlak oils. (2013) http://www.rusnauka.com/31_NNM_2013/Tecnic/10_147613.doc.htm.
16. Bisenova M.A. Reasons for contamination of Zhetybai oilfield by microorganisms and corrosive activity of well products. *Oilfield Engineering*. 2014;8:51-54.
17. Vdovenko S, Boichenko, Kochubei V. Composition and properties of petroleum sludge produced at the refineries. *Chemistry & Chemical Technology*. 2015;9(2):257-260. doi: 10.23939/chcht09.02.257.
18. Almagambetova MZh, Konyrbayeva GK. Research of oil sludge and their application in production. *Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2015;353(1):12-16.
19. Korb J-P, Vorapalawut N, Nicot B, et al. Relation and Correlation between NMR Relaxation Times, Diffusion Coefficients, and Viscosity of Heavy Crude Oils. *J. Phys. Chem. C*. 2015;119:24439-24446. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b07510.
20. Korb J-P. Multiscale nuclear magnetic relaxation dispersion of complex liquids in bulk and confinement. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*, 2018;104:12-55. doi: 10.1016/j.pnmrs.2017.11.001.
21. Zvereva ER, Khabibullina RV, Akhmetvalieva GR, et al. 2017. Influence of Nanoadditives on Rheological Properties of Fuel Oil, in: *Proceedings of the International*

Conference «Actual Issues of Mechanical Engineering» (AIME 2017) in Advances in Engineering Research. 133, 914-920. <https://doi.org/10.2991/aime-17.2017.148>.

22. Zadymova NM, Skvortsova ZN, Traskin VY, et al. Heavy oil as an emulsion: composition, structure, and rheological properties. *Colloid journal*. 2016;78(6):735-746. doi: 10.7868/S0023291216060227.

23. Malkin AY. Oil as an Object of Rheology (Review). *Pet. Chem.* 2019;59:1092-1107. doi: 10.1134/S0965544119100062.

24. Imamverdiyev YN, Hajirahimova MSh. Evaluation of Oil Viscosity Based Various Empirical Correlations for Azerbaijan Crude Oils. *I.J. Information Technology and Computer Science*. 2019;6:18-27. doi: 10.5815/ijitcs.2019.06.03.

25. Aralov OV, Buyanov IV, Savanin AS, et al. Research of methods for oil kinematic viscosity calculation in the oil-trunk pipeline. *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2017;7(5):97-105. doi: 10.28999/2221-2701-7-5-97-105

26. Dremicheva ES, Zvereva ER. Study of corrosion processes of oil equipment. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018;20(1-2):138-143.

27. Dmitrieva OS, Lorai SF, Zinnurov VE, et al. Determination of optimal zones for the introduction of solid additives into the boiler duct. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2017;19(9-10):106-111.

28. Sadykov BR, Kalabin GA, Starikov VP, et al. Determination of the fractional composition of merchantable oil using quantitative [¹H] NMR spectra. *Petroleum Chemistry*. 2012;52(1):22-27. doi: 10.1134/S0965544112010094.

29. Sanchez-Minero F, Silva-Oliver G., Flores S., et al. Predicting SARA composition of crude oil by means of NMR. *Fuel*. 2013;110:318-321. doi: 10.1016/j.fuel.2012.10.027.

30. Zielinski L, Saha I, Freed DE, et al. Probing Asphaltene Aggregation in Native Crude Oils with Low-Field NMR. *Langmuir*. 2010;26:5014-5021. doi: 10.1021/la904309k.

31. Gao G, Cao J, Xu T, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopy of crude oil as proxies for oil source and thermal maturity based on ¹H and ¹³C spectra. *Fuel*. 2020;271:117622. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117622.

32. Hirasaki G, Lo S.-W, Zhang Y. NMR properties of petroleum reservoir fluids. *Magn. Reson. Imaging*. 2003;21:269-277. doi: 10.1016/S0730-725X(03)00135-8.

33. Srivastava SP; Handoo J, Agrawal KM, et al. C. Phase-transition studies in n-alkanes and petroleum-related waxes-A review. *J. Phys. Chem. Solids* 1993;54:639-670.

34. Cholakova D, Denkov, N. Rotator phases in alkane systems: In bulk, surface layers and micro/nano-confinements. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2019;269:7-42.

35. Semikhina LP, Panina AM, Kovaleva IV, et al. Influence of temperature and shear stress on rheological properties of oil dispersed systems. *Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. 2018;4(3):36-52. doi: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-36-52.

Authors of the publication

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University.

Anastasiya O. Makarova – Kazan institute of biochemistry and biophysics of Kazan scientific center of the Russian academy of sciences.

Alexander N. Turanov – Kazan institute of biochemistry and biophysics of Kazan scientific center of the Russian academy of sciences.

Yulia V. Bakhtiyarova – Butlerov Institute of Chemistry, Kazan (Volga Region) Federal University.

Nikolay P. Ilyin – Kazan State Power Engineering University.

Vladislav I. Korolev – Kazan State Power Engineering University.

Olga S. Zueva – Kazan State Power Engineering University.

Получено 28.02.2022г.

Отредактировано 09.03.2022г.

Принято 09.03.2022г.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО СИНХРОННОГО МНОГООБМОТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

Д.А. Котин, И.А. Иванов

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть существующие способы использования электромеханических преобразователей для электроснабжения автономного потребителя. Провести сравнительный анализ электромеханических преобразователей, сценариев и условий их использования при электроснабжении автономного потребителя. Разработать предложения по устранению недостатков в существующих моделях синхронных генераторов с целью увеличения управляемости ими. Провести разработку математического описания синхронного генератора с магнитоэлектрическим возбуждением от постоянных магнитов однофазного типа с упрощенной конструкцией в качестве универсального примера функционирования всей предложенной линейки синхронных генераторов. Провести математическое моделирование генератора для подтверждения рассматриваемого способа регулирования генерируемых параметров, таких как ток и напряжение, без необходимости изменения скорости вращения вала генератора. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применялся метод описания электрической машины в dq-системе координат с использованием многообмоточного описания машины, для подтверждения предложенного способа регулирования использовалось математическое моделирование в среде SimInTech. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности эксплуатации различных электромеханических преобразователей для электроснабжения автономного потребителя, указаны условия применения того или иного типа архитектуры системы электроснабжения в связке с электромеханическими преобразователями. Предложена линейка синхронных генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением с целью улучшения управляемости ими, а именно, возможностью регулирования выходных генерируемых параметров. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Использование предложенных синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов позволит производить дополнительное регулирование генерируемых параметров. Данный способ даст возможность полностью или частично исключить дополнительную полупроводниковую преобразовательную технику, благодаря чему снизит потери при преобразовании электрической энергии. При чем существует возможность регулировать генерируемые ток и напряжение дискретно в два раза увеличив одну из этих величин. Выбранный способ регулирования зависит от конструкции генератора.

Ключевые слова: Синхронные генераторы; постоянные магниты; автономный потребитель; microgrid, SimInTech; многообмоточные генераторы.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, финансировалась РФФИ, Сириусским университетом науки и технологий, ОАО «РЖД» и Образовательным фондом «Талант и успех», проект № 20-38-51007.

Для цитирования: Котин Д.А., Иванов И.А. Использование однофазного синхронного многообмоточного генератора с постоянными магнитами для электроснабжения автономного потребителя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.

USING OF A SINGLE-PHASE SYNCHRONOUS MULTI-WINDING GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS FOR THE POWER SUPPLY OF AN AUTONOMOUS CONSUMER

DA. Kotin, IA. Ivanov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-3879-3029>, d.kotin@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7189-8178>, i.a.ivanov@corp.nstu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the existing ways of using electromechanical converters for power supply of an autonomous consumer. Conduct a comparative analysis of electromechanical converters, scenarios and conditions for their use in the power supply of an autonomous consumer. To develop a proposal to eliminate the shortcomings in existing models of synchronous generators in order to increase their controllability. To develop a mathematical description of a synchronous generator with magnetoelectric excitation from permanent magnets of a single-phase type with a simplified design as a universal example of the functioning of the entire proposed line of synchronous generators. Carry out mathematical modeling of the generator proposed for consideration in order to confirm the proposed method of regulating the generated parameters, such as current and voltage, without the need to change the generator shaft rotation speed. *METHODS.* When solving the problem, the method of describing an electric machine in a dq-coordinate system using a multi-winding description of the machine was used; to confirm the proposed control method, mathematical modeling with the SimInTech environment was used. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, considers the features of the operation of various electromechanical converters for power supply of an autonomous consumer, indicates the conditions for the use of one type or another of the architects of the power supply system in conjunction with electromechanical converters. A line of synchronous generators with magnetoelectric excitation is proposed in order to improve their controllability, namely, the ability to regulate the output generated parameters. *CONCLUSION.* Using of the proposed synchronous generators with excitation from permanent magnets will allow for additional regulation of the generated parameters, thereby allowing either completely or partially to exclude additional semiconductor converting equipment, thereby reducing losses during the conversion of electrical energy. Moreover, it is possible to regulate the generated current and voltage discretely by two times increasing one of these values, this method of regulation depends on the design of the generator.

Keywords: Synchronous generators; permanent magnets; stand-alone consumer; microgrid; SimInTech; multi-winding generators.

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, Sirius University of Science and Technology, JSC Russian Railways and Educational Fund «Talent and success», project number 20-38-51007.

For citation: Kotin DA, Ivanov IA. Using of a single-phase synchronous multi-winding generator with permanent magnets for the power supply of an autonomous consumer. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 29-38. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-29-38.

Введение

В современной электроэнергетической отрасли все чаще и чаще обращаются к построению системы электроснабжения по принципу «Умной сети» (*Smart-grid*). Данная тенденция также затронула и системы электроснабжения автономного потребителя и получила название «Микро-сети» или *Micro-grid (MG)*. Принцип сети, построенной по архитектуре *MG*, базируется на энергоэффективном потреблении и генерации электрической энергии из локальных или местных источников энергии, которые находятся непосредственно рядом с потребителем. Использование локальных источников энергии для электроснабжения потребителя получило название – распределённая генерация (РГ) [1, 2], которая включает в себя как возобновляемые источники энергии (ВИЭ), так и традиционные источники энергии. Примером традиционных источников

энергии является сжигание разных видов топлив. Таким образом, можно сказать, что современная система электроснабжения автономного потребителя строится по архитектуре MG с использованием РГ [3], при чем источники энергии выбираются из лёгкости доступа к ним и просты в обслуживании устройств преобразования любого типа энергии в электрическую.

В качестве устройств, преобразующих первичную энергию в электрическую, могут выступать как полупроводники, так и электромеханические преобразователи (ЭМП), т.е. электрическая машина, работающая в режиме генератора.

Так в качестве ЭМП при РГ часто рассматривают машины переменного тока. Это связано прежде всего с тем, что их легче обсуживать по сравнению с машинами постоянного тока и проще транспортировать электроэнергию от генерирующей единицы к потребителю. Так распространение получили асинхронные машины с короткозамкнутым ротором (АМКР), асинхронизированная синхронная машина (АСМ) и синхронная машина с постоянными магнитами (СМПМ), которые используются в системе выработки электроэнергии, использующей ВИЭ.

В большинстве случаев выбор электрической машины зависит от мощности автономного потребителя, на основании которой происходит выбор архитектуры схемы построения системы электроснабжения. Так для электроснабжения мощного потребителя используют АСМ, подключая ее непосредственно на параллельную работу с потребителем и/или с основной системой электроснабжения [4, 5]. Синхронизация генерируемого напряжения с напряжением сети происходит за счет использования полупроводниковых преобразователей, которые позволяют регулировать как частоту вращения магнитного поля ротора, но также и величину потокосцепления машины, тем самым позволяя регулировать генерируемые параметры без изменения скорости вращения машины.

Маломощный потребитель или маломощная группа генерирующих устройств может иметь промежуточную общую шину постоянного напряжения, что позволяет использовать электрические машины без непосредственной синхронизации частоты вращения поля машины с частотой напряжения сети потребителя [5, 6]. Это позволяет использовать в качестве электрических генераторов, такие как АМКР и СМПМ. У данных типов машин отсутствует возможность напрямую регулировать частоту выходного напряжения без изменения скорости вращения магнитного поля. Также у них отсутствует возможность регулирования величины выходного напряжения без изменения скорости вращения магнитного поля машины. Таким образом, за счет использования промежуточной шины постоянного тока можно синхронизировать полученное напряжение, как по уровню, так и по частоте напряжения с параметрами сети [7, 8] с использованием полупроводниковой техники.

Рассмотрим систему электроснабжения автономного маломощного потребителя. Как было сказано выше, в данной системе электроснабжения наибольшее применение нашли АМКР и СМПМ. В связи с условиями эксплуатации, а именно, необходимостью высокой степени автономности, чаще всего используют СМПМ. Это вызвано тем, что для СМПМ в генераторном режиме работы в отличие от АМКР не требуются дополнительные устройства создания реактивной мощности. Например, конденсаторные батареи для обеспечения генераторного режима работы, что возможно благодаря магнитоэлектрическому возбуждению машины от постоянных магнитов, находящихся на роторе СМПМ [9-12].

Но как было сказано выше, данные генераторы не имеют возможности регулировать генерируемые параметры непосредственно за счет машины. Для решения данной проблемы авторами были предложены и разработаны модифицированные синхронные генераторы с постоянными магнитами.

Материалы и методы

Для решения проблемы возможности регулирования выходных параметров СМПМ, работающей в режиме генератора для электроснабжения автономного потребителя, был разработан ряд синхронных генераторов с различной конфигурацией. Они будут отличаться друг от друга количеством обмоток на статоре и различным количеством фаз выходного напряжения. Данная линейка позволяет разработать системы электроснабжения объекта с любым числом фаз, а по причине того, что многообмоточную конфигурацию обмоток статора можно регулировать выходные параметры генерируемого тока и напряжения. Поскольку была разработана широкая линейка генераторов, рассмотрим принцип их работы, получения их математического описания и исследования их математических моделей на простом примере однофазного

генератора с упрощенной конструкцией.

Однофазный генератор с упрощённой конструкцией, представленный на рисунке 1, имеющий на статоре две обмотки ($L1$, $L2$), расположенные территориально диаметрально противоположно друг другу и постоянный магнит на валу.

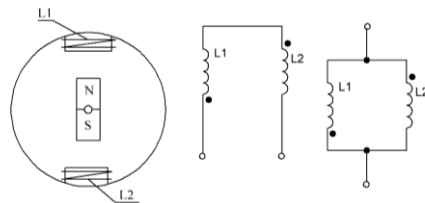


Рис. 1. Генератор с упрощенной конструкции

Fig. 1. Generator with simplified design

При последовательно-встречном соединении обмоток статора (рисунок 1) создается двойное напряжение на выходе генератора, полученное путем сложения наводимых ЭДС на обмотках генератора.

Наведение напряжения происходит по периодическому закону на каждой обмотке, а, следовательно, генерируемое напряжение можно тоже записать в периодическом виде:

$$u_{обмi} = U_{mi} \sin \omega t ,$$

где $u_{обмi}$ – напряжение на i -той обмотке статора, U_{mi} – амплитуда i -того напряжения,

Обмотки статора расположены относительно друг друга строго на 180° , а за счет специального их соединения, последовательно-встречное напряжение, наводимое в них, всегда имеет одинаковое направление. Следовательно, суммарное значение напряжения определяется формулой:

$$u_{\Sigma} = u_{обм1} + u_{обм2} = U_{m1} \sin(\omega t) - U_{m2} \sin(\omega t + 180) ,$$

где u_{Σ} – суммарное генерируемое напряжение.

Кроме того, обмотки статора имеют одинаковое конструктивное исполнение, следовательно, создаваемые ими действующие значения напряжений будут равны. Согласно вышесказанному, суммарное напряжение можно определить как:

$$u_{\Sigma} = 2U_{m1} \sin(\omega t) = 2u_{обм1} .$$

Тогда суммарная генерируемая мощность определяется по формуле:

$$S_{\Sigma} = i u_{\Sigma} = 2u_{обм1} i = 2S_{обм1} ,$$

где i – генерируемый ток, $S_{обм1}$ – генерируемая мощность одной обмоткой статора, S_{Σ} – суммарная генерируемая мощность.

Так согласно формуле, определяющей полную мощность, происходит увеличение создаваемой мощности в два раза по сравнению с мощностью выдаваемой одной обмоткой.

Обмотки статора данного генератора могут быть соединены параллельно-сонаправленно, что приведёт к увеличению значения вырабатываемого тока. Этот процесс будет описываться следующим образом:

$$i_{обмi} = I_{mi} \sin \omega t ,$$

где $i_{обмi}$ – ток на i -той обмотке статора, I_{mi} – амплитуда i -того тока,

Поскольку обмотки статора соединены параллельно-сонаправленно, то будет происходить сложение токов по формуле,

$$i_{\Sigma} = i_{обм1} + i_{обм2} = I_{m1} \sin(\omega t) - I_{m2} \sin(\omega t + 180) ,$$

где i_{Σ} – суммарное значение генерируемого тока.

Обмотки статора расположены относительно друг друга строго на 180° за счет специального их соединения. Ток, наводимый в них, всегда имеет одинаковое направление. Так же, если учесть, что обмотки статора имеют одинаковое конструктивное исполнение, следовательно, создаваемое ими действующие значения тока, будут равны. Согласно вышесказанному, суммарный ток можно определить как:

$$i_{\Sigma} = 2I_{m1} \sin(\omega t) = 2i_{обм1} .$$

Тогда суммарная генерируемая мощность:

$$S_{\Sigma} = u i_{\Sigma} = 2i_{обм1} u = 2S_{обм1} ,$$

где u – генерируемое напряжение, $S_{обм1}$ – генерируемая мощность одной обмоткой статора, S_{Σ} – суммарная генерируемая мощность.

Таким образом, согласно формуле, определяющей полную мощность, происходит увеличение создаваемой мощности в два раза по сравнению с мощностью, выдаваемой одной обмоткой.

Для разработки математического описания (модели) однофазного генератора с упрощенной конструкцией разработаем электрическую модель предложенного генератора и составим для нее уравнение полного напряжения (закон Кирхгофа) и описание потокоцепления обмоток статора согласно нижеприведённому принципу [9-14].

$$-\frac{d\Psi_c}{dt} = i_c R_c + i_c Z_n,$$

$$\Psi_c = Li_1 + \mu \sum_{k=2}^n i_k.$$

Так, согласно рисунку 1, имеются две независимых обмотки на статоре по оси q и одна обмотка на роторе по оси q . Согласно вышесказанному, электрическая модель обмоток статора будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

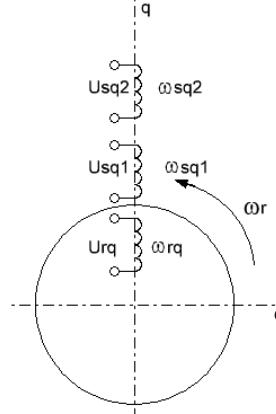


Рис. 2. Электрическая модель генератора с упрощенной конструкцией

Fig. 2. Electrical model of a generator with a simplified design

Согласно электрической модели, представленной на рисунке 2 и вышеизложенному описанию определения полного напряжения и потокоцепления, обмоток статора определяются параметры напряжения и потокоцепления для каждой обмотки [15-20]:

$$-\frac{d\Psi_{cq1}}{dt} = i_{cq1} R_{cq1} + \frac{1}{2} i_{cq1} Z_n,$$

$$\Psi_{cq1} = L_{cq1} i_{cq1} + \mu i_{cq2} - \Psi_{pq},$$

$$-\frac{d\Psi_{cq2}}{dt} = i_{cq2} R_{cq2} + \frac{1}{2} i_{cq2} Z_n,$$

$$\Psi_{cq2} = L_{cq2} i_{cq2} + \mu i_{cq1} - \Psi_{pq},$$

где Ψ_{cqi} – потокоцепление i -той обмотки,

R_{cqi} – активное сопротивление i -той обмотки статора,

i_{cqi} – ток в i -той обмотке статора,

L_{cqi} – индуктивное сопротивление i -той обмотки статора,

μ – взаимоиנדуктивность обмоток,

Ψ_{pq} – потокоцепление постоянного магнита на роторе,

Z_n – нагрузка генератора.

Если наиболее часто повторяющимся случаем работы генератора является статический режим работы, то ряд математических зависимостей потерпит видоизменение. Так механическая составляющая будет равняться нулю, т.е. момент сопротивления и развиваемый электрический момент генератора будут равны, а их разница будет равно нулю.

Так же проведём ряд преобразований в описании уравнений описывающих электромагнитные взаимодействия обмоток статора генератора, и они примут следующий вид:

$$\omega \Delta \Psi_{cq1} = i_{cq1} R_{cq1} + L_{cq1} \frac{di_{cq1}}{dt} + \frac{1}{2} U_n,$$

$$\Delta\Psi_{cq1} = \Psi_{p0} - \mu i_{cq2},$$

$$\Psi_{p0} = |\Psi_{p0}| \sin(\omega_n t + 0 \cdot \pi),$$

$$\omega \Delta\Psi_{cq2} = i_{cq2} R_{cq2} + L_{cq2} \frac{di_{cq2}}{dt} + \frac{1}{2} U_n,$$

$$\Delta\Psi_{cq2} = \Psi_{p0} - \mu i_{cq1},$$

$$\Psi_{p0} = |\Psi_{p0}| \sin(\omega_n t + 1 \cdot \pi).$$

Согласно предложенному математическому описанию, разработаем математическую модель генератора.

Результаты

Математическое моделирование в статическом режиме ($\Delta M=0$) составлено в среде «SimInTech». Статический режим работы генератора обусловлен условием работы генератора в энергетической системе электроснабжения автономного потребителя. В таком режиме время переходного процесса электромеханического преобразователя обычно значительно ниже, чем изменение входных величин.

Согласно разработанному математическому описанию, была получена математическая модель, представленная на рисунке 3.

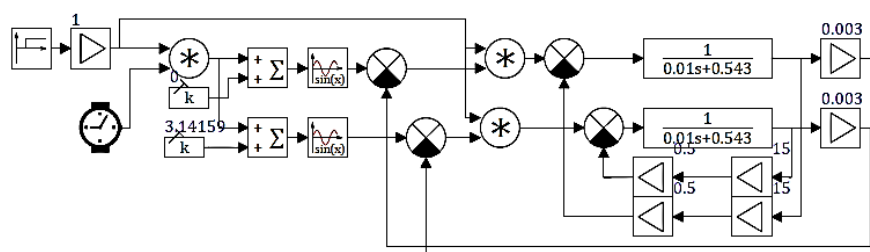


Рис. 3. Математическая модель генератор с упрощенной конструкцией

Fig. 3. Mathematical model of a generator with a simplified design

При разработке математической модели были использованы как опорные данные, так и данные синхронного генератора с постоянными магнитами PEOR132S6 фирмы VEM. Параметры, необходимые для моделирования и нагрузки активного типа, представлены в таблице ниже (при работе на активную нагрузку 15 Ом).

Параметры генератора

R_c , Ом	L_c , мГ	μ , мГ	U_n , В	I_n , А	R_n , Ом
0,547	6,91	3,03	369	29,3	15

В результате проведения математического моделирования предложенного генератора с упрощенной конструкцией были получены графики токов, протекающих через обмотки статора и выделенную нагрузку. Напряжение на каждой из обмоток (рис. 4), где кривыми красного и жёлтого цвета обозначены токи ($is1$, $is2$), создаваемые обмотками генератора, а синим и черным – наводимого напряжения на обмотках генератора ($us1$, $us2$). Также получены графики, отражающие величины генерируемого напряжения и генерируемого тока с использованием специального соединения обмоток статора. Результаты сравнимого значения с показателями обмотки генератора представлены на рис. 5 и 6.

Согласно рисункам 5 и 6, происходит увлечение генерируемых параметров, таких как генерируемое напряжение и ток. Так, используя последовательное соединение обмоток статора (рис. 5), происходит увеличение генерируемого суммарного напряжения (ug) в 2 раза (красная кривая) относительно значения ($us1$) на отдельно взятой обмотке статора (фиолетовая кривая). При использовании параллельного соединения обмоток статора (рис. 6) происходит увеличенная генерация тока (ig), протекающего в обмотках статора через нагрузку в два раза (красная кривая) относительно генерируемого тока ($is1$) одной обмотки (черная кривая).

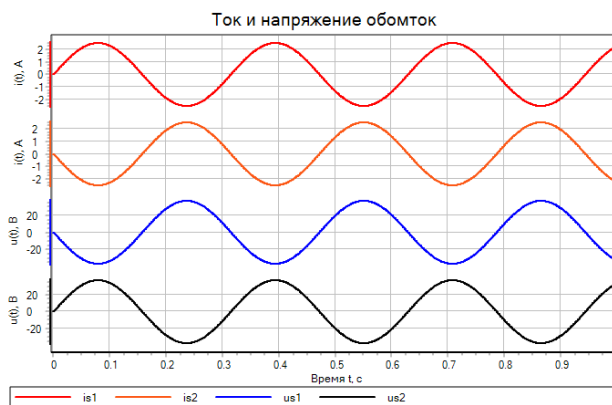


Рис. 4. Генерируемые параметры обмоток генератора *Fig. 4. Generated parameters of the generator windings*

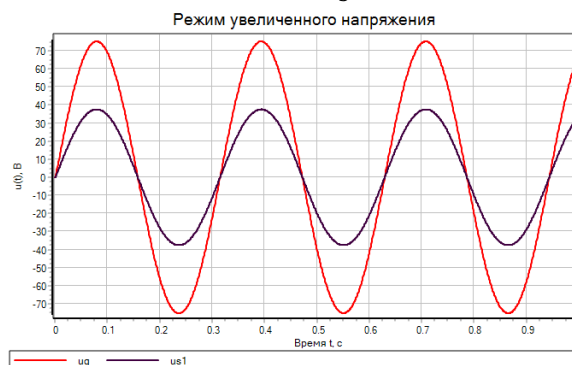


Рис. 5. Генерируемое напряжения генератора при последовательном соединении обмоток статора *Fig. 5. The generated voltage of the generator when the stator windings are connected in series*

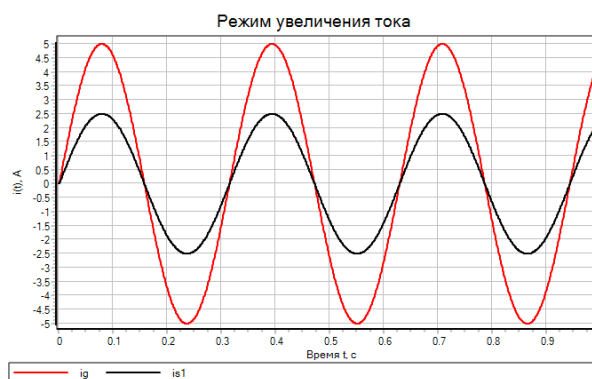


Рис. 6. Генерируемые ток генератора при параллельном соединении обмоток статора *Fig. 6. Generated generator currents when the stator windings are connected in parallel*

Обсуждение результатов

Согласно представленному алгоритму работы многообмоточного СМПС, процессу получения математического описания и математической модели при рассмотрении их а примере однофазного синхронного генератора с упрощенной конструкцией, можно получить математические описания более сложных конфигураций СМПС. А благодаря проведенному математическому моделированию, можно сказать, что предлагаемый генератор позволяет повысить управляемость энергетического комплекса, вырабатывающего электроэнергию для автономного потребителя, и граничные условия работы нескольких источников с использованием электромеханических преобразователей. Примерами таких источников энергии являются ветряные турбины, мини- и микрогидроэлектростанции, биогазовые установки и т.д. Улучшение управляемости и расширение границ рабочих условий обеспечивается возможностью

регулирования соотношений генерируемых токов и напряжений, тем самым позволяя им уменьшать объем своего потока при избытке генерируемой мощности. Уменьшая величину тока и увеличивая напряжение, которое может дополнительно регулироваться понижающим преобразователем, или при недостатке энергии уменьшать величину генерируемого напряжения, тем самым увеличивается объем генерируемого тока за счет повышения перегрузки генератора током посредством передачи его объема между обмотками, соединенными параллельно. Кроме того, генераторы расширяют границы работы генерирующего агрегата, например, работу ветрогенератора, который ограничен по скорости ветра как меньшим значением, так и максимальным значением. Это также возможно благодаря изменению соединения обмоток статора, что позволяет увеличить как нижний, так и верхний пределы рабочей скорости ветрогенератора в два раза.

Выводы

В процессе данной работы было предложено использование синхронных генераторов с постоянными магнитами со специальной конструкцией статора для электроснабжения автономных объектов малой мощности. Можно сказать, что разработанные генераторы обладают лучшими энергетическими показателями, а именно увеличенными значениями генерируемой мощности, тока и напряжения, а также улучшенными свойствами в области регулирования генерируемых параметров, таких как генерируемые ток и напряжения. Также было получено математическое описание генератора и проведен анализ полученных данных генерируемых параметров, который подтвердил указанные в статье утверждения.

Литература

1. Суслов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. № (1-2). С. 70-79.
2. Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Майоров Г.С. Применение мультиагентного подхода для моделирования интегрированных энергетических систем. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №(6). С. 29-42.
3. Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №(4). С. 64-78.
4. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. № (1).С. 36-144.
5. Золотов И.И., Шевцов А.А. Влияние потребителей электроэнергии на форму питающего напряжения автономных систем электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. №(1-2). С.131-140.
6. Мехтиев А.Д., Алькина А.Д., Югай В.В., и др. Сравнительный анализ и перспективы использования многотопливных микро тепловых электростанций на основе двигателя стирлинга для сельских районов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(5). С. 3-17.
7. Фишов А.Г., Мурашкина И.С., Марченко А.И., и др. Исследование влияния электронной генерации на статическую апериодическую устойчивость электроэнергетической системы. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(2). С. 51-64.
8. Сафин А.Р., Ившин И.В., Грачева Е.И., и др. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. №(1). С.38-48.
9. Kotin D., Tolstobrova L., and Ivanov I. Mathematical modeling of multi-winding synchronous generators with permanent magnets for autonomous consumers, 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings, May 2021.
10. Kotin D., Ivanov I., and Shtukkert S. Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer. Energies 2021, V. 14, no. 21. p. 7196. Nov. 2021.
11. Kotin D. and Ivanov I. New type single-phase generator for autonomous consumer. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and

Manufacturing, ICIEAM 2020, May 2020.

12. Halina T., Ivanov I., and Stalnaya M. Sine-cosine Generator. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Oct. 2019.

13. Bulatov YuN., Kryukov AV and Nguyen V.H. Modeling a gas-turbine unit with prognostic regulators of voltage and speed. *Power engineering: research, equipment, technology*, V. 22. no. 3. pp. 60–67. Sep. 2020.

14. Ачитаев А.А., Жидков А.А., Митрофанов С.В. Исследование управляемой гибкой связи турбины и генератора микроГЭС в автономной электроэнергетической системе // *Электричество*. 2020. № 1. С. 25-31.

15. Fedorov T. Synchronous generators for traction mechanisms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 918. no. 1. Oct. 2020.

16. Chen J., Liu M., and O'Donnell T. Replacement of Synchronous Generator by Virtual Synchronous Generator in the Conventional Power System. IEEE Power and Energy Society General Meeting. V. 2019-August, Aug. 2019.

17. Yan X., Mohamed S.Y.A., Li D., and Gadalla A. S. Parallel operation of virtual synchronous generators and synchronous generators in a microgrid. *The Journal of Engineering*. V. 2019. no. 16. pp. 2635–2642, Mar. 2019.

18. Shi Q., Wang G., Fu L., et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory. *Dianwang Jishu/Power System Technology*. V. 39. no. 3. pp. 783–790. Mar. 2015.

19. Popovski P., Veljanovski G., Arapinovski B., et al. Electromagnetic Analysis of Synchronous Generator. 2021 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2021 - Proceedings, pp. 189–192, Jun. 2021.

20. Chen X., Zhang C., Huang Q., et al. Small signal modeling for virtual synchronous generator consistent with synchronous generator and analysis. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*. V. 37. no. 11. pp. 78–85. Nov. 2017.

Авторы публикации

Котин Денис Алексеевич – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электропривода и автоматизации промышленных установок», (ЭАПУ) Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

Иванов Илья Алексеевич – аспирант, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ).

References

1. Suslov KV, Shushpanov IN, Vorontsov DV. USE OF RENEWABLE SOURCES OF ENERGY FOR NUTRITION OF OWN REQUIREMENTS OF OIL PIPELINE. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):70-79. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-70-79>.

2. Stennikov VA, Barakhtenko EA, Mayorov GS. Application of the multiagent approach for modeling integrated energy systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):29-42. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-29-42>.

3. Gorodnov AG. Design of energy efficient electrotechnical complexes with an autonomous electric supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(4):64-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-64-78>.

4. Savenko AE, Savenko PS. Influence of time constants of frequency regulators on the amplitude of power exchange fluctuations in autonomous diesel power plants. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):136-144. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-136-144>.

5. Zolotov II, Shevcov AA. INFLUENCE OF ELECTRICITY CONSUMERS ON THE AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS VOLTAGE FORM. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(1-2):131-140. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-131-140>.

6. Mekhtiyev AD, Al'kina AD, Yugay VV, et al. Comparative analysis and prospects of the use of multi -fuel micro-thermal power stations on the basis of the steeling engine for rural areas. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(5):3-17. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-3-17>.

7. Fishov AG, Murashkina IS, Marchenko AI, et al. The study of electronic generation effect on statical aperiodic stability of electrical power system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):51-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-51-64>.
8. Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, et al. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(1):38-48. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48>.
9. Kotin D, Tolstobrova L, Ivanov I. *Mathematical modeling of multi-winding synchronous generators with permanent magnets for autonomous consumers*. 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings, May 2021, doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462302.
10. Kotin D., Ivanov I., Shtukkert S. Modified Permanent Magnet Synchronous Generators for Using in Energy Supply System for Autonomous Consumer. *Energies* 2021;21(14):7196. Nov. 2021. doi: 10.3390/EN14217196.
11. Kotin D, Ivanov I. *New type single-phase generator for autonomous consumer*. Proceedings - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020, May 2020, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112062.
12. Halina T, Ivanov I, and Stalnaya M. *Sine-cosine Generator*. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Oct. 2019, doi: 10.1109/FAEASTCON.2019.8934028.
13. Bulatov YuN, Kryukov A.V, and Nguyen VH. Modeling a gas-turbine unit with prognostic regulators of voltage and speed. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):60–67. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-3-60-67.
14. Achitaev A.A., Zhidkov A.A., Mitrofanov S.V., et al. Studying the controlled flexible coupling of the Micro HPP Turbine and Generator Operating in a Self-Contained Electric Power System. *Elektrichestvo*.2020;1(1):25–31. doi: 10.24160/0013-5380-2020-1-25-31.
15. Fedorov T. Synchronous generators for traction mechanisms. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.2020;918(1). doi: 10.1088/1757-899X/918/1/012159.
16. Chen J., Liu M., and O'Donnell T. *Replacement of Synchronous Generator by Virtual Synchronous Generator in the Conventional Power System*. IEEE Power and Energy Society General Meeting. V. 2019-August. doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973650.
17. Yan X, Mohamed S.Y.A, Li D, and Gadalla AS. Parallel operation of virtual synchronous generators and synchronous generators in a microgrid. *The Journal of Engineering*. 2019;2019(16):2635–2642. Mar. 2019, doi: 10.1049/JOE.2018.8644.
18. Shi Q, Wang G, Fu L, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory. Dianwang Jishu. *Power System Technology*. 2015;39(3):783–790. Mar. 2015, doi: 10.13335/J.1000-3673.PST.2015.03.030.
19. Popovski P, Veljanovski G, Arapinovski B, et al. Electromagnetic Analysis of Synchronous Generator. 2021. 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICESS 2021 - Proceedings, pp. 189–192, Jun. 2021. doi: 10.1109/ICEST52640.2021.9483490.
20. Chen X, Zhang C, Huang Q, et al. Small signal modeling for virtual synchronous generator consistent with synchronous generator and analysis. Dianli Zidonghua Shebei. *Electric Power Automation Equipment*. 2017;37(11):78–85. Nov. 2017, doi: 10.16081/J.ISSN.1006-6047.2017.11.013.

Authors of the publication

Denis A. Kotin - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Ilya A. Ivanov - Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Получено 28.02.2022г.

Отредактировано 14.03.2022г.

Принято 16.03.2022г.

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТАМИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕДОБЫЧИ СО СТРАТЕГИЕЙ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

В.М. Левин, Н.П. Гужов, Д.А. Боярова

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть аспекты решения комплексной задачи обоснованного выбора и закрепления за оборудованием систем электроснабжения потребителей нефтедобычи стратегии управления ремонтом по фактическому техническому состоянию. Сформировать методику оценки сравнительной эффективности стратегий управления ремонтами: «По периодичности, наработке» и «По техническому состоянию». Подтвердить работоспособность комплексной методики. Обосновать и продемонстрировать эффективность стратегии управления ремонтами: «По техническому состоянию» оборудования на реальном примере типовой схемы системы электроснабжения нефтепромысла. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись: метод блок-схем для расчета показателей структурной надежности распределительной электрической сети, в том числе вероятностей нарушения электроснабжения в цепи каждого технологического потребителя с учетом возможности резервирования и наложения аварийного восстановления основного элемента на плановый ремонт резервного, метод анализа иерархий для интегральной оценки фактического технического состояния электрооборудования напряжением 6(10) кВ, метод расчета математического ожидания ущерба от технологических потерь добычи нефти для оценки тяжести последствий нарушения электроснабжения потребителей нефтедобычи, метод экспертных решений для корректировки нормативной периодичности и частоты плановых ремонтов оборудования в зависимости от фактического значения индекса технического состояния. РЕЗУЛЬТАТЫ. Обоснована актуальность направления исследований. Сформирована расчетная методика комплексной оценки сравнительной эффективности стратегий управления ремонтами оборудования в системах электроснабжения нефтепромыслов «По периодичности, наработке» и «По техническому состоянию» для обоснования приоритетности одной из них. На конкретном расчетном примере доказана предпочтительность выбора стратегии: «По техническому состоянию» применительно к оборудованию 6(10) кВ систем электроснабжения нефтепромыслов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная методика и ее валидация на примере реальной системы электроснабжения позволяет обосновать и проиллюстрировать эффективность стратегии: «По техническому состоянию» по сравнению со стратегией «По периодичности, наработке» применительно к управлению ремонтами оборудования объектов нефтедобычи.

Ключевые слова: оборудование; система электроснабжения; ремонты; стратегия управления; методика оценки эффективности; технологический ущерб; частота профилактик.

Благодарности: Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы в рамках договора «Разработка стандарта и методических документов для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования ДО ПАО «Газпром нефть» по техническому состоянию и наработке».

Для цитирования: Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 39-51. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.

ON THE ISSUE OF EFFECTIVENESS OF THE OIL PRODUCTION ELECTRICAL EQUIPMENT REPAIRS MANAGEMENT WITH A STRATEGY FOR TECHNICAL CONDITION

VM. Levin, NP. Guzhov, DA. Boyarova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Abstract: *PURPOSE.* To consider aspects of solving the complex problem of reasonable choice and assignment of the repair management strategy for the equipment of power supply systems of oil production consumers according to the actual technical condition. To form a methodology for assessing the comparative effectiveness of repair management strategies: «By frequency, running hours» and «By technical condition». To verify the performance of the integrated methodology. Justify and demonstrate the effectiveness of the repair management strategy: «By technical condition» of the equipment on the real example of the typical scheme of the electrical supply system of oil fields. *METHODS.* In solving the problems set: the method of block diagrams for calculating the structural reliability of electric distribution network, including the probabilities of power supply failure in the circuit of each technological consumer, taking into account the possibility of redundancy and imposing an emergency restoration of the main element on the planned repair of the reserve, the method of hierarchy analysis for integral assessment of the actual technical condition of electrical equipment 6 (10) kV, method of calculating the mathematical expectation of damage from technological losses of oil production to assess the severity of the consequences of disruption of electricity supply to consumers of oil production, the method of expert decisions to adjust the regulatory periodicity and frequency of scheduled repairs of equipment, depending on the actual value of technical condition index. *RESULTS.* The relevance of the research direction is substantiated. Computational methodology of comprehensive assessment of comparative efficiency of equipment repair management strategies in oilfield power supply system «By frequency, running hours» and «By technical condition» to justify the priority of one of them has been formed. On a concrete computational example the preference of strategy choice «By technical condition» is proved as applied to the equipment of 6(10) kV power supply systems of oil fields. *CONCLUSION.* The developed methodology and its validation on the example of a real power supply system allows to substantiate and illustrate the effectiveness of the strategy «By technical condition» in comparison with the strategy: «By frequency, running hours» in relation to the management of repairs of oil production facilities.

Keywords: equipment; power supply system; repairs; management strategy; efficiency assessment methodology; technological damage; prevention frequency.

Acknowledgments: The article was prepared based on the results of the research work under the contract «Development of standards and methodological documents to optimize the system of maintenance and repair of power equipment at PJSC Gazprom Neft's subsidiaries according to the technical condition and operating time».

For citation: Levin VM, Guzhov NP, Boyarova DA. On the issue of effectiveness of the oil production electrical equipment repairs management with a strategy for technical condition. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(1): 39-51. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.

Введение

Система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) электрооборудования (ЭО) в любой производственной сфере, включая нефтегазодобычу, служит ключевым инструментом в обеспечении надежности, безопасности и эффективности функционирования технологических комплексов [1-4]. Профессиональная настройка инструмента во многом определяет эффективность его применения. Для системы ТОиР ЭО такая настройка заключается в выборе рациональной стратегии для планирования и реализации ремонтно-восстановительных процессов [5-8].

С недавнего времени для энергокомпаний нормативно закреплёнными¹ являются две стратегии ТОиР «по периодичности, наработке», «по техническому состоянию». Стратегия «По периодичности, наработке» направлена на снижение вероятности возможных внезапных отключений (отказов) ЭО и предусматривает выполнение корректирующих воздействий: осмотров (О), технического обслуживания (ТО), текущих (Т) и капитальных (К) ремонтов с одинаковой фиксированной периодичностью в строго регламентированном объеме [6]. Стратегия ТОиР ЭО «По техническому состоянию» направлена на сокращение общего количества остановов оборудования и суммарного объема ремонтно-восстановительных работ. Она допускает обоснованное изменение периодичности корректирующих воздействий на ЭО в зависимости от необходимости, которая выявляется применением методов мониторинга и диагностирования параметров его технического состояния [9,10].

Для ТОиР «По техническому состоянию» важность технического диагностирования и неразрушающего контроля в процессе эксплуатации на работающем ЭО существенно возрастает. При этом неизбежно возникает ряд вопросов, например: какие параметры состояния ЭО целесообразнее контролировать, с какой периодичностью осуществлять контроль, как интерпретировать, обобщать и использовать результаты контроля для принятия эксплуатационных решений [11]. Ответы на эти и многие другие вопросы содержат нормативные документы^{2,3}.

Отказы ЭО в системах электроснабжения (СЭС) нефтепромыслов приводят к нарушениям электроснабжения технологических потребителей и сопровождаются нежелательными последствиями. Случайный характер событий, как и случайный характер оперативного состава схемы СЭС требуют оценки показателей надежности с учетом технического состояния ЭО [12-14]. Кроме того, для принятия обоснованных решений о приоритизации ремонтов ЭО требуется количественная оценка тяжести нежелательных последствий, определяемая математическим ожиданием ущерба [15].

Перечисленные аспекты представляют сущность решения сложной комплексной задачи повышения эффективности управления ремонтами ЭО в составе СЭС нефтедобывающих производств, и определяет актуальность дальнейших исследований в указанном направлении.

Материалы и методы

Для расчета параметров структурной надежности СЭС широко применим метод блок-схем [16-18]. Метод использует преобразование исходной схемы электроснабжения в эквивалентную с помощью последовательно и параллельно соединенных элементов. При этом имеется возможность рассчитать параметры безотказности и восстанавливаемости для цепей питания каждого потребителя СЭС как с учетом их резервирования, так и без него. В случае резервирования цепей питания потребителей целесообразно учитывать нарушение электроснабжения каждого из них при наложении аварийного восстановления одной цепи и плановом ремонте другой. Расчеты показателей структурной надежности схемы СЭС, как правило, выполняются на некотором горизонте планирования, который целесообразно принимать в пределах одного календарного года ($\Delta T = 1$ год).

Рассмотрим обобщенный порядок расчета структурной надежности для исследуемой схемы СЭС.

1. Производится расчет вероятности отказа каждого i -го элемента схемы СЭС:

$$Q_i = \frac{\omega_i \cdot T_{Bi}}{8760}, \quad (1)$$

где: ω_i (год⁻¹), T_{Bi} (ч) – средние значения параметра потока отказов и времени восстановления i -й единицы ЭО.

¹ Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Приказ Минэнерго РФ от 25.10.2018 года №1013. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/542610975>. Ссылка активна на 07 января 2022.

² СТО 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования. Стандарт организации ПАО «Россети» М.: ПАО «Россети», 2017. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293734154.pdf>. Ссылка eprussia.ru/ активна на 07 января 2022.

³ Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена приказом Минэнерго России 676 от 26.07.2017. Доступно по: www.ti-ees.ru/fileadmin/f/activity/laws/pr676_260717.pdf. Ссылка eprussia.ru/ активна на 07 января 2022.

2. Производится расчет результирующей вероятности аварийного перерыва в электроснабжении для цепи каждого j -го потребителя электрической энергии ($j = 1, m$) при последовательном соединении элементов:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n Q_{ij}, \quad (2)$$

где: n – количество элементов в цепи питания каждого потребителя; m – количество технологических потребителей в схеме СЭС.

3. В случае нескольких цепей питания j -го потребителя (основной – 1 и резервной – 2) при их параллельном соединении и обязательном выполнении условия $T_{B1} < T_{B2}$ [16], расчет результирующей вероятности отказа электроснабжения производится следующим образом:

$$Q_j = \frac{\omega_{1j} \cdot \omega_{2j} \cdot T_{B2i} \cdot T_{B1i}}{8760^2} = Q_{1j} \cdot Q_{2j} \quad (3)$$

4. Для учета наложения вероятностей аварийного восстановления первой цепи электроснабжения j -го потребителя и планового ремонта второй цепи выполняется следующий расчет:

$$Q_j = Q_{1j} \cdot \frac{\mu_{2j} \cdot T_{П2j}}{8760}. \quad (4)$$

Здесь: μ_{2j} и $T_{П2j}$ – частота и время простоя в плановом ремонте j -ой единицы ЭО во второй цепи электроснабжения потребителя; Q_{1j} рассчитывается по одной из формул (2) или (3).

Приведенный порядок расчета позволяет количественно оценить результирующую вероятность нарушения электроснабжения любого технологического потребителя в схеме СЭС нефтепромыслов с учетом ее реальной конфигурации (резервирования), состава включенного ЭО и возможности совмещения таких процессов как аварийное восстановление основной цепи питания и плановый ремонт резервной.

Интегральная оценка технического состояния ЭО является необходимым условием при управлении ремонтами ЭО со стратегией «По техническому состоянию» и требует количественного расчета индекса технического состояния (ИТС) периодичностью на реке одного раза в год. ИТС (табл. 1) принимает значения в диапазоне от 100% (идеальное состояние) до 0% (аварийное состояние). Расчеты ИТС для ЭО 35 кВ и выше регламентирует базовая методика, в которой реализован агрегатно-узловой метод оценки.

Таблица 1

Соотношение диапазонов ИТС видам технического состояния ЭО	
Диапазоны ИТС	Виды технического состояния
0 – 25	Критическое
25 – 50	Неудовлетворительное
50 – 70	Удовлетворительное
70 – 85	Хорошее
85 – 100	Очень хорошее

Для каждой единицы основного ЭО и линий электропередачи закрепляются функциональные узлы (ФУ) и группы параметров состояния, для которых определен набор весовых коэффициентов. Весовой коэффициент характеризует относительную важность i -го контролируемого параметра состояния (b_{ij}) среди прочих параметров в группе ($i = \overline{1, n}$), либо ФУ (B_j) среди прочих ФУ с точки зрения надежности единицы ЭО ($j = \overline{1, m}$). При этом выполняется условие:

$$\sum_{i=1}^n b_{ij} = 1 \text{ и } \sum_{j=1}^m B_j = 1.$$

Бальная оценка параметра и групп контролируемых параметров состояния ЭО производится по правилам базовой методики в результате сравнения текущего значения с предельно-допустимой нормой и отнесения к заранее заданному количественному интервалу [19]. Для ЭО, объектов распределительных сетей и СЭС напряжением 6(10) кВ таких как воздушные линии (ВЛ), трансформаторные подстанции (ТП, КТП), пр. применение базовой методики расчета ИТС существенно ограничено рядом следующих обстоятельств. Во-первых, отсутствие нормативно

закрепленных данных по видам ФУ, группам параметров технического состояния, предельно-допустимым значениям требует их унификации и обоснования по видам объектов ремонта (ОР) и типам ЭО. Во-вторых, отсутствие обоснованных критериев для ОР 6(10) кВ затрудняет бальную оценку контролируемых параметров. В-третьих, требует выполнения оценка значений весовых коэффициентов b_{ij} и B_j для линейки ЭО указанных классов напряжения.

Авторами предложена методика расчета ИТС для ОР напряжением 6(10) кВ в СЭС нефтепромыслов, которая прошла проверку практикой реального применения [20]. Разработанная методика привержена базовым принципам, однако, отличается более рациональным в условиях реальной эксплуатации ЭО со стратегией «По техническому состоянию» объектно-ориентированным методом оценки. При этом за единицу принят ОР, например ВЛ или ТП (КТП), для которого сформированы ФУ (элементы конструкции) и определены группы параметров. Для расчета весовых коэффициентов использован метод анализа иерархий на основе матриц парных сравнений [21]. Информационной основой расчетов ИТС служат листы осмотров ОР, которые содержат актуальные данные о любых несоответствиях наблюдаемых параметров состояния установленным нормам (дефектах). Обнаруженные дефекты классифицируются как критические, требующие оперативного устранения введением корректирующих воздействий, и не критические, устранение которых может быть выполнено в плановом порядке. Правила и критерии формирования бальной оценки параметров ОР приведены в таблице 2.

Таблица 2

Бальные оценки контролируемых параметров ФУ

Диапазон бальных оценок	Стадия развития дефекта	Характеристика
≥ 0 и $< 0,25$	Аварийный	Измеренное значение параметра за пределами предельно допустимого значения или количество дефектов ≥ 10
$\geq 0,25$ и $< 0,5$	Критически развитый	Измеренное значение параметра на уровне предельно-допустимого, ФУ выполняет требуемые функции не в полном объеме или количество дефектов ≥ 7
$\geq 0,5$ и $< 0,75$	Развитый	Измеренное значение параметра в пределах нормативной документации, появляются первые признаки отклонения от выполнения требуемых функций или количество дефектов ≥ 3
$\geq 0,75$ и $< 1,0$	Начальный	Измеренное значение параметра в пределах значения, установленного нормами, но появилась тенденция ухудшения параметра или количество дефектов ≥ 1
1,0	Норма	Отсутствует отклонение измеренного значения параметра от требований норм

В результате применения разработанной методики выполняются следующие расчеты:

1) бальная оценка группы параметров ($ОГП_i$, $i = \overline{1, n}$) определяется как минимальная бальная оценка параметров, входящих в указанную группу:

$$ОГП_i = \min_{k,i} ОП_k ;$$

2) фактическое значение индекса технического состояния j -го ФУ (ИТСУ) рассчитывается следующим образом:

$$ИТСУ_j = 100\% \cdot \sum_{i=1}^n (ОГП_i \cdot b_{ij}) ;$$

3) фактическое значение ИТСОР рассчитывается как взвешенная сумма ИТСУ:

$$ИТСОР = \sum_{j=1}^m (ИТСУ_j \cdot B_j) \cdot$$

Разработанная методика предусматривает актуализацию значений ИТСУ и ИТСОР с периодичностью, с которой происходит обновление информации о дефектах ЭО, как вновь обнаруженных при проведении осмотров и диагностических обследований, так и устраненных в процессе ремонтных воздействий.

Ущерб представляет собой вероятностные характеристики тяжести последствий, к

которым могут привести отказы ЭО и нарушения в электроснабжении нефтепромысловых объектов (НПО). При сравнении альтернатив, как правило, используется математическое ожидание ущерба $M Y$ в его денежном выражении. Ущерб – это многокомпонентная характеристика с доминированием различных составляющих в разных сферах деятельности. В нефтедобывающей сфере составляющие ущерба, связанного с нарушением электроснабжения НПО, включают: нарушение безопасности, нарушение технологического цикла и поломку оборудования, экологические последствия, нарушение производственной программы предприятия и др. Доминирующим компонентом ущерба, на который следует ориентироваться при оценке эффективности управления ТОиР ЭО, являются технологические потери добычи нефти. Так для j -го НПО расчет математического ожидания ущерба будет выполняться по выражению:

$$M Y_j = \bar{P}_{\text{нагр } j} \cdot 8760 \cdot \bar{D}_j \cdot Q_j \cdot \xi_0, \quad (5)$$

где: $\bar{P}_{\text{нагр } j}$ [кВт], $\bar{D}_j$ [тонна/кВтч] – осредненные на годовом интервале значения активной мощности нагрузки j -го НПО и его удельной производительности; Q_j – вероятность нарушения электроснабжения в цепи j -го НПО с учетом возможности ее резервирования и одновременного наложения аварийного восстановления одного из участков на плановый ремонт другого; ξ_0 [рубль/тонна] – удельная стоимость потерь добычи нефти. Такой подход представляется вполне обоснованным и позволяет произвести сравнительную оценку тяжести последствий, связанных с нарушением электроснабжения в цепях питания каждого отдельного НПО СЭС нефтепромысла, учитывая при этом их индивидуальные схемно-режимные особенности. Выражение (5) используется в статье также в целях сравнения эффективности управления ТОиР ЭО НПО в рамках стратегий «По периодичности, наработке» и «по техническому состоянию».

При планировании ремонтно-восстановительных работ на предстоящий интервал времени (календарный год) для каждого из ОР СЭС со стратегией «По периодичности, наработке» формируется план-график, представляющий собой фиксированную по нормативной периодичности и объемам работ «базовую сетку», который выполняет роль производственной программы предприятия⁴.

В отличие от «базовой сетки» план-график ТОиР «По техническому состоянию» допускает обоснованную корректировку периодичности ремонтов в пределах горизонта планирования. Необходимым и достаточным условием для принятия решения по корректировке периодичности ремонта ЭО является определение фактического значения ИТСОР и его ранжирование в соответствии со следующими правилами [22]:

1) если для i -го ОР $25\% \leq \text{ИТСОР}_i < 50\%$, то выполнение ремонта переносится непосредственно на следующий календарный месяц с фиксацией даты в графике ТОиР. Это позволяет исключить вероятные отказы ЭО, в том числе с тяжелыми последствиями;

2) если значение $\text{ИТСОР}_i \geq 50\%$, то корректировка периодичности ремонта производится согласно выражению

$$T_{\text{мр}} = k \cdot T_{\text{норм}}, \quad (6)$$

где: $T_{\text{норм}}$ и $T_{\text{мр}}$ – значения нормативной и расчетной периодичности ТОиР i -ой единицы ЭО (табл. 3); k – поправочный коэффициент, значение которого устанавливается экспертным путем из интервала $1,0 \div 1,5$ на основе анализа эксплуатации ЭО со стратегией "по техническому состоянию" (табл. 4).

Таблица 3

Значения нормативных периодичностей текущих ремонтов некоторых видов ЭО в составе ОР 6(10) кВ

№ п/п	Наименование оборудования	Периодичность $T_{\text{норм}}$, год
1	ВЛ 6(10) кВ на металлических и железобетонных опорах	5
2	КЛ 6(10) кВ	3
3	Трансформатор силовой 6(10) кВ	4
4	Выключатель масляный 6(10) кВ	4
5	Выключатель вакуумный 6(10) кВ	4
6	Разъединитель 6(10) кВ	2

⁴ Яшура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. М.: Изд-во НИЦ ЭНАС. 2006. 504 с.

В планах ТОиР со стратегией «По техническому состоянию» корректировка периодичности ($T_{\text{мр}}$) i -й единицы ЭО на интервале ΔT по выражению (6) однозначно соответствует корректировке частоты его плановых ремонтов $\mu_i = 1/T_{\text{мр}}$, год⁻¹.

Таблица 4

Поправочный коэффициент для корректировки периодичности ремонтов			
ИТСОР, %	50 – 70	70 – 85	85 – 100
Значение k , о.е.	1,0	1,25	1,5

Логика рассуждений с применением выражений (4) и (5) показывает, что подобная корректировка в случае высоких ИТСОР позволит повысить эффективность стратегии ТОиР ЭО «По техническому состоянию», снизив результирующую вероятность нарушений электроснабжения при аварийном отказе основной цепи и плановом ремонте резервной, а следовательно и тяжесть вызываемых этими нарушениями последствий для НПО.

Результаты и обсуждение

Основные теоретические положения статьи проиллюстрируем на примере. На рисунке 1 представлен фрагмент реальной схемы СЭС нефтепромысла, состоящего из двух кустовых площадок.

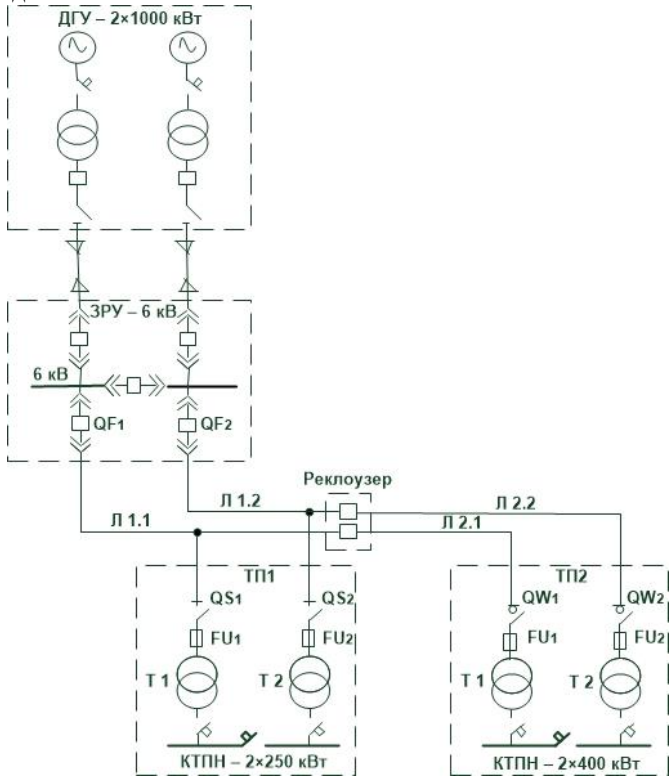


Рис. 1. Схема системы электроснабжения нефтепромысла

Fig. 1. Diagram of the oilfield power supply system

Это автономная система электроснабжения, источниками электроэнергии, в которой служат две дизель-генераторные установки (ДГУ) на напряжении 0,4 кВ мощностью 1000 кВт каждая. Для повышения напряжения до 6 кВ использована комплектная двухтрансформаторная подстанция (КТПН) наружной установки, от которой кабельной вставкой длиной 30 м электроэнергия передается на разные секции шин закрытого распределительного устройства (ЗРУ) напряжением 6 кВ. Подстанции ТП1 и ТП2 питаются от ЗРУ по двум воздушным линиям электропередачи на железобетонных опорах, выполненным по магистральной схеме проводом марки АС-95. Удаленность от ЗРУ до ТП1 – 3 км, от ТП1 до ТП2 – 2 км. На воздушных линиях Л2.1 и Л2.2 к ТП2 установлены реклоузеры, отключающие участки сети к ТП2 при возникновении на них повреждений. Этим обеспечена повышенная надежность электроснабжения потребителей, запитанных от ТП1. Осредненные значения мощностей нагрузок технологических механизмов НПО по каждому из вводов 6 кВ ТП1 и ТП2, а также их удельные производительности приведены в таблице 5. Цель расчетов состоит в количественной оценке результирующих вероятностей

нарушения электроснабжения каждого технологического потребителя СЭС нефтепромысла, определении и сравнении суммарных по нефтепромыслу ущербов от потерь добычи нефти при реализации стратегии ТОиР ЭО «По периодичности, наработке» и «По техническому состоянию». Критерием эффективности той или иной стратегии ТОиР ЭО СЭС будет являться минимум суммарного ущерба по месторождению. Оценку вероятностей отказов элементов схемы СЭС (рис. 1) выполним с применением формул (1) – (4) в следующем порядке. В расчетах результирующих показателей надежности допустимо применение осредненных статистических данных (табл.6)⁵.

Таблица 5

Среднегодовые значения мощностей нагрузок и удельных производительностей технологических механизмов

Объекты СЭС нефтепромысла		$\bar{P}_{\text{нагр } j}$, кВт	$\bar{D}_j$, тонн/кВтч
ТП1	T1	148	2,3
	T2	164	1,9
ТП2	T1	262	3,0
	T2	230	2,5

Вероятности отказов единичного ЭО СЭС:

$$\begin{aligned}
 Q_{QF} &= \frac{0,015 \cdot 6}{8760} = 0,103 \cdot 10^{-4} & Q_{Л1.1} &= \frac{0,25 \cdot 3 \cdot 6}{8760} = 5,14 \cdot 10^{-4} & Q_{Л2.1} &= \frac{0,25 \cdot 2 \cdot 6}{8760} = 3,43 \cdot 10^{-4} \\
 Q_T &= \frac{0,035 \cdot 8}{8760} = 0,32 \cdot 10^{-4} & Q_{FU} &= \frac{0,05 \cdot 3}{8760} = 0,17 \cdot 10^{-4} & Q_{QS(QW)} &= \frac{0,002 \cdot 4}{8760} = 0,009 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Вероятности нарушений электроснабжения в основной (резервной) цепи питания технологических потребителей ТП1 и ТП2 определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Q_{ТП1} &= (0,103 + 5,14 + 0,009 + 0,17 + 0,32) \cdot 10^{-4} = 5,742 \cdot 10^{-4}, \\
 Q_{ТП2} &= (0,103 + 5,14 + 0,103 + 3,42 + 0,009 + 0,17 + 0,32) \cdot 10^{-4} = 9,265 \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned}$$

При планировании предупредительных ремонтов ЭО следует учитывать положение о ремонтном присоединении, элементы которого одновременно выводятся из работы. Определяющим в ремонтном присоединении будет головной участок магистрали (Л1.2) протяженностью 3 км с наибольшим временем простоя T_{Π} (табл. 6).

Таблица 6

Показатели надежности и плановых ремонтов элементов СЭС

Элемент	Параметр потока отказов ω , год ⁻¹	Время восстановления T_B , ч	Частота плановых ремонтов μ , год ⁻¹	Время планового простоя T_{Π} , ч
ВЛ 6 кВ, одноцепная, на 1 км	0,25	6	0,2	5
Трансформатор 6 кВ	0,035	8	0,25	8
Ячейка выключателя 6 кВ, внутренней установки	0,015	6	0,25	7
Ячейка предохранителя 6 кВ	0,05	2,5	0,15	2,5
Ячейка разъединителя 6 кВ, внутренней установки	0,002	2,5	0,15	2,5

Тогда вероятность нахождения резервной цепи в схеме электроснабжения потребителей ТП1 и ТП2 в плановом ремонте определится по формуле:

⁵ Секретарев Ю.А. Надежность электроснабжения: учеб. Пособие / Ю.А. Секретарев. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. 104 с.

$$Q_{П2j} = \frac{\mu_{2j} \cdot T_{П2j}}{8760} = \frac{0,2 \cdot 5 \cdot 3}{8760} = 3,42 \cdot 10^{-4}.$$

Здесь μ_{2j} – нормативная частота плановых ремонтов ВЛ 6 кВ, значение которой неизменно для стратегии «По периодичности, наработке».

При реализации стратегии «По техническому состоянию» указанный параметр подлежит корректировке с применением выражения (6), данных таблицы 4 и известном фактическом значении ИТСОР. В рассматриваемом примере фактическое значение ИТС Л1.2 составляет 89%. При этом поправочный коэффициент экспертной оценки $k = 1,5$.

Корректировка на горизонте планирования $\Delta T = 1$ год нормативной периодичности $T_{норм}$ и частоты μ плановых ремонтов головного участка магистрали 6 кВ (Л1.2) выполняется по выражению (6):

$$T_{мр} = k \cdot T_{норм} = 1,5 \cdot 5 = 7,5 \text{ лет}, \quad \mu = 1/T_{мр} = 1/7,5 = 0,13 \text{ год}^{-1}.$$

Результирующие вероятности нарушений электроснабжения потребителей ТП1, ТП2 в резервированной схеме СЭС при наложении аварийного восстановления основной цепи питания на плановый ремонт резервной цепи рассчитываются по формуле (4):

- для стратегии "по периодичности, наработке":

$$Q_{ТП1}^{рез} = Q_{ТП1} \cdot Q_{П2j} = 5,742 \cdot 10^{-4} \cdot 3,42 \cdot 10^{-4} = 19,64 \cdot 10^{-8},$$

$$Q_{ТП2}^{рез} = Q_{ТП2} \cdot Q_{П2j} = 9,265 \cdot 10^{-4} \cdot 3,42 \cdot 10^{-4} = 31,69 \cdot 10^{-8}.$$

- для стратегии "по техническому состоянию":

$$Q_{ТП1}^{рез} = Q_{ТП1} \cdot \frac{0,13 \cdot 5 \cdot 3}{8760} = 5,742 \cdot 10^{-4} \cdot 2,22 \cdot 10^{-4} = 12,78 \cdot 10^{-8},$$

$$Q_{ТП2}^{рез} = Q_{ТП2} \cdot \frac{0,13 \cdot 5 \cdot 3}{8760} = 9,265 \cdot 10^{-4} \cdot 2,22 \cdot 10^{-4} = 20,56 \cdot 10^{-8}.$$

Оценка суммарных ущербов от технологических потерь добычи нефти при нарушениях электроснабжения потребителей в СЭС нефтепромысла производится по выражению (5) с учетом данных таблицы 5 и значения удельной стоимости потерь (ξ_0) из расчета 50 \$/баррель, что ориентировочно составляет 27500 руб./тонна:

- для стратегии «По периодичности, наработке»:

$$M Y_{\text{сум1}} = 8760 \cdot 27500 \cdot \left[\frac{148 \cdot 2,3 + 164 \cdot 1,9 \cdot 19,64 \cdot 10^{-8}}{262 \cdot 3 + 230 \cdot 2,5 \cdot 31,69 \cdot 10^{-8}} \right] = 134,9 \text{ тыс. рублей};$$

- для стратегии «По техническому состоянию»:

$$M Y_{\text{сум2}} = 8760 \cdot 27500 \cdot \left[\frac{148 \cdot 2,3 + 164 \cdot 1,9 \cdot 12,78 \cdot 10^{-8}}{262 \cdot 3 + 230 \cdot 2,5 \cdot 20,56 \cdot 10^{-8}} \right] = 87,4 \text{ тыс. рублей}.$$

Выполненные на примере типовой схемы СЭС нефтепромысла расчеты иллюстрируют многие важные аспекты решения комплексной задачи выбора эффективной стратегии управления ТООР ЭО. Анализ результатов сравнения эффективности стратегий: «По периодичности, наработке» и «По техническому состоянию» позволяет выявить дополнительные возможности последней как в части определения необходимости вывода в ремонт объектов нефтепромыслов по фактическому значению ИТС, так и в части уменьшения суммарного ущерба при корректировке периодичности плановых ремонтов. Это сопровождается уменьшением суммарного ущерба от технологических потерь добычи нефти по месторождению в целом в 1,25 – 1,5 раза, что подчеркивает более высокую эффективность стратегии ТООР «По техническому состоянию». Следует заметить, что в рассмотренном примере абсолютные значения суммарного ущерба не являются критическими для принятия решения в пользу одной из рассматриваемых стратегий ТООР. Однако по совокупности эффектов стратегия «По техническому состоянию» ЭО в СЭС нефтепромыслов является более перспективной в части надежности, эксплуатационных затрат и технологических ущербов. К сожалению ограничения по объему и направленности не позволяют в рамках данной статьи раскрыть все преимущества стратегии "по техническому состоянию".

Заключение

1. Организация ТОиР ЭО объектов нефтедобычи определяет выбор рациональной стратегии управления ремонтами. В настоящее время нормативное закрепление за ЭО 6(10) кВ на объектах электроэнергетики получили две стратегии: «По периодичности, наработке» и по «Техническому состоянию». Предпочтительность одной из них применительно к конкретным условиям эксплуатации выявляется в процессе решения комплексной задачи оценки сравнительной эффективности. Методика такого расчета предложена в статье и включает: оценку вероятностей нарушений электроснабжения потребителей нефтепромысла, расчет ИТС оборудования НПО, определение математического ожидания ущерба от технологических потерь добычи нефти, корректировку периодичности и частоты плановых ремонтов ЭО.

2. Учет индивидуальных особенностей схемы СЭС потребителей, например, таких как резервирование участков схемы, наложение аварийного восстановления основного участка на плановый ремонт резервного, др. является необходимым условием достоверной оценки тяжести последствий от нарушений электроснабжения. Расчет актуальных значений ИТСУ и ИТСОР по предложенной методике расширяет возможности масштабного применения стратегии ТОиР «По техническому состоянию» ЭО 6(10) кВ.

3. Реализация в методике принципа объектно-ориентированной оценки ИТС с применением листов осмотра ОР 6(10) кВ адаптирует базовые расчетные модели к реальной практике эксплуатации СЭС нефтепромыслов.

4. Расчетным примером для типовой схемы СЭС нефтепромысла проиллюстрирована большая предпочтительность стратегии ТОиР ЭО 6(10) кВ «По техническому состоянию», позволяющей до 1,5 раз сократить значение суммарного ущерба от потерь добычи нефти. Кроме того стратегия «По техническому состоянию» ЭО стимулирует энергопредприятие к поддержанию ИТСОР на уровне не менее 70%, что позволит корректировать нормативную периодичность плановых ремонтов в сторону увеличения, снизить объем ремонтных работ и суммарные эксплуатационные затраты энергопредприятия.

Литература

1. Волкова И.О. Эффективное управление производственными активами электросетевых компаний: теория и методология. Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического Университета, 2008. 254 с.
2. Biard G., Nour G.A. Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry // Sustainability. 2021. 13(18). 10369.
3. Khuntia S.R., Rueda J.L., Bouwman R.S., et al. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2016. 26(10). pp. 2123-2133.
4. M'arquez A.C., Macchi M., Parlikad A.K., editors. Value Based and Intelligent Asset Management: Mastering the Asset Management Transformation in Industrial Plants and Infrastructure. Springer Nature Switzerland AG 2020. 5. Kongezos V., Jellum E. Industrial Asset Management strategies for the Oil & Gas sector // IET & EAM International Conference on Asset Management, November 27th 2012.
6. Антоненко И.Н. Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами энергетики. Энергоэксперт. 2020. №1. С. 26–33.
7. Usman A., Bashir S., Khawar N. et al. Improved MRO Inventory Management System in Oil and Gas Company: Increased Service Level and Reduced Average Inventory Investment // Sustainability. 2020. 12. p. 8027.
8. Tapia-Ubeda F.J.; Miranda P.A. Roda I. et al. Modeling and solving spare parts supply chain network design problems // International Journal of Production Research. 2020. V. 58. N 17, 7543.
9. Иорш В.И., Крюков И.Э., Антоненко И.Н. Управление ремонтами, ориентированное на надежность // Промышленность и безопасность. 2011. № 7(35). С. 50–53.
10. Барков А.В., Тулугуров В.В. Диагностическое обслуживание предприятий – основа перевода оборудования на ремонт по состоянию // Газета «Энергетика и промышленность России». №5(21). Май 2002. Доступно по: <https://www.epr/21/1335.htm>. Ссылка активна на: 07 января 2022.
11. Гришко А.К. Выбор оптимальной стратегии управления надежностью и риском на этапах жизненного цикла сложной системы // Надежность и качество сложных систем.

2017. № 2(18). С. 26–31.

12. Назарычев А.Н. Определение предельных сроков эксплуатации на основе оценки индекса состояния электрооборудования: В сб. V Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики», 06 Декабря 2018. Москва; 2018. Доступно по: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2018/present/03_Nazarychev_A.N._06.12.2018.pdf. Ссылка активна на 07 января.2022.

13. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies // International Journal of Engineering Research & Technology. 2021. 10(10). pp. 388-393.

14. Разумов Р.В., Михайлов А.В., Соловьев М.Ю. Системы мониторинга высоковольтного энергетического оборудования. Доступно по: <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16>. Ссылка активна на: 07 января 2022.

15. Лесных В.В., Тимофеева Т.Б., Петров В.С. Проблемы оценки экономического ущерба, вызванного перерывами в электроснабжении // Экономика региона. 2017. №13(3). С. 847–858.

16. Секретарев Ю.А. Риск-ориентированные модели управления ремонтом оборудования в системах электроснабжения с монопотребителем // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. №14(1). С. 17–32.

17. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S. et al. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy // Energy Production and Management in the 21st Century IV. V. 246. pp. 125–135.

18. Обоскалов В.П. Проблемы расчета структурной надежности систем электроснабжения с использованием вероятностного эквивалентирования // Электричество, 2015. №12. С. 4–12.

19. Байдюк М.А., Комарова Г.В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. №3. С. 78–84.

20. Боярова Д.А. Индекс технического состояния для оборудования 0,4-6(10) кВ энергообъектов нефтедобычи. В сб. XV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 6–10 декабря 2021. Новосибирск; 2021. Изд-во НГТУ, 2021. Ч. 4. С. 7–12.

21. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

22. Левин В.М., Гужов Н.П., Черненко Н.А. и др. Методология управления ремонтами оборудования в электрических сетях нефтепромыслов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. №2-3(79). С. 139–155.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированных электроэнергетических систем», Новосибирский государственный технический университет.

Гужов Николай Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Систем электроснабжения предприятий», Новосибирский государственный технический университет.

Боярова Диана Андреевна – магистрант, Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Volkova IO. *Effektivnoe upravlenie proizvodstvennymi aktivami elektrosetevykh kompanij: teoriya i metodologiya*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta; 2008.
2. Biard G, Nour GA. Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry. *Sustainability*. 2021; 13(18), 10369. <https://doi.org/10.3390/su131810369>.
3. Khuntia SR, Rueda JL, Bouwman RS, et al. A literature survey on asset management in electrical power [transmission and distribution] system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2016; 26(10): 2123-2133. <https://doi.org/10.1002/etep.2193>.
4. M'arquez AC, Macchi M, Parlikad AK, editors. Value Based and Intelligent Asset

Management: Mastering the Asset Management Transformation in Industrial Plants and Infrastructure. Springer Nature Switzerland AG 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20704-5>.

5. Kongezos V, Jellum E. Industrial Asset Management strategies for the Oil & Gas sector. *IET & EAM International Conference on Asset Management*, November 27th 2012. doi:10.1049/cp.2012.1922.

6. Antonenko IN. Risk-orientirovannyj podhod k upravleniyu proizvodstvennymi aktivami energetiki. *Energoekspert*. 2020; 1: 26-33.

7. Usman A, Bashir S, Khawar N. et al. Improved MRO Inventory Management System in Oil and Gas Company: Increased Service Level and Reduced Average Inventory Investment. *Sustainability*. 2020; 12, 8027. doi:10.3390/su12198027.

8. Tapia-Ubeda FJ, Miranda PA, Roda I, et al. Modeling and solving spare parts supply chain network design problems. *International Journal of Production Research*. 2020; 58(17), 7543. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1720924>.

9. Iorsh VI, Kryukov IE, Antonenko IN. Upravlenie remontami, orientirovannoe na nadezhnost'. *Promyshlennost' i bezopasnost'*. 2011; 7(35): 50–53.

10. Barkov AV, Tulugurov VV. Diagnosticheskoe obsluzhivanie predpriyatij – osnova perevoda oborudovaniya na remont po sostoyaniyu. *Gazeta «Energetika i promyshlennost' Rossii»*. V.5. May. Available at: <https://www.eprussia.ru/epr/21/1335.htm>. Accessed: 07 Jan 2022.

11. Grishko AK. Vybór optimal'noj strategii upravleniya nadezhnost'yu i riskom na etapah zhiznennogo cikla slozhnoj sistemy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnyh sistem*. 2017; 2(18): 26–31. doi:10.21685/2307-4205-2017-2-4.

12. Nazarychev AN. Opredelenie predel'nyh srokov ekspluatatsii na osnove ocenki indeksa sostoyaniya elektrooborudovaniya. [Abstract] In: *V Nauchno-prakticheskaya konferenciya "Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya ob"ektov elektroenergetiki"*, 06 Dec 2018. Moscow; 2018. Available at: http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2018/present/03_Nazarychev_A.N._06.12.2018.pdf. Accessed: 06 Dec 2018.

13. Bounjimi ME, Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of The Key Technologies. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021; 10(10): 388-393.

14. Razumov RV, Mihajlov AV, Solov'ev MYu. Sistemy monitoringa vysokovol'nogo energeticheskogo oborudovaniya. Available at: <https://energybase.ru/news/articles/monitoring-systems-for-high-voltage-power-equipment-2020-03-16>. Accessed: 07 Jan 2022.

15. Lesnyh VV, Timofeeva TB, Petrov VS. Problemy ocenki ekonomicheskogo ushcherba, vyzvannogo pereryvami v elektrosnabzhenii. *Ekonomika regiona*. 2017;13(3):847–858. doi:10.17059/2017–3–17.

16. Sekretarev YuA, Levin VM. Risk-orientirovannye modeli upravleniya remontom oborudovaniya v sistemah elektrosnabzheniya s monopotrebitелеm. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021; 14(1): 17–32. doi:10.17516/1999-494X-0295.

17. Gitelman LD, Kozhevnikov MV, Chebotareva GS, et al. Asset Management of Energy Company based on risk-oriented strategy. *Energy Production and Management in the 21st Century IV*. V. 246: 125-135. doi:10.2495/EPM200121.

18. Oboskalov VP. Problemy rascheta strukturnoj nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem veroyatnostnogo ekvivalentirovaniya. *Elektrichestvo*. 2015; 12: 4–12.

19. Bajdyuk MA, Komarova GV. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti elektricheskikh mashin. *Izvestiya SPbGETU LETI*. 2019; 3: 78–84.

20. Boyarova DA. Indeks tekhnicheskogo sostoyaniya dlya oborudovaniya 0,4-6(10) kV energoob"ektov nefte dobychi. *Nauka. Tekhnologii. Innovacii*. Novosibirsk, 06-10 Dec 2021. Novosibirsk. Izd-vo NGTU. 2021; Ch. 4: 7–12.

21. Saati T. Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarhij. Moskva. *Radio i svyaz'*. 1993.

22. Levin VM, Guzhov NP, Chernenko NA, et al. Metodologiya upravleniya remontami oborudovaniya v elektricheskikh setyah neftepromyslov. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;2-3(79): 139–155. doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-139-155.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Department of Automated Electric Power Systems of Novosibirsk State Technical University.

© В.М. Левин, Н.П. Гужов, Д.А. Боярова

Nikolay P. Guzhov – Department of Power Supply Systems of Enterprises of Novosibirsk State Technical University.

Diana A. Boyarova – Master's student of Novosibirsk State Technical University.

Получено 29.01.2022г.

Отредактировано 10.03.2022г.

Принято 10.03.2022г.



ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НЕОДНОРОДНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭДС

А.И. Мотовилов, И.И. Соловьев

Северный (Арктический) Федеральный Университет,
г. Архангельск, Россия
Alex.Motovilov@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Повышение пропускной способности электрической сети, которая характеризуется максимальной величиной мощности допустимой для передачи из одного района энергосистемы в другой. *Процесс* передачи электроэнергии сопровождается коммутациями и небалансами мощностей в узлах, приводящих к перегрузкам отдельных участков сети и аварийным отключениям. Для предотвращения перегрузок ограничивают объем передачи мощности по этим участкам, что является причиной снижения параметров надежности электроснабжения потребителей, эффективности использования энергетических ресурсов и системных аварий. На практике для снижения перегрузки элементов электрической сети используются традиционные способы: регулирование генерации в рассматриваемых энергоузлах, изменение топологии сети, а также, при недостаточной эффективности первых двух способов, ввод ограничений электроснабжения потребителей. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи использовалась компьютерная модель, созданная в ПК RastrWin3. В работе проведены исследования влияния на пропускную способность сети уравнивающей ЭДС между узлами электросети. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье показано, что регулирование уравнивающей ЭДС позволяет изменять величину максимальной допустимой мощности, передаваемой по электрической сети. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Результаты исследований могут быть использованы в практике диспетчерского управления при решении задач улучшения характеристик режимов работы, планирования и эксплуатации энергосистемы в режиме реального времени. Работоспособность предложенного алгоритма проверена экспериментально.

Ключевые слова: энергосистема; математическая модель; электроэнергетический режим; неоднородная электрическая сеть; уравнивающая ЭДС.

Для цитирования: Мотовилов А. И., Соловьев И. И. Повышение пропускной способности неоднородной электрической сети регулированием уравнивающей ЭДС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 52-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-52-60.

INCREASING THE TRANSMISSION CAPACITY AN INHOMOGENEOUS ELECTRICAL NETWORK BY REGULATING THE EQUALIZING EMF

AI. Motovilov, II. Solovejev

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia
Alex.Motovilov@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consideration of issues related to the study of ways to increase the capacity of the electrical network, characterized by the maximum transmitted power between the

nodes of the electrical network. Switching in the electrical network and power imbalance in nodes during transmission of electricity are reasons of overloads and blackouts. To prevent overloads, the transmission volumes are reduced. It is the reason for a decrease in the reliability of power supply to consumers, the efficiency of using energy resources and disconnection of systems. In practice, the traditional methods of reducing network congestion are generation regulation, changing the network topology, and, if they are not enough, disconnecting consumers from the power grid. METHODS. Solving the problem, a computer model was used, created in the RastrWin3. This study transmission capacity of the electrical network with the taking influence equalizing EMF between the nodes of the power grid. RESULTS. The article describes the relevance problems, it is shown that the regulation of the equalizing EMF allows you to change the value of the maximum allowable power transmitted between the nodes of the electrical network. CONCLUSION. The results of the study can be used in the practice of dispatch control to solve problems of improving the reliability, planning and operating the power system in real time. The efficiency of the proposed algorithm is tested experimentally.

Key words: power system; mathematical model; electric power mode; heterogeneous electric network; equalizing EMF.

For citation: Motovilov AI., Solovejev II. Increasing the transmission capacity an inhomogeneous electrical network by regulating the equalizing EMF *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24 (1): 52-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-52-60.

Введение

Энергосистемы районов крайнего севера России состоят из удаленных друг от друга энергоузлов, связанных сетями высокого напряжения 110-330 кВ. Электрические сети энергосистем представляют собой замкнутые контуры, содержащие источники питания, нагрузочные узлы, (авто) трансформаторы и связи различного класса напряжения. Сети как правило, являются неоднородными, т.е. содержат участки с различным отношением реактивного сопротивления к активному. Неоднородность сети является причиной возникновения уравнильных ЭДС между узлами сети, приводящим к перераспределению потоков мощности по элементам контуров электрической сети.

Процесс передачи электроэнергии между узлами электрической сети сопровождается коммутациями и небалансами мощностей в узлах, что приводит к перегрузкам отдельных участков сети и аварийным отключениям [1]. Поэтому величина сальдо-перетоков активной мощности строго контролируется диспетчерской службой энергосистемы. Уровень риска возникновения отказов оборудования при выполнении переключений в электроэнергетической системе (ЭЭС) резко возрастает. Поэтому до начала изменения схемы электросети диспетчер энергосистемы контролирует соответствие заранее определенных режимных указаний фактическим условиям работы ЭЭС, которые могут быть не актуальными. Основная задача процесса оперативно-диспетчерского управления заключается в том, чтобы параметры, определяющие режим работы ЭС, не превышали допустимых значений в любой момент времени. При перегрузке сальдо-переток в контролируемом сечении [2-4] превышает расчетный максимально допустимый для текущей схемы, и/или возникает превышение длительно-допустимой токовой нагрузки. Для ввода сальдо-перетока в область допустимых значений эксплуатирующими организациями энергосистемы устанавливается специальное дополнительное оборудование [5], при оперативном управлении применяются меры, основанные на использовании текущих свойств энергосистемы [6-9], такие как регулирование генерации в рассматриваемых энергоузлах, изменение топологии сети, а также, при недостаточной эффективности первых двух способов, ввод ограничений электроснабжения потребителей. Регулирование активной мощности может отрицательно сказаться на экономичности работы энергосистемы, а

реактивной на уровне напряжений. Изменение топологии сети ограничено незначительным количеством участков электросети, переводимых на баланс другой части энергосистемы, поэтому топологический способ не позволяет устранить большие перегрузки. Использование традиционных способов регулирования сальдо-переток усиливает неравномерность загрузки параллельно работающих элементов неоднородной сети, что увеличивает вероятность возникновения каскадного сценария развития аварий. Таким образом анализ и оценка пропускной способности сети энергосистемы является важной и актуальной задачей.

В неоднородной электрической сети между узлами электросети возникают уравнивающие ЭДС, вызывающие уравнивающие токи. Уравнивающие токи накладываются на токи нагрузки, увеличивая их. Авторами предлагается дополнительно к традиционным способам снижения перегрузки элементов сети перед вводом ограничений электроснабжения потребителей управлять распределением мощностей между элементами неоднородной электрической сети регулированием величинами уравнивающих ЭДС (токов) в онлайн режиме. Управление уравнивающими токами приводит к увеличению максимально допустимого сальдо-перетока активных мощностей, т.е. повышению пропускной способности для текущей схемы, что позволит повысить устойчивость энергосистемы и предотвратить аварии из-за превышения допустимой токовой нагрузки.

Цель исследования заключается в разработке принципиально нового подхода к увеличению пропускной способности сети энергосистем.

Задача исследования - разработка алгоритма оценки пропускной способности неоднородной электрической сети в зависимости от уравнивающей ЭДС в контуре. Решение задачи позволит повысить энергоэффективность энергосистемы и минимизировать объемы ограничений электроснабжения потребителей при ликвидации перегрузок участков электросети.

Методы

Диспетчер перед отдачей команды (разрешения) на отключение линии электропередач и оборудования должен определить необходимые параметры функционирования энергосистемы и предотвратить аварии в случае единичного отказа оборудования. Для повышения пропускной способности сети разработан алгоритм оценки пропускной способности неоднородной электрической сети.

Структура алгоритма:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона по известным, переданным в диспетчерский центр по каналам телеметрии, значениям сопротивлений ветвей и активным, реактивным мощностям узлов генерации и нагрузки. Расчет предельного режима по условию устойчивости энергосистем методом утяжеления.

Для контуров электрической сети необходимо выбрать управляемые узлы и ветви, оказывающие влияние на уравнивающую ЭДС между узлами, и в уравнениях баланса активной и реактивной мощности учесть крайние положения управляемых параметров. Таким образом получим массив исходных данных (1) изменения тока по элементам электрической сети от передаваемой мощности и управляемых параметров узлов и ветвей. Обработка этих данных позволит определить условия, при которых будет обеспечена максимальная пропускная способность электросети:

$$I = f(P_{np}; K_i) \quad (1)$$

где P_{np} – предельное значение активной мощности по статической аperiodической устойчивости; K_i – значения управляемых параметров узлов и ветвей в замкнутом контуре.

Для узлов, представляющих собой шины низшего напряжения трансформаторной подстанции в уравнениях баланса активной и реактивной мощности, необходимо учесть крайние положения переключателя числа витков обмотки высшего напряжения трансформатора.

Для решения задачи снижения перегрузки формируется целевая функция - математическая модель (рис. 1) установившегося режима работы сетевого элемента [10-13]. Модель отражает зависимость пропускной способности электрической сети ($P_{\max}$) от значений управляемых параметров узлов и ветвей в замкнутом контуре и длительно-допустимой токовой нагрузки сетевого элемента.

2. Замена исследуемого объекта пассивным двухполюсным устройством, который соответствующим образом реагирует на заданное входное воздействие.

3. Определение параметров полинома по входным и выходным сигналам.

Коэффициенты a_j полинома целевой функции определяются на основе факторного анализа. Коэффициенты K_i , при которых снижается токовая нагрузка с перегруженных элементах сети, определяются по целевой функции оптимизации.

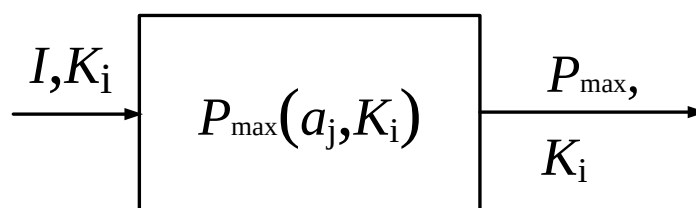


Рис. 1 Математическая модель исследуемого сетевого элемента

Fig.1 Mathematical model of an electrical network element

Результаты

Апробация предлагаемого алгоритма проведена на примере электрической сети с параллельно работающими силовыми автотрансформаторами (рис.2). Электрическая сеть содержит два узла напряжением 110 кВ, четыре узла - 220 кВ, однородных ветвей 110 кВ, 220 кВ и два автотрансформатора. Расчетные данные ветви 220 кВ соответствуют линии электропередач, выполненной проводами АС 300/39, длиной 100 км, ветвь 110 кВ подобрана с такими же параметрами. Расчетные параметры автотрансформаторов соответствуют каталожным данным АТДЦТН-250000/220/110. Модель учитывает, что процесс передачи энергии сопровождается потерями мощности и напряжения в элементах электросети, которые нелинейно зависят от уровня напряжения, а также изменение мощности нагрузки узла по закону статических характеристик нагрузки по напряжению.

В однородной сети нагрузка равномерно распределится между автотрансформаторами при выполнении условий:

- одинаковой фазировки трансформаторов, обусловленной согласованием фаз всех рабочих элементов электрической цепи со стороны высшего (ВН) и низшего (НН) напряжений трансформатора. Напряжения на сторонах ВН и НН трансформаторов равны;
- равенство коэффициентов трансформации ($K_{тр}$), их различие не превышает $\pm 0,5\%$;
- равенство напряжений короткого замыкания u_k трансформаторов, максимальная разница не превышает 10%;
- группы соединений обмоток одинаковы;
- мощность параллельно работающих трансформаторов отличаться не более чем в 3 раза.

Невыполнении одного из условий приводит к появлению в контуре с автотрансформаторами уравнивающей ЭДС. Управляемыми параметрами ветвей в исследуемом замкнутом контуре будут значения коэффициентов трансформации. Таким способом регулируем в контуре уравнивающую ЭДС.

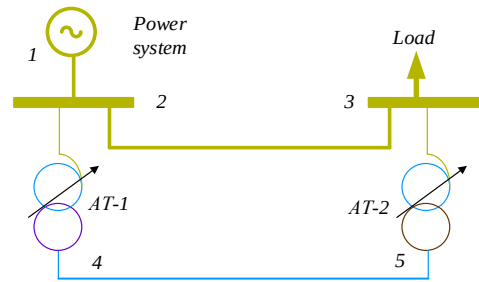


Рис. 2 Схема исследуемой энергосистемы

Fig.2 Scheme of the studied power system

Исходные данные для анализа пропускной способности электросети получены в виде зависимостей тока нагрузки от Ктр автотрансформаторов с использованием ПК *RastrWin3* [14]. Реальная электрическая сеть заменена двухполюсником с эквивалентными параметрами при этом учитывается, что на перераспределение реактивных и активных мощностей в контуре основное влияние оказывает продольная и поперечная ЭДС соответственно [15, 16].

Балансирование по активной и реактивной мощности выполняется в узле 1, нагрузка сосредоточена в узле 3. Ветви между узлами являются связями: 4-5 - связь 110 кВ. 2-3 - связь 220 кВ, 1-2 – связывают изолированную энергосистему с внешней системой.

Предельный по статической аperiodической устойчивости режим получен при расчете электрического режима в соответствии с пунктом 1 алгоритма. Зафиксировано превышение длительно-допустимой токовой нагрузки линии 220 кВ, при этом токовая нагрузка линии 110 кВ составляет 60 % от длительно-допустимой токовой нагрузки. Необходимо определить управляющие воздействия, ликвидирующие перегрузку, без отключения потребителей и ограничения сальдо-перетока мощности, и увеличивающие пропускную способность электросети.

В результате выполнения пункта 2 алгоритма с учетом особенностей исследуемой сети составлена математическая модель пропускной способности сети (2).

$$P_{\max}(K_1, K_2) = \frac{I_{\text{длtn}}}{a_0 + a_1 K_1 + a_2 K_2 + a_3 K_1^2 + a_4 K_2^2 + a_5 K_1 K_2} \quad (2)$$

где a_j – искомые коэффициенты полинома; $I_{\text{длtn}}$ – длительно-допустимая токовая нагрузка исследуемого сетевого элемента; K_1 и K_2 – коэффициенты трансформации автотрансформаторов в замкнутом контуре.

По пункту 3 алгоритма получены коэффициенты полинома (таблица 1), позволяющие определить значения коэффициентов трансформации для перераспределения токовой нагрузки с целью обеспечения максимальной пропускной способности исследуемой электрической сети и ликвидации перегрузки.

Таблица 1

Коэффициенты полинома определения максимальной пропускной способности сети

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
3,953	-3,186	1,281	-3,029	1,218	1,218

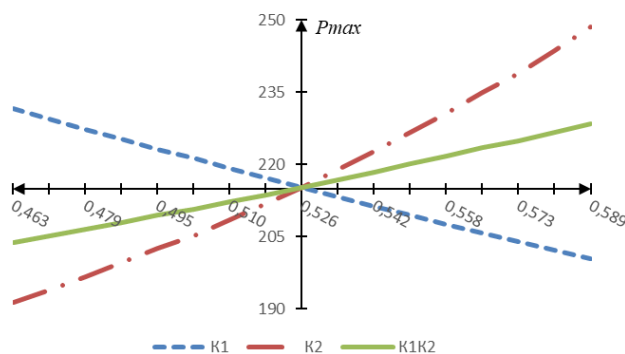


Рис. 3 Анализ чувствительности пропускной способности электросети к коэффициентам трансформации

Fig.3 Analysis of power grid capacity sensitivity to transformation rations

Анализ чувствительности (рис. 3) и значений коэффициентов полинома a_1 и a_3 показывают, что поток мощности по линии электропередач 220 кВ на прямую зависимость от коэффициента трансформации автотрансформатора 1, влияние автотрансформатора 2 будет иметь обратное значение, что показывают коэффициенты a_2 и a_4 . Одновременное изменение коэффициентов трансформации характеризуется коэффициентом a_5 показывает, что взаимное увеличение коэффициентов имеет меньшее влияние на пропускную способность сети чем изменение одного из коэффициентов. Таким образом максимальное увеличение пропускной способности достигается при уменьшении K_1 и увеличении K_2 .

Достоверность полученных результатов оценена с использованием коэффициента (индекса) множественной (совокупной) корреляции R , рассчитанной по формуле (3).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(P_{calc_i} - \bar{P}_{calc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_{calc_i} - \bar{P}_{calc})^2}}$$

где P_{calc_i} – расчетное значение активной мощности;

$\bar{P}_{calc}$ – среднее значение расчетной активной мощности;

P_i – рассчитанная активная мощность с помощью ПК RastrWin3;

$\bar{P}$ – среднее значение рассчитанной активной мощности с помощью ПК RastrWin3.

В зависимости от тесноты связи R может принимать значения от 0 до 1. Коэффициент корреляции был определен для максимальной мощности по условию устойчивости при различных комбинациях коэффициентов трансформации. Коэффициент корреляции составил 0,98, что может служить основанием для оценки рассчитанных с помощью предложенного алгоритма значений как точных.

Выводы

Исследования показали, что регулирование уравнивающей ЭДС приводит к изменению пропускной способности электросети. В частности, в рассмотренном примере пропускная способность электросети увеличивается до 1,5 раз, минимальная пропускная способность составляет 179 МВт, а максимальная - 271 МВт. Разработанный алгоритм позволяет значительно снизить объем вычислений, необходимых при принятии решений по оперативному управлению энергосистемой, для недопущения аварий.

Мы полагаем, что предложенный алгоритм моделирования процессов в элементах энергосистемы на основе компьютерной модели дополняет существующие практические

мероприятия по снижению перегрузок межсистемных связей. Перспективным является применение разработанного алгоритма с использованием данных телеметрии.

Литература

1. Kamali S. and T. Amraee, Blackout prediction in interconnected electric energy systems considering generation re-dispatch and energy curtailment. *Applied Energy*, 2017. 187: p. 50-61.
2. Петров В.В. Разработка алгоритма поиска уровней напряжений в контрольных узлах, обеспечивающих снижение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 4(135). С. 148-157.
3. Sweeney J.L. The California electricity crisis. 2002, Stanford, Calif.: Hoover Institution Press.
4. Mao, A., J. Yu, and Z. Guo. Electric power grid structural vulnerability assessment. in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006.
5. Воропай Н.И., Курбацкий В.Г., Томин Н.В., и др. Комплекс интеллектуальных средств для предотвращения крупных аварий в электроэнергетических системах. Новосибирск: Изд-во Наука, 2016. 332 с. ISBN 978-5-02-038717-1.
6. Мотовилов А.И., Соловьев И.И. Онлайн оценка пропускной способности электрической сети // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22. № 3. С. 51-59.
7. Шахмаев И.З., Гайсин Б.М., Якимов Б.Р. Влияние неоднородности параметров электротехнических систем на возникновение и развитие каскадных аварийных процессов // *Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 110-летию А.М. Бамдаса. Уфа 2015 г.* С. 47-51.
8. Петров В.В., Альмендеев А.А., и др. Анализ влияния изменения уставок по напряжению на электростанциях на значения сальдо-перетока активной мощности в сечении // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2018. № 5. С. 41-50.
9. Gutierrez F., et al., Vulnerability Analysis of Power Grids Using Modified Centrality Measures. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
10. Akdeniz E. and M. Bagriyanik. A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. V. 78: p. 436-444.
11. Zio E. and Aven T. Uncertainties in smart grids behavior and modeling: What are the risks and vulnerabilities? How to analyze them? *Energy Policy*, 2011. V. 39(10). p. 6308-6320.
12. Гайсин Б.М. Способ принятия эффективных решений для повышения живучести при проектировании и развитии энергосистем *Вестник УГАТУ. Электротехника*. Т. 21. №3 (77). Уфа: УГАТУ, 2017. С.47-53.
13. Грановский В.А. Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат. 1990. 288.
14. Программный комплекс «RastrWin3» Руководство пользователя.
15. Мотовилов А.И. Увеличение допустимых перетоков с помощью изменения параметров электрической сети // *Электроэнергетика глазами молодежи - 2020: материалы XI Международной научно-технической конференции*. В 2-т., Ставрополь, 15–17 сентября 2020 года. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 93-96.
16. Мотовилов А.И., Андреев Р.А., Андреева Н.А. An online approach to modelling network elements to improve the manageability of power system based on an active experiment. *Материалы XXIV международной научно-практической конференции. Академическая наука - проблемы и достижения*, 12-13 октября 2020 г. North Charleston, USA, С.194 С.120-126. ISBN 978-1-71650-139-5.

Авторы публикации

Мотовилов Алексей Иванович – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники, Северного (Арктического) Федерального Университета. E-mail: Alex.Motovilov@mail.ru.

Соловьев Иван Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники, Северный (Арктический) Федеральный Университет. E-mail: i.solovev@narfu.ru.

References

- 1 Kamali S. and T. Amraee, Blackout prediction in interconnected electric energy systems considering generation re-dispatch and energy curtailment. *Applied Energy*. 2017;187:50-61.
- 2 Petrov V. Development of a search algorithm of control node voltage levels ensuring active power flow balance reduction in a controlled section. *Proceedings of Irkutsk state technical university*. 2018;22(4(135):148-157. doi 10.21285/1814-3520-2018-4-148-157.
- 3 Sweeney JL. *The California electricity crisis*. 2002, Stanford, Calif.: Hoover Institution Press.
- 4 Mao A, Yu J, and Guo Z. *Electric power grid structural vulnerability assessment*. in 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006.
- 5 Voropai NI, Kurbatsky VG, Tomin NV, et al. *A complex of intellectual means for preventing major accidents in electric power systems*. Novosibirsk: Publishing house Nauka, 2016. – 332 с. ISBN 978-5-02-038717-1.
- 6 Motovilov AI, Solovejev II. Online electric network capacity assessment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22 (3):51-59. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-51-59.
- 7 Shakhmaev IZ, Gaisin BM, Yakimov BR. Influence of heterogeneity of parameters of electrical systems on the occurrence and development of cascade emergency processes. *All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 110th anniversary of A.M. Bamdas*. Ufa 2015. p. 47-51.
- 8 Polishchuk VI. Analysis of the influence of voltage levels on the power station to the maximum allowable flow of active power in cross-section. *Electrical equipment: operation and repair*. 2018;5:41-50.
- 9 Gutierrez F., et al. Vulnerability Analysis of Power Grids Using Modified Centrality Measures. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013.
- 10 Akdeniz E. and Bagriyanik M. A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2016;78:436-444.
- 11 Zio E. and Aven T. Uncertainties in smart grids behavior and modeling: What are the risks and vulnerabilities? How to analyze them? *Energy Policy*, 2011;39(10):6308-6320.
- 12 Gaisin BM. A way of making effective decisions to improve survivability in the design and development of power systems *Vestnik USATU. Electrical engineering*. 2017;21(3 (77): 47 – 53. Ufa: USATU.
- 13 Granovsky VA, Siraya TN. *Methods for processing experimental data during measurements*. L.: Energoatomizdat. 1990. P.288.
- 14 *User manual of software package «RastrWin3»*.
- 15 Motovilov AI. Increase maximum power flow by changes parametres of electrical network. *Electric Power Industry through the Eyes of Youth - 2020: Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference*. In 2-t., Stavropol, September 15-17, 2020. Stavropol: North Caucasus Federal University, 2020. pp. 93-96.
- 16 Motovilov AI, Andreev RA, Andreeva NA. *An online approach to modelling network elements to improve the managebility of power system based on an active experiment*. Materials of

the XXIV International Scientific and Practical Conference. Academic science -problems and achievements XXIV, October 12-13, 2020 North Charleston, USA, p. 120-126 ISBN 978-1-71650-139-5.

Authors of the publication

Aleksei I. Motovilov – Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, E mail: Alex.Motovilov@mail.ru .

Ivan I. Solovejev – Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, E mail: i.solovev@narfu.ru.

Получено **24.02.2022г.**

Отредактировано **01.03.2022г.**

Принято **09.03.2022г.**



ОБОСНОВАНИЕ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОГО НАСОСА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ КОНДЕНСАТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПГУ-ТЭЦ

М.А. Трещёва, И.Д. Аникина, Д.А. Трещёв

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
milana.treshcheva@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение допустимой мощности теплового насоса (ТН) применяемого в системе охлаждения конденсатора паровой турбины (ПТ) для тепловой электростанции (ТЭС) на базе двухконтурных парогазовых установок (ПГУ). МЕТОДЫ. В качестве метода исследования используется метод математического моделирования режимов работы теплофикационной ПГУ с ТН в системе охлаждения и без него. На базе статистических данных о технических параметрах и технико-экономических показателях ПГУ-450, для климатических и рыночных условий города Санкт-Петербург, было проведено исследование наиболее характерных режимов работы основного энергетического оборудования, в годовом разрезе, с определением максимальной допустимой мощности ТН, с точки зрения организации стабильного теплоснабжения потребителя, доступных низкопотенциальных ресурсов и безубыточной работы ТЭС на рынке электроэнергии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что с учетом значительных объемов низкопотенциальных энергоресурсов, отводимых от системы охлаждения конденсаторов ПТ и, стабильно высокой тепловой нагрузки потребителя, в том числе в межотопительный период, наиболее существенным условием, определяющим допустимый уровень мощности ТН, являются рыночные ограничения, связанные с безубыточностью функционирования ТЭС на оптовом рынке электроэнергии (ОРЭ). Показано, что для объекта исследования, при среднегодовой электрической нагрузке 650 МВт, максимальная мощность ТН составляет 160 МВт. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На примере реального энергообъекта были проанализированы основные факторы ограничивающие допустимый уровень мощности ТН. Установлена непосредственная связь между максимальной мощностью ТН, установленного на ТЭС и внешними экономическими условиями, а также уровнем энергоэффективности оборудования. Данный подход может быть использован для выбора и обоснования мощности ТН вне зависимости от региона расположения, типа энергосистемы, стоимости энергоресурсов, рыночных условий, а также типа и характеристик используемого оборудования.

Ключевые слова: энергетические ресурсы; энергоэффективность; тепловой насос; тепловая электростанция; рынок электроэнергии; региональная электроэнергетика.

Для цитирования: Трещёва М.А., Аникина И.Д., Трещёв Д.А. Обоснование мощности теплового насоса, используемого в системе охлаждения конденсатора паровой турбины ПГУ-ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 61-73. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-61-73.

JUSTIFICATION OF THE POWER OF THE HEAT PUMP USED IN THE COOLING SYSTEM OF THE STEAM TURBINE CONDENSER OF THE CCGT-CHP

MA. Treshcheva, ID. Anikina, DA. Treshchev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia
milana.treshcheva@gmail.com

Abstract: THE PURPOSE. Determination of the permissible power of the heat pump (HP) used in the cooling system of the steam turbine condenser for a thermal power plant (TPP) based on double-circuit combined-cycle gas turbine (CCGT). METHODS. Mathematical modeling of the

operating modes of a heating CCGT with a HP in the cooling system was used as a research method. The research was conducted using statistical data on technical parameters and economic indicators of CCGT-450, for climatic and market conditions of St. Petersburg. The research of the most characteristic modes of operation of the main power equipment, in the annual context, was carried out. The maximum permissible capacity of the HP, from the point of view of the organization of stable heat supply to the consumer, available low-potential resources and break-even operation of TPP in the electricity market was determined. **RESULTS.** It was found that low-potential energy resources in the cooling system of the steam turbine condenser are formed in significant volumes and the thermal power of the consumer is consistently high, including in summer. Therefore, market restrictions related to the break-even operation of TPP in the wholesale electricity market are the most essential condition determining the permissible level of HP power. It was found that for the object of study, with an average annual electrical capacity of 650 MW, the maximum power of the HP is 160 MW. **CONCLUSION.** The main factors limiting the permissible level of HP power were analyzed using the example of a real power facility. A direct connection between the maximum capacity of the HP and external economic conditions, as well as the level of energy efficiency of the TPP equipment was established. This approach can be used to select and justify the HP capacity regardless of the location region, the type of power system, the cost of energy resources, market conditions, as well as the type and characteristics of the equipment used.

Keywords: energy resources; energy efficiency; heat pump; thermal power plant; electricity market; regional electric power industry.

For citation: Treshcheva MA, Anikina ID, Treshchev DA. Justification of the power of the heat pump used in the cooling system of the steam turbine condenser of the CCGT-CHP. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 61-73. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-61-73.

Введение

Энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) России превышает на 46% мировой уровень, на 44% уровень США и на 62% европейский уровень [1]. В период 2015-2018 гг. существенным фактором в сдерживании роста данного показателя для нашей страны выступало повышение эффективности промышленных предприятий за счет модернизации технологической базы и внедрения новых технологий [1]. В перспективе, технологический фактор также будет играть ключевую роль в снижении энергоемкости отечественного ВВП в наиболее значимых секторах экономики, в том числе и в энергетике. Существенное повышение энергоэффективности экономики России может быть достигнуто путем масштабного внедрения передовых технологий, в том числе связанных с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Однако следует учитывать, что в настоящее время, около 60% объемов производства электроэнергии и порядка 50% объемов отпуска тепловой энергии в России осуществляют ТЭС на органическом топливе. При этом, доля ВИЭ в структуре производства электрической энергии составляет 20,1%, из которых 19,8% приходится на гидроэнергетику, а оставшиеся 0,3 % на ветряные и солнечные электростанции [2]. Согласно прогнозным документам¹ спрос на электроэнергию по России к 2025 г. увеличится на 8,3 % сравнению с уровнем 2018 г. Доля ТЭС в прогнозируемой структуре выработки электрической энергии останется неизменной (65-66%). При этом, потребность в органическом топливе ТЭС, увеличится к 2025 году почти на 5% и достигнет 309,5 млн т.у.т.

Поэтому, применение на ТЭС ТН большой мощности, будет способствовать решению сразу нескольких глобальных задач, стоящих перед теплоэнергетической отраслью России. А именно: оптимизации топливно-энергетического баланса страны, за счет вовлечения низкопотенциальной сбросной теплоты ТЭС, увеличения объемов отпуска тепловой энергии на базе ВЭР и снижения нагрузки ТЭС на окружающую среду. Это позволит, в долгосрочной перспективе, сформировать эффективную, конкурентоспособную

¹ «Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019 – 2025 годы» (утверждена приказом Минэнерго России № 174 от 28.02.2019 г.)

и экологически ориентированную экономику, обеспечивающую рациональное использование природных ресурсов и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Активная научно-исследовательская работа, связанная с анализом возможностей использования низкопотенциальной теплоты, ведется во всем мире. Рассматривается потенциал и особенности применения ТН в распределенной энергетике в различных технологических и экономических условиях [3,4]. Ряд исследований посвящен оценке экологических и рыночных особенностей интеграции ТН в существующие системы теплоснабжения [5–7]. Анализируются возможные варианты применения ТН в системах централизованного теплоснабжения, в условиях энергетических рынков различных стран [8–11]. Рассматриваются возможности повышения устойчивости энергоснабжения за счет применения ТН [12–14]. Проводится оценка перспектив использования ТН в комплексе с различными энергоустановками [15,16].

В России, исследования в области ТН имеют давнюю историю. Был проанализирован целый ряд схемных решений [17], оценен потенциал различных источников низкопотенциальной теплоты (ИНТ) [18,19]. Исследованы перспективы использования ТН в различных системах теплоснабжения [20,21]. Рассматривались возможности совместной эксплуатации ТН с ТЭС и атомными электростанциями [22,23].

Несмотря на это, ТН, до настоящего времени, не смогли найти значительного практического применения на ТЭС России. Существенным препятствием является отсутствие сформулированного подхода к выбору и обоснованию мощности ТН, внедряемых в тепловую схему ТЭС.

Цель настоящего исследования – определение допустимой мощности ТН, применяемого в системе охлаждения конденсатора ПТ для ТЭС на базе двухконтурных ПГУ.

Методика проводимого исследования

В качестве объекта исследования выступает ТЭЦ, имеющая в составе 2 энергоблока ПГУ-450 расположенная в г. Санкт-Петербург. В качестве основного метода исследования используется метод имитационного моделирования режимов работы ПГУ-ТЭЦ с ТН. Моделирование принципиальной тепловой схемы производилось с использованием лицензионного программного продукта «United Cycle», предназначенного для моделирования и расчета стационарных режимов работы теплоэнергетических установок и систем. Расчетная тепловая схема энергоблока ПГУ-450Т с ТН, смоделированная в «United Cycle», представлена на рисунке 1.

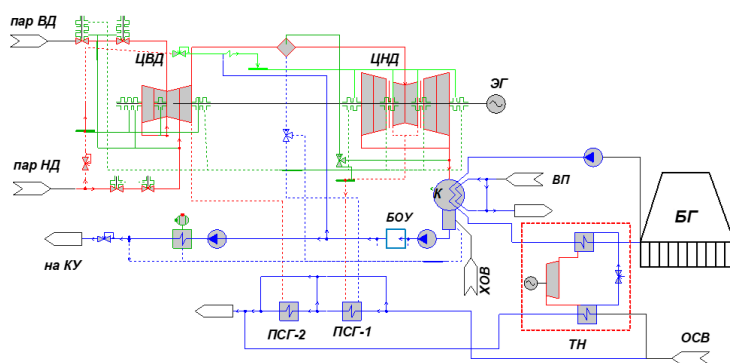


Рис.1. Тепловая схема ПГУ-450 с ТН

ЦВД – цилиндр высокого давления паровой турбины, ЦНД – цилиндр низкого давления паровой турбины; КУ – котел-утилизатор, К – конденсатор, ЭГ – электрогенератор, БОУ – блочная обессоляющая установка, ПСГ1 и ПСГ2 – подогреватели сетевой воды, БГ – башенная градирня, ТН – тепловой насос, пар ВД и НД – потоки пара высокого и низкого давления от котла-утилизатора, ВП – подпитка теплосети, ХОВ – химически обессоленная вода, ОСВ – обратная сетевая вода

Fig. 1. Schematic diagram of a CCGT-450 with HP CVD - high-pressure turbine cylinder, CND - low-pressure turbine cylinder, KU - heat recovery boiler, K - condenser, EG - electric generator, BOU - desalting plant, PSG1 and PSG2 - network water heaters, BG - cooling tower, TN - heat pump, VD and ND steam - high and low pressure steam flows from the heat recovery boiler, VP - make-up water; HOV - chemically treated water, OSV - return network water

В схеме применяется пароконденсационный ТН. В качестве ИНТ используется техническая вода системы охлаждения конденсатора ПТ. Отпуск тепла от ТН осуществляется, в зависимости от температуры ИНТ путем подогрева обратной сетевой воды, в качестве одной из ступеней или путем подогрева подпиточной воды теплосети. Как показывают проведенные ранее исследования, данному схемному решению соответствует коэффициент преобразования энергии ТН (КПЭ ТН) равный 3.

Охлаждающая вода после конденсатора ПТ перераспределяется между испарителем ТН и системой охлаждения (градирня башенного типа), а затем сливается в единый поток, который поступает обратно в конденсатор ПТ. В конденсатор ТН подается вода из системы отопления от потребителя, нагревается и направляется в водогрейные котлы или сетевые водонагреватели, питаемые паром из отборов паровой турбины.

В состав основного энергетического оборудования дубль-блока ПГУ-450 входит 2 газотурбинные установки (ГТУ) типа V-94,2, 2 котла-утилизатора (КУ) с двумя контурами давления типа П-90, 1 паровая турбина типа Т-150-7,7. Характеристики основного энергетического оборудования энергоблока ПГУ-450Т в конденсационном (К-режим) и теплофикационном (Т-режим) режимах (табл. 1).

Таблица 1

Показатели основного энергетического оборудования энергоблока ПГУ-450Т

Характеристика	Значение
Электрическая мощность ГТУ, МВт	150
КПД ГТУ, %	33,8
Начальная температура газов ГТУ, °С	1060
Температура уходящих из ГТУ газов, °С	544
Расход уходящих газов, кг/с	525,7
Температура уходящих газов, °С	100
Расход пара ВД, т/ч	242
Давление пара ВД, МПа	8
Температура пара ВД, °С	515
Расход пара НД, т/ч	56
Давление пара НД, МПа	0,65
Температура пара НД, °С	200
Электрическая мощность ПТ в К-режиме / Т-режиме, МВт	161,6/128,6
Тепловая нагрузка, Гкал/ч	329,7
Расчетное давление в конденсаторе, МПа	0,011
Температура охлаждающей воды, °С	27

Данные по температурам наружного воздуха и продолжительности отопительного периода приняты в соответствии с нормативами для условий г. Санкт-Петербурга².

Если мощность ТН выбирается на основании данных о тепловой нагрузке потребителя, справедливо выражение (1):

$$Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} = Q_{\text{пб}} \quad (1)$$

где $Q_{\text{ТН}}^{\text{max}}$ – максимальная мощность ТН, МВт;

$Q_{\text{пб}}$ – тепловой нагрузке потребителя, МВт.

Если осуществлять выбор мощности ТН по количеству ИНТ для данного схемного решения, граничное условие определяется из теплового баланса конденсатора (2):

$$Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} = \frac{G_{\text{к}} \times (h_{\text{п}} - h_{\text{к}})}{\left(1 - \frac{1}{\phi}\right)} \quad (2)$$

где $G_{\text{к}}$ – расход пара в конденсатор, кг/с;

$h_{\text{к}}$ – энтальпия конденсата на выходе из конденсатора, кДж/кг;

$h_{\text{п}}$ – энтальпия пара на входе в конденсатор, кДж/кг.

ϕ – коэффициент преобразования энергии ТН.

С увеличением тепловой мощности ТН, растет объем потребления электроэнергии на привод компрессора ТН и общий расход электроэнергии на собственные нужды ТЭС. В результате, уменьшается полезный отпуск на ОРЭ, увеличивается себестоимость

² СП 131.13330.2018. Пересмотр СНиП 23-01-99* «Строительная климатология». Утв. приказом М-ва стр-ва и жил.-ком. хоз-ва РФ № 763/пр от 28.11.2018.

производства электроэнергии и снижается конкурентоспособность ТЭС. Следовательно, в качестве ограничения мощности ТН выступает условие безубыточности работы ТЭС на ОРЭ [24]. В аналитическом виде это условие может быть представлено следующим образом (3):

$$Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} = W_{\text{э/э}} \cdot (1 - w_{\text{ТЭС}}^{\text{CH}}) \cdot \left(1 - b_{\text{э/э}} \cdot \frac{\Pi_{\text{НТ}}^{\text{факт}}}{\Pi_{\text{э/э}}} \cdot \frac{Q_{\text{Н УТ}}^{\text{P}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{P}}} \right) \cdot \varphi \quad (3)$$

где $W_{\text{э/э}}$ – часовой объем генерации электроэнергии ТЭС, МВтч;

$w_{\text{ТЭС}}^{\text{CH}}$ – доля расхода электроэнергии на собственные нужды (СН) ТЭС в режиме без ТН;

$b_{\text{э/э}}$ – удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии с шин, т.у.т/МВтч;

$\Pi_{\text{НТ}}^{\text{факт}}$ – цена натурального топлива, руб/тыс.м³ (руб/т);

$\Pi_{\text{э/э}}$ – цена электроэнергии на ОРЭ, руб./МВтч;

$Q_{\text{Н УТ}}^{\text{P}}$ – теплота сгорания условного топлива, МДж/т.у.т;

$Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$ – фактическая теплота сгорания натурального топлива, МДж/тыс.м³ (МДж/т).

Окончательно условие выбора максимальной мощности ТН, используемого в схеме охлаждения конденсатора ПТ на ТЭС может быть сформулировано следующим образом (4):

$$\begin{cases} Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} \leq W_{\text{э/э}} \cdot (1 - w_{\text{ТЭС}}^{\text{CH}}) \cdot \left(1 - b_{\text{э/э}} \cdot \frac{\Pi_{\text{НТ}}^{\text{факт}}}{\Pi_{\text{э/э}}} \cdot \frac{Q_{\text{Н УТ}}^{\text{P}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{P}}} \right) \cdot \varphi \\ Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} \leq Q_{\text{потр}} \\ Q_{\text{ТН}}^{\text{max}} \leq \frac{G_{\text{к}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{к}})}{\left(1 - \frac{1}{\varphi} \right)} \end{cases} \quad (4)$$

Результаты

Фактическая тепловая нагрузка потребителя определяется температурой наружного воздуха и, чаще всего, существенно ниже значения подключенной. На рисунке 2 представлен диапазон изменения фактических тепловых нагрузок объекта исследования в годовом разрезе в 2012-2020 гг. В соответствии со статистическими данными по объекту исследования, максимальная тепловая нагрузка потребителя составляет порядка 336 Гкал/ч (390 МВт), при среднегодовой тепловой нагрузке порядка 170 Гкал/ч (198 МВт).

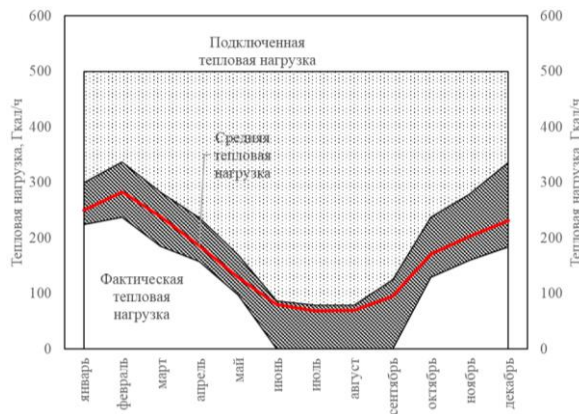


Рис.2 Динамика тепловых нагрузок ТЭЦ

Fig.2 Dynamics of thermal loads of the CHP

Количество ИНТ, образующееся на ТЭЦ, определяется расходом пара в конденсатор, который в свою очередь зависит от соотношения электрических и тепловых нагрузок генерирующего оборудования (режима работы). На рисунке 3 представлен диапазон изменения среднечасового количества ИНТ, образующегося в системе охлаждения конденсаторов ПТ объекта исследования в годовом разрезе в 2017-2020 гг.

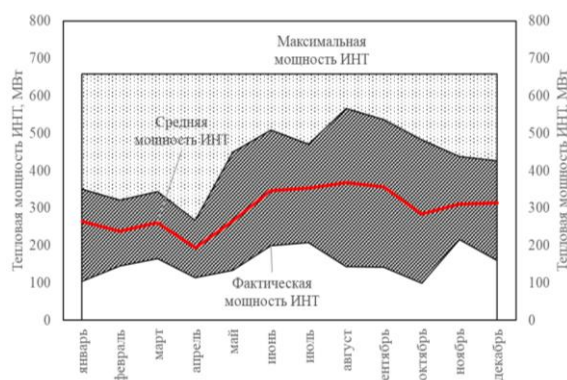


Рис.3 Динамика тепловой мощности источника
низкопотенциальной теплоты

Fig.3 Dynamics of thermal power low-potential
heat source

В таблице 2 представлен расчет максимального количества ИНТ, которое может быть отведено от системы охлаждения конденсаторов ПТ объекта исследования, для основных вариантов состава оборудования, при работе ТЭС в К-режиме и варьировании электрической нагрузки газовых турбин от максимума до минимума.

Таблица 2

Максимальное количество ИНТ в системе охлаждения конденсатора

Показатель	Режим работы ТЭС			
	2 блока	1,5 блока	1 блок	полублок
Электрическая мощность ГТУ, МВт	150 / 100	150 / 100	150 / 100	150 / 100
Температура газов за ГТУ, °C	539 / 514	539 / 514	539 / 514	539 / 514
Расход газов за ГТУ, кг/с	532 / 444	532 / 444	532 / 444	532 / 444
Расход пара в конденсатор, кг/с	303 / 241	227 / 181	151 / 121	75 / 60
Давление в конденсаторе, кПа	7			
Тепловая мощность ИНТ, МВт	659 / 526	493 / 393	329 / 263	164 / 130
КПЭ ТН	3			
Максимальная мощность ТН, МВт	988 / 789	740 / 589	494 / 394	246 / 195

Ограничение мощности ТН, с точки зрения безубыточности работы ТЭС на ОРЭ, определяется электрической мощностью установки, долей расхода электроэнергии на СН, удельным расходом условного топлива на производство электроэнергии (УРУТэ), соотношением цен на топливо и электрическую энергию, а также КПЭ ТН.

Фактическая мощность генерирующего оборудования ТЭС меняется в пределах регулировочного диапазона, в соответствии с заданным технологическим режимом работы. На рисунке 4 представлены данные о регулировочном диапазоне объекта исследования.

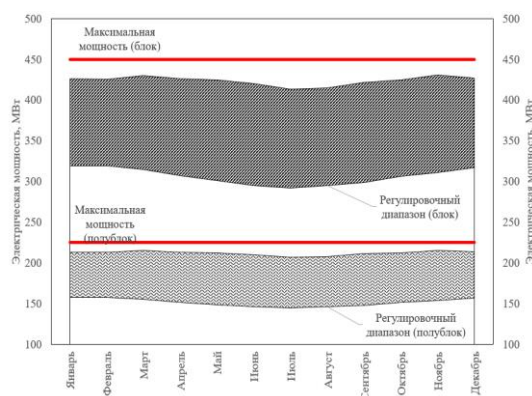


Рис.4 Регулировочный диапазон ПГУ-450

Fig.4 The range of regulation of the electric power
of the CCGT-450

Нижний предел регулировочного диапазона в К-режиме соответствует минимальной нагрузке, обеспечивающей безопасную работу оборудования, а в Т-режиме - минимальной нагрузке при которой обеспечивается заданный теплоотпуск. Верхний предел регулировочного диапазона соответствует максимальной мощности с учетом ограничений (для ПГУ ограничения связаны с температурой наружного воздуха и отпуском теплоты). Энергоблок ПГУ-450 способен работать в режиме с одной ГТУ и ПТ. В этом случае располагаемая мощность установки снижается на 50%, а технический минимум при работе в К-режиме будет составлять 32% от установленной мощности.

На рисунке 5 представлены часовые объемы производства электроэнергии объекта исследования в годовом разрезе. В зависимости от потребности энергосистемы, электрическая мощность энергоблоков снижалась больше чем на 34%, половина блока (ГТУ и КУ) останавливалась и один энергоблок полностью останавливался.

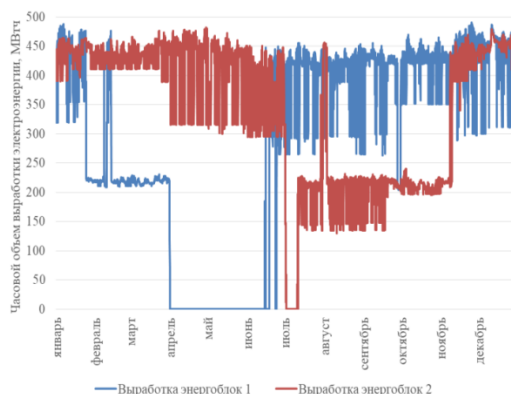


Рис. 5 Динамика часовых объемов производства электроэнергии ТЭС

Fig. 5 Dynamics of hourly volumes of TPP electricity production

Часовой расход электроэнергии на СН ТЭС (без ТН), определяется режимом работы генерирующего оборудования. На рисунке 6 представлена зависимость доли расхода электроэнергии на СН объекта исследования от электрической мощности ПГУ-450Т.

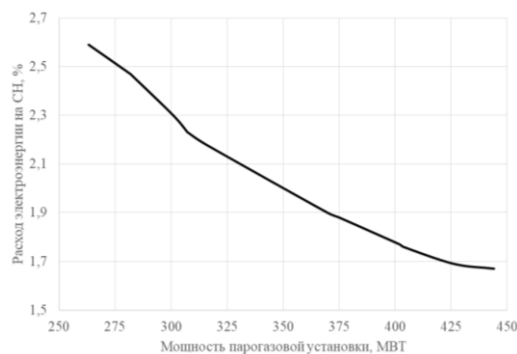


Рис. 6 Расход электроэнергии на собственные нужды энергоблока ПГУ-450

Fig. 6 Electricity consumption for own needs of the CCGT-450

УРУТэ зависит от режима работы ТЭС, а также утвержденного метода разнесения топливных затрат между электрической и тепловой энергиями. На рисунке 7, для объекта исследования, представлен диапазон изменения УРУТэ за период 2015-2019 гг.

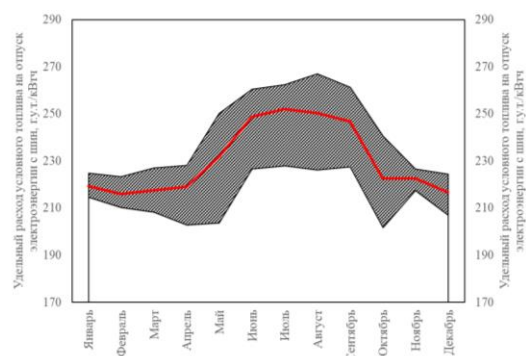


Рис. 7 Динамика удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии в годовом разрезе

Fig. 7 Dynamics of the specific consumption of conventional fuel for electricity generation in the annual context

Цена условного топлива, потребляемого ТЭС, определяется ценой природного топлива и его калорийностью. В свою очередь, цена природного топлива меняется в зависимости от условий договора с поставщиком. На рисунке 8 представлена динамика изменения цены условного топлива для объекта исследования за 2009-2020 гг.

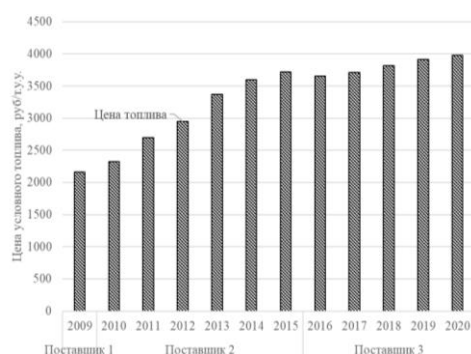


Рис. 8 Динамика изменения цен на условное топливо

Fig. 8 Dynamics of changes in prices for conventional fuel

Цена на электроэнергию зависит от сегмента ОРЭ, категории (поставщика / потребителя) и региона. Объект исследования, расположен в г. Санкт-Петербург (ОЭС Северо-Запада, первая ценовая зона). На рисунке 9 представлена динамика изменения цен и объемов электроэнергии, поставленных объектом исследования на различные сегменты ОРЭ в 2019 г.

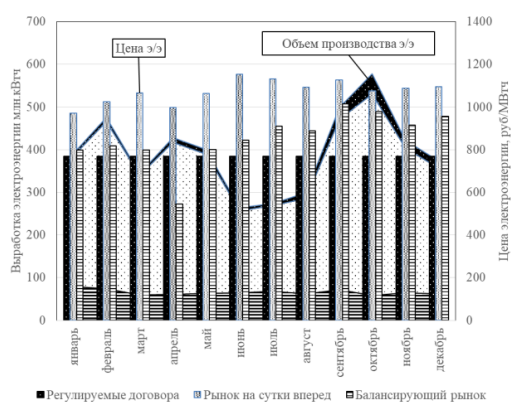


Рис. 9 Динамика изменения цен и объемов поставок на рынок электроэнергии

Fig. 9 Dynamics of changes in prices and volumes of supplies to the electricity market

Наиболее развернутое представление о допустимой мощности ТН на ТЭС, в условиях работы на ОРЭ, можно получить если провести расчет, в соответствии с формулой (3) для электрической мощности во всем диапазоне регулирования генерирующего

оборудования с учетом наиболее типичного суточного и годового графика работы. При этом, доля потребления электроэнергии на СН ТЭС (без ТН) и удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии являются характеристиками режима и непосредственно связаны с тепловой и электрической мощностью ТЭС. Цены топлива и электроэнергии – внешние характеристики, определяемые конъюнктурой рынка.

На рисунке 10 представлена зависимость максимальной мощности ТН от цен на энергоресурсы для энергоблока ПГУ-450 при варьировании электрической нагрузки в режиме блока и полублока (К-режим). КПЭ ТН принято на уровне 3. Из рисунка видно, что на выбор мощности ТН существенное значение оказывают соотношение цен на энергоресурсы. При уменьшении цены на электроэнергию ниже 500 руб/МВтч или увеличении цены условного топлива свыше 6000 руб/т.у.т., мощность ТН, исходя из безубыточности продажи электроэнергии на ОРЭ, равна 0. Это означает, что использование ТН на данном энергообъекте - не рационально, поскольку увеличение топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии, будет превышать средний уровень цен, по которым осуществляется поставка на ОРЭ.

Из рисунка 10 видно, что каждому значению цены топлива соответствует узкий диапазон цен на электроэнергию при достижении которого использование ТН на ТЭС становится не рациональным, с точки зрения работы на ОРЭ, и применение ТН должно дополнительно обосновываться технико-экономическими расчетами, с учетом продажи тепловой энергии.

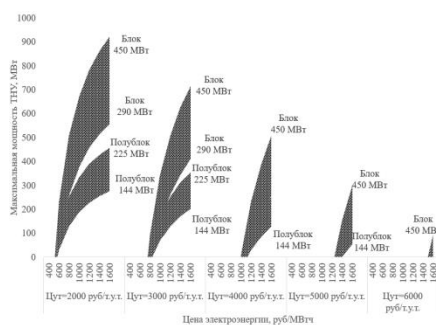


Рис. 10 Максимальная мощность теплового насоса, установленного на ТЭС на базе ПГУ-450

Fig. 10 The maximum capacity of the heat pump installed at the TPP based on the CCGT-450

На рисунке 11 представлены графические зависимости, с помощью которых можно проводить анализ диапазона максимальной мощности ТН для ТЭС на базе двух энергоблоков ПГУ-450 (4). Рассматривается действующий на данный момент, для объекта исследования, уровень цен на энергоресурсы (цена на электроэнергию 1100 руб/МВтч, цена на условное топливо 4000 руб/т.у.т.). Диапазон изменения электрической нагрузки принят от установленной мощности ТЭС до технического минимума в режиме полублок. КПЭ ТН принято в диапазоне 3-5.

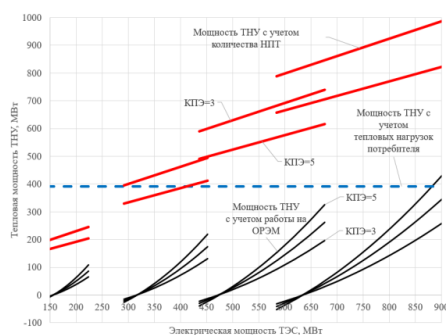


Рис. 11 Диапазон максимальной мощности теплового насоса

Fig. 13 Maximum power range of the heat pump

Из рисунка 11 видно, что в условиях избыточности низкотемпературных ресурсов и стабильно высоких тепловых нагрузок потребителя, основным ограничением для мощности теплового насоса, выступает безубыточность работы ТЭС на ОРЭ. Для объекта

исследования, при среднегодовой электрической нагрузке 650 МВт, и КПЭ ТН 3, максимальная мощность ТН составляет 160 МВт.

Обсуждение

В статье на примере действующего энергообъекта было оценено влияние основных технико-экономических факторов, ограничивающих диапазон мощности ТН, использующего в качестве ИНТ, техническую воду из системы охлаждения конденсаторов ПТ.

Как показывают ранее проведенные исследования [24], можно получить непосредственную взаимосвязь между максимальной мощностью ТН, установленного на ТЭС, (вне зависимости от типа и характеристик используемого ИНТ) и внешними экономическими условиями, а также мощностью и уровнем энергоэффективности генерирующего оборудования. Это дает возможность вводить дополнительные ограничивающие условия и даже обосновывать не рациональность применения ТН на объектах топливно-энергетического комплекса России. Что является особенно актуальным, поскольку, в условиях действующей рыночной модели, в энергетике принятие управленческих решений, в том числе, в области инвестиционной деятельности, должно опираться, прежде всего, на экономический анализ [25-26].

Используемый в статье подход к определению диапазона допустимой мощности ТН, может быть использован для выбора и обоснования оборудования, внедряемого в тепловую схему, как уже существующей, так и проектируемой, ТЭС, вне зависимости от региона расположения, типа энергосистемы, стоимости энергоресурсов, иных рыночных условий, а также типа и характеристик используемого оборудования.

В условиях конкурентного подхода, при формировании экономических отношений в современной России, применение данного метода будет способствовать как раскрытию потенциала масштабного использования низкотемпературных ресурсов в энергетике, так и формированию подходов к решению задачи оптимизации состава оборудования ТЭС с ТН. Что в перспективе, окажет влияние не только на капитальные вложения и эксплуатационные расходы реальных энергообъектов, но и, в целом, на формирование цен на электроэнергию и тепло в конкретных регионах.

Заключение

1. Диапазон мощности ТН, используемого в технологической схеме ТЭС, может быть ограничен количеством доступных низкопотенциальных ресурсов, тепловыми нагрузками потребителя и доходностью поставок на ОРЭ.

2. В условия избыточного количества низкопотенциальной теплоты, отводимой в системе охлаждения конденсатора ПТ, и при стабильно высоких тепловых нагрузках потребителя, для мощности ТН основным является рыночное ограничение.

3. Максимальная мощность ТН, при которой будет обеспечиваться безубыточное производство электроэнергии на ТЭС, определяется внешними экономическими условиями, а также мощностью и уровнем энергоэффективности генерирующего оборудования.

Для объекта исследования:

- электрическая нагрузка может меняться в пределах 80% от установленной мощность ТЭС;
- доля потребления на СН (без учета ТН) составляет 1,5-2,5% от фактической электрической мощности ТЭС;
- удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, при работе в пределах регулировочного диапазона меняется в пределах от 200 до 280 г.у.т./кВтч;
- средняя цена на условное топливо составляет порядка 4000 руб/т.у.т;
- средняя цена поставки электроэнергии составляет порядка 1100 руб/МВт;
- при среднегодовой электрической нагрузке 650 МВт и КПЭ ТН 3 максимальная мощность ТН составляет 160 МВт.

4. Существенное значение на ограничение диапазона мощности ТН оказывает соотношение цен на энергоресурсы. Для объекта исследования, при уменьшении цены на электроэнергию ниже 500 руб/МВтч или увеличении цены условного топлива выше 6000 руб/т.у.т., допустимая мощность ТН, по условию безубыточности работы на ОРЭ, равна 0.

Литература

1. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации [Электронный ресурс] // Министерство экономического развития РФ. 2020. 117 с. Режим доступа:

<https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf> (дата обращения: 29.12.2021).

2. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2020 году [Электронный ресурс] // Системный оператор ЕЭС. 2021. - 36 с. Режим доступа: https://www.sops.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2021/ups_rep2020.pdf (дата обращения: 29.12.2021).

3. Magnani S., Danti P., Pezzola L. Analysis of the coupling between CHP and EHP in an office building applied to the Italian energy market // *Energy Procedia*. 2016. V. 101. pp. 558–565.

4. Liang Y., Al-Tameemi M., Yu Z. Investigation of a gas-fuelled water heater based on combined power and heat pump cycles // *Applied Energy*. 2018. V. 212. pp. 1476–1488.

5. Wang J., Zhong H., Tan C., et al. Economic benefits of integrating solar-powered heat pumps into a CHP system // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018. V. 9. pp. 1702–1712.

6. Alla S.A., Bianco V., Marchitto A., et al. Impact of the Utilization of Heat Pumps for Buildings Heating in the Italian Power Market // In *Proceedings of the 15th International Conference on the European Energy Market*, Lodz, Poland, 27–29 June 2018.

7. Sewastianik S., Gajewski A. Energetic and Ecologic Heat Pumps Evaluation in Poland // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 4980.

8. Østergaard P.A., Andersen A.N. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating // *Applied Energy*. 2016. V. 184. pp. 1374–1388.

9. Romanchenko D., Odenberger M., Göransson L., et al. Impact of electricity price fluctuations on the operation of district heating systems: A case study of district heating in Göteborg, Sweden // *Applied Energy*. 2017. V. 204. pp. 16–30.

10. Trømborg E., Havskjold M., Bolkesjø T.F., et al. Flexible use of Electricity in Heat-only District Heating Plants // *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2017. V. 12. pp. 29–46.

11. Sun F., Xie Y., Svendsen S., et al. New low-temperature central heating system integrated with industrial exhausted heat using distributed electric compression heat pumps for higher energy efficiency // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6582.

12. Sánchez-Canales V., Payá J., Corberán J.M., et al. Dynamic modelling and techno-economic assessment of a compressed heat energy storage system: Application in a 26-MW wind farm in Spain // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 4739.

13. Chen Y., Zhang Y., Wang J., et al. Operation for integrated electricity-heat system with improved heat pump and storage model to enhance local energy utilization // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6729.

14. Scharrer D., Eppinger B., Schmitt P., et al. Life cycle assessment of a reversible heat pump-organic Rankine cycle-heat storage system with geothermal heat supply // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 3253.

15. Goricanec D., Ivanovski I., Kroppe J., et al. The Exploitation of Low-Temperature Hot Water Boiler Sources with High Temperature Heat Pump Integration // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6311.

16. Zhang L., Zhang Y., Zhou L., et al. Research of waste heat energy efficiency for absorption heat pump recycling thermal power plant circulating water // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. V. 121. pp. 4.

17. Боровков В. М., Аль Алафин А. Тепловой насос с двухступенчатым конденсатором // *Промышленная энергетика*. 2007. № 8. С. 40–43.

18. Калнинь И.М., Проценко В.П., Пустовалов С.Б. Системы централизованного теплоснабжения на базе теплонасосных установок // *Холодильная техника*. 2011. № 1. С. 20–22.

19. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод юга России для тепло-, водоснабжения и решения экологических проблем // *Теплоэнергетика*. 2019. № 66. С. 361–366.

20. Андрущенко А. И. Сравнительная эффективность применения тепловых насосов для централизованного теплоснабжения // *Промышленная энергетика*. 1997. № 6. С. 2–4.

21. Морозов Ю.П., Чалаев Д.М., Величко В.В. Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов // *Альтернативная энергетика и экология (Isjaee)*. 2017. № 4–6. С. 70–79.

22. Шпильрайн Э.Э. Возможность использования теплового насоса на ТЭЦ // *Теплоэнергетика*. 2003. № 7. С. 54–56.

23. Проценко В.П., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И., и др. Атомно-теплонасосная теплофикация (АТТ) как новое направление в развитии энергетики // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 1. С. 25–29.

24. Treshcheva M., Anikina I., Sergeev V., et al. Selection of Heat Pump Capacity Used at Thermal Power Plants under Electricity Market Operating Conditions. *Energies*. 2021. V. 14. pp. 226.

25. Балынин И.В. Оценка результативности инвестиционных проектов: правила, показатели и порядок их расчета // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 6 (453). С. 26–41.

26. Николенко Т.Ю., Тарасова Е.В. Система сбалансированных показателей и инструментарий оценки эффективности инновационных проектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2016. № 6. С. 228–235.

Авторы публикации

Трещёва Милана Алексеевна – канд. техн. наук, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого.

Трещёв Дмитрий Алексеевич – старший преподаватель высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого.

Аникина Ирина Дмитриевна – канд. техн. наук, доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого.

References

1. Ministry of Economic Development of the Russian Federation. *State report on the state of energy conservation and energy efficiency improvement in the Russian Federation*. Available online: <https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee83f/Energyefficiency2020.pdf> (accessed on 29 December 2021).

2. The System Operator of the unified energy system of Russia. *Report on the functioning of the unified energy system of Russia in 2020*. Available online: https://www.sosups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2021/ups_rep2020.pdf (accessed on 29 December 2021).

3. Magnani S, Danti P, Pezzola L. Analysis of the coupling between CHP and EHP in an office building applied to the Italian energy market. *Energy Procedia*. 2016;101:558–565.

4. Liang Y, Al-Tameemi M, Yu Z. Investigation of a gas-fuelled water heater based on combined power and heat pump cycles. *Applied Energy*. 2018;212:1476–1488.

5. Wang J, Zhong H, Tan C, et al. Economic benefits of integrating solar-powered heat pumps into a CHP system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018;9:1702–1712.

6. Alla SA, Bianco V, Marchitto A, et al. Impact of the Utilization of Heat Pumps for Buildings Heating in the Italian Power Market. In *Proceedings of the 15th International Conference on the European Energy Market, Lodz, Poland, 27–29 June 2018*.

7. Sewastianik S, Gajewski A. Energetic and Ecologic Heat Pumps Evaluation in Poland. *Energies*. 2020;13:4980.

8. Østergaard PA, Andersen A.N. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating. *Applied Energy*. 2016;184:1374–1388.

9. Romanchenko D, Odenberger M, Göransson L, et al. Impact of electricity price fluctuations on the operation of district heating systems: A case study of district heating in Göteborg, Sweden. *Applied Energy*. 2017;204:16–30.

10. Trømborg E, Havskjold M, Bolkesjø TF, et al. Flexible use of Electricity in Heat-only District Heating Plants. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2017;12:29–46.

11. Sun F, Xie Y, Svendsen S, et al. New low-temperature central heating system integrated with industrial exhausted heat using distributed electric compression heat pumps for higher energy efficiency. *Energies*. 2020;13:6582.

12. Sánchez-Canales V, Payá J, Corberán JM, et al. Dynamic modelling and techno-economic assessment of a compressed heat energy storage system: Application in a 26-MW wind farm in Spain. *Energies*. 2020;13:4739.
13. Chen Y, Zhang Y, Wang J, et al. Operation for integrated electricity-heat system with improved heat pump and storage model to enhance local energy utilization. *Energies*. 2020;13:6729.
14. Scharrer D, Eppinger B, Schmitt P, et al. Life cycle assessment of a reversible heat pump-organic Rankine cycle-heat storage system with geothermal heat supply. *Energies*. 2020;13:3253.
15. Goricanec D., Ivanovski I., Kroppe J., et al. The Exploitation of Low-Temperature Hot Water Boiler Sources with High Temperature Heat Pump Integration. *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6311.
16. Zhang L, Zhang Y, Zhou L, et al. Research of waste heat energy efficiency for absorption heat pump recycling thermal power plant circulating water. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018;121:4.
17. Borovkov VM, Al Alavin A. Heat pump with two-stage condenser. *Industrial Power Engineering*. 2007;8:40–43.
18. Kalnin IM, Protsenko VP, Pustovalov SB. Centralized heating system based on heat pumps. *Kholodilnaya Tekhnika*. 2011;1:20–22.
19. Alkhasov AB, Alkhasova DA. Comprehensive Utilization of Low-Potential Geothermal Waters of Southern Russia for Heat and Water Supply and Solution of Environmental Problems. *Thermal Engineering*. 2019;66:361–366.
20. Andryushchenko AI. Comparative efficiency of heat pumps application for district heating. *Industrial Power Engineering*. 1997;6:2–4.
21. Morozov YP, Chalaev DM, Velichko VV. Decentralized heating with geothermal heat pumps. *Alternative Energy and Ecology*. (Isjaee). 2017;4–6:70–79.
22. Shpilrayn EE. The possibility of using of heat pump on TPP. *Thermal Engineering*. 2003;7:54–56.
23. Protsenko VP, Pustovalov SB. Atomic heat pump heating as a new direction of energy development. *Energobezopasnost i Vodopod*. 2010;1:25–29.
24. Treshcheva M, Anikina I, Sergeev V, et al. Selection of Heat Pump Capacity Used at Thermal Power Plants under Electricity Market Operating Conditions. *Energies*. 2021;14:226.
25. Balynin IV. Assessing the Effectiveness of Investment Projects: Rules, Indicators and Procedure for Their Calculation. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2016;6 (453):26–41.
26. Nikolenko TY, Tarasova EV. Balanced Indicator System and Tools for Assessing the Effectiveness of Innovation Projects. *Scientific and Technical News of St. Petersburg State Polytechnic University. Economic Sciences*. 2016;6:228–235.

Authors of the publication

Milana A. Treshcheva – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia.

Dmitriy A. Treshchev – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia.

Irina D. Anikina I. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia.

Получено 21.02.2022г

Отредактировано 14.03.2022г.

Принято 21.03.2022г.



ВЛИЯНИЕ ПРИНИМАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В Г. ТАШКЕНТ

Ю.Н. Звонарева¹, Р.В. Ахметова¹, К.И. Турсунов², И.Р. Шорохов¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

²Министерство жилищно-коммунального обслуживания
Республики Узбекистан
ORCID: skulinaun@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработка и апробация на реальном объекте комплексного подхода модернизации систем теплоснабжения с учетом внедрения современных энергосберегающих технологий для снижения затрат и оптимизации процессов выработки и потребления тепловой энергии. МЕТОДЫ. В ходе исследования был произведен комплексный анализ показателей работы всех звеньев системы: произведены инструментальные замеры, собрана информация по параметрам работы системы за два последних отопительно-зимних периода. РЕЗУЛЬТАТЫ. Модернизация устаревшей системы теплоснабжения с целью повышения эффективности ее работы во всех элементах системы (источник - тепловая сеть - потребитель). Достигнутое практическое значение на сегодняшний день заключается в разработке ряда мероприятий по регулированию режима работы, направленных на переход с открытой системы теплоснабжения к более эффективной, закрытой, путем оснащения потребителей индивидуальными тепловыми пунктами, а также оптимизации процессов выработки и потребления тепловой энергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Модернизация существующей системы теплоснабжения от исследуемой котельной, позволит оптимизировать процессы выработки и потребления тепловой энергии, сократить затраты на используемые энергоресурсы. Разработанная концепция развития исследуемого объекта может быть применима для аналогичных объектов не только в Республике Узбекистан, но и на всей территории Российской Федерации, в рамках программ повышения эффективности морально и физически устаревших энергетических систем.

Ключевые слова: Энергетические системы; гидравлическая балансировка; оптимизация процессов выработки и потребления тепловой энергии; показатели эффективности.

Для цитирования: Звонарева Ю.Н., Ахметова Р.В., Турсунов К.И., Шорохов И.Р. Влияние принимаемых технических решений при эксплуатации энергетических систем в г. Ташкент // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 74-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-74-85.

THE IMPACT OF THE TECHNICAL DECISIONS MADE IN THE OPERATION OF ENERGY SYSTEMS IN TASHKENT CITY

YN .Zvonareva¹, RV. Akhmetova¹, KI. Tursunov², IR. Shorohov¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan
ORCID*:skulinaun@mail.ru

Abstract: PURPOSE. Development and testing at a real facility of an integrated approach to the modernization of heat supply systems, taking into account the introduction of modern energy-saving technologies to reduce costs and optimize the processes of generation and consumption of thermal energy. METHODS. During the study, a comprehensive analysis of the performance of all parts of the system was carried out: instrumental measurements were made, information was collected on the parameters of the system for the last two heating-winter

periods. **RESULTS.** Modernization of an outdated heat supply system to increase the efficiency of its operation in all elements of the system (source - heating network - consumer). The achieved practical significance today lies in the development of several measures to regulate the operating mode aimed at switching from an open heat supply system to a more efficient, closed one by equipping consumers with individual heating points, as well as optimizing the processes of generation and consumption of thermal energy. **CONCLUSION.** Modernization of the existing heat supply system from the boiler house under study will optimize the processes of generation and consumption of thermal energy, reduce the cost of energy resources used. The developed concept of the development of the object under study can be applied to similar facilities not only in the Republic of Uzbekistan, but also throughout the Russian Federation, as part of programs to improve the efficiency of morally and physically obsolete energy systems.

Keywords. Energy systems; hydraulic balancing; optimization of processes of generation and consumption of thermal energy; efficiency indicators.

For citation: Zvonareva YN, Akhmetova RV, Tursunov KI, Shorohov IR. The impact of the technical decisions made in the operation of energy systems in Tashkent city. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 74-85. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-74-85.

Введение

В соответствии с Федеральным законом (ФЗ) № 190 «О теплоснабжении» и Федеральным законом №417 «О водоснабжении и водоотведении» изменяются подходы к проектированию и эксплуатации систем теплоснабжения, которые были приняты с момента строительства централизованных систем в СССР.

В Российской Федерации (РФ) законодательством с 01.01.2022 г. предусмотрен перевод открытых систем теплоснабжения на закрытую схему присоединения потребителей. Поставленная ФЗ №417 цель влечет за собой решение многих научно-технических задач, таких как, изношенность длинных тепловых сетей, являющихся причиной потерь тепловой энергии, модернизации либо замены морально и физически устаревшего оборудования, невозможности регулирования потребления тепловой энергии, по причине подключения потребителей по открытой схеме присоединения [1].

Кроме решения технических задач, изменения в законодательстве затрагивают и экономические показатели. Внедрение мероприятий, по модернизации существующих систем, позволят уменьшить затраты на реконструкцию тепловых сетей горячего водоснабжения, сдержать рост тарифов за тепловую энергию.

Одновременно с изменениями законодательства РФ в сфере теплоснабжения, ряд стран Содружества Независимых Государств (СНГ), также меняют подходы к эксплуатации систем теплоснабжения и технические регламенты, которые были приняты в середине прошлого столетия.

Так, Правительство Республики Узбекистан разработало ряд программ и определило задачи по повышению энергоэффективности во всех секторах экономики путем модернизации существующих производственных мощностей. Реконструкция сетей централизованного теплоснабжения по всей стране является одним из ключевых направлений этих программ [2,3].

Согласно документу «Программа развития системы теплоснабжения Республики Узбекистан на 2018–2022 года» начиная с 1 января 2018 года, на территории республики началось внедрение энергоэффективных локальных котельных и индивидуальных внутриквартирных систем теплоснабжения. [4-7].

Документ «Программа развития системы теплоснабжения» призван повысить качество и обеспечить бесперебойную подачу тепловой энергии потребителям, обновить и модернизировать основные фонды систем теплоснабжения на основе внедрения современных экономических и энергосберегающих технологий [8,9].

Постановлением правительства Республики Узбекистан утверждены параметры модернизации и реконструкции центральных котельных, тепловых сетей, локальных котельных, а также комплексные мероприятия по развитию системы теплоснабжения на период с 2018 г. по 2022 г [10,11].

На реализацию проектов программы предусмотрено выделить 1,7 трлн сумов за счет государственного бюджета, средств частных товариществ собственников жилья, кредитов коммерческих банков, средств подрядных организаций и Фонда развития жилищно-коммунального хозяйства Министерства жилищно-коммунального

обслуживания [12-14].

Кроме того, намечена разработка концепции совершенствования и развития энергетических систем, предусматривающая комплексный подход при реализации проектов с учетом всех этапов оказания услуг теплоснабжения [15,16].

В рамках реализации утвержденных программ развития Республики Узбекистан Республика Татарстан, имея большой практический опыт в сфере повышения эффективности энергетических систем, была приглашена к сотрудничеству.

Литературный обзор

Вопросам совершенствования энергетических систем и повышения их энергоэффективности посвящено большое количество исследовательских работ. Среди них следует отметить научные исследования Стенникова В.А., Selim H., P. Wang, F.C. Leite, Липовка Ю.Л., Gabrielaitiene I., Sunden B., Панфилова В. И., W. Kröger, D. Cicone Jr., Zhou Z., Wang Z., Н. Jensen, L.C. Ribeiro Galvão, М.Е. Morales и др.

Вопросы поддержания заданного гидравлического режима в тепловых сетях и требуемого перепада давлений в абонентских узлах при изменениях работы системы теплоснабжения отражены в трудах авторов Моисеева Б.В., Богомолова В.П., Шаповала А.Ф., Сикерина И.Е., Голяка С.А., Пашенцева Л. В..

Российскими и иностранными авторами Перминовым И.А., Петрекевичем Л.А. Зайцевым О.Н., Лукьянченко Д.М., Karlsson K. B., Petrović S. N., Lake A., Rezaie B., Beyerlein S., Перминов И.А., Петрекевич Л.А. - рассмотрены современные методы регулирования тепловых сетей путем внедрения автоматизированного инженерного оборудования в системах теплоснабжения.

Вопросы использования математических моделей в программных комплексах для исследования гидравлических режимов, описываются в статьях Кудинова В.А., Кассина Н.В., Смирнова Л.В., Fu D.Z., Huang G.H., Батухтина А.Г., Калугина А.В.

В Республике Татарстан за последние года успешно реализованы проекты по переходу с открытой схемы теплоснабжения на закрытую для г. Набережные Челны, произведен ряд масштабных мероприятий по реконструкции систем теплоснабжения путем внедрения индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) в крупных городах, таких как Набережные Челны, Елабуга, Альметьевск, Зеленодольск.

На примере г. Казань, был сформирован единый комплексный план совершенствования энергетической системы с ликвидацией ЦТП и оснащением всех объектов теплопотребления в составе системы централизованного теплоснабжения современными ИТП. Всего же программа, разработанная для г. Казань, позволила ликвидировать более 260 км ветхих сетей горячего водоснабжения, вывести из эксплуатации крайне изношенное оборудование центральных тепловых пунктов и повысить качество теплоснабжения внутри домов, путем оснащения потребителей индивидуальными тепловыми пунктами [28-30].

Материалы и методы

Между Правительством Республики Татарстан (Российская Федерация) и хокимиятом города Ташкент (Республика Узбекистан) был подписан Меморандум и Соглашение о сотрудничестве в торгово-экономической, научно-технической, культурной и иных сферах.

Основой взаимодействия Сторон в рамках Соглашения лежат актуальные вопросы развития жилищно-коммунального обслуживания в части централизованного теплоснабжения г. Ташкент и Республики Узбекистан в целом. Определен «пилотный» проект в одном из районов города Ташкент – «Модернизация системы теплоснабжения от котельной «Водник»».

Проект предусматривает проведение работ по модернизации теплосетевого хозяйства от источника теплоснабжения до потребителей с переходом на закрытую систему теплоснабжения. Основная цель «пилотного» проекта заключается в разработке методики комплексного подхода по совершенствованию устаревших систем теплоснабжения с целью повышения эффективности их работы, снижении затрат и оптимизацию процессов выработки и потребления тепловой энергии.

Разработка и апробация «пилотного» проекта позволит применить комплексную методику для всей системы централизованного теплоснабжения в ближайшие 10 лет в г. Ташкент, а в дальнейшем во всей Республике Узбекистан.

Основные цели и задачи всего проекта:

- обеспечение и улучшение качества и непрерывности услуг централизованного теплоснабжения в городе Ташкент;
- стратегическая увязка проекта с национальным Законодательством и

производственными программами в Узбекистане, а именно: преобразования открытой системы теплоснабжения в закрытую систему, модернизация существующей системы теплоснабжения и перехода на интегрированную схему.

Система централизованного теплоснабжения в Республике Узбекистан сформировалась в 1950–1970 годах по схеме открытого водоразбора и зависимого подключения к тепловым сетям отопительных систем зданий.

В связи с большой изношенностью основного и вспомогательного оборудования, а также тепловых сетей, существующая система теплоснабжения не обеспечивает оптимальную загрузку теплоисточников и работает неэффективно [17, 20–23].

Выработка всей тепловой энергии в г.Ташкент осуществляется 3 предприятиями, из них

- 75% вырабатывается девятью крупными теплоцентралями «*Toshkent issiqlik markazi*»;
- 15% вырабатывает теплоэлектроцентраль «*Toshkent issiqlik elektr markazi*»;
- 10% вырабатывается тремя крупными котельными и 209 локальными котельными, которые находятся на балансе «*Toshissiqquvvati*».

В настоящее время установленная мощность всех котельных в городе Ташкент составляет 6267 Гкал/час, присоединенная мощность 3391,3 Гкал/ч. Резерв существующих мощностей составляет 2875,7 Гкал/ч. Распределение по группам потребителей приведено на рисунке 1.

В отдельных многоквартирных домах, отрезанных от централизованного теплоснабжения, население отопляет жилые помещения с помощью газовых и электрических приборов, часто несертифицированных и не гарантирующих соблюдение пожарной безопасности [18–19, 24].

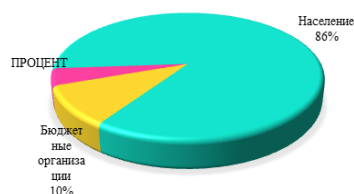


Рис.1 Распределение по группам потребителей в г. Ташкент Fig.1. Distribution by consumer groups in Tashkent

Гарантирующим поставщиком тепловой энергии является ГУП «*Toshissiqquvvati*» на балансе которого находится 1347 км тепловых сетей.

Таблица 1

Текущее состояние ГУП «*Toshissiqquvvati*»

Информация об изношенности системы	Общее кол-во	Из них ремонту подлежит	Износ
Магистральные и распределительные сети, км	1347	966	72%
Центральные котельные	3	3	100%
Локальные котельные	200	178	89%

Показатель износа тепловых сетей, находящихся на балансе ГУП «*Toshissiqquvvati*» составляет 72%. При этом большая часть тепловых сетей находятся в эксплуатации более 25 лет. На рисунке 2 тепловые сети, проложенные либо замененные до 2010 года и нуждающиеся в замене, окрашены в красный цвет.

Таблица 2

Износ магистральных и распределительных тепловых сетей

Год прокладки	Общая протяжённость, км	Износ
1960-1970	22	100%
1971-1981	97	100%
1982-1992	395	92%
1993-2003	507	77%
2004-2014	231	35%
2015-2018	95	15%
Всего	1347	72%



Рис.2. Конфигурация тепловых сетей от котельной «Водник»

Fig.2. Configuration of heating networks from the Vodnik boiler house

В ходе изучения и осмотра существующей системы теплоснабжения был выявлен ряд основных причин, влияющих на ее неэффективную работу:

- эксплуатация морально и физически изношенного основного и вспомогательного оборудования (рис. 3);
- сверхнормативная подача за счет несанкционированных сливов теплоносителя (открытая система теплоснабжения);
- использование низкоэффективной изоляции (минеральная вата) при прокладке и реконструкции трубопроводов (рис. 3);
- износ тепловых сетей (более 72%);
- неэффективная система химводоочистки, завышенные показатели концентрации кислорода в системе, активная коррозия металла (112,5 мл/л при норме 20 мл/л);
- сверхнормативные затраты на теплоисточниках;
- низкий процент собираемости.

Кроме того, ежегодно возрастают потери тепловой энергии и ухудшается качество теплоснабжения для конечного потребителя.



Рис.3. Фактическое состояние основного оборудования (обмуровка котла) и состояние теплотрассы

Fig.3. Actual condition of the main equipment (boiler lining) of heating networks

На основании подписанного Меморандума между Республиками Татарстан и Узбекистан, для реализации «пилотного» проекта, была создана рабочая группа из числа специалистов в профильных областях исследования.

Выбранная в качестве «пилотного» проекта, котельная «Водник» (таблица 3) является одной из крупной в г. Ташкент, и обеспечивает тепловой энергии потребителей Бектимирского района города.

«Пилотный» проект предусматривает проведение работ по модернизации теплосетевого хозяйства от котельной до потребителей с переходом на «закрытую» схему присоединения, со сроком реализации всех мероприятий к 2024 году.

Таблица 3

Характеристика оборудования исследуемой котельной «Водник»	
Тип и назначение котельного оборудования	количество
Паровой котел ГМ 50/14	7
Водогрейный котел КВГМ - 50	1

Общая установленная тепловая мощность котельной составляет 295 Гкал/час. Присоединенная тепловая нагрузка 120 Гкал/ч, в том числе по отоплению 110 Гкал/час, по ГВС 10 Гкал/час

Предприятие обеспечивает теплом и горячей водой 200 многоквартирных домов, 32 социальных и культурных объекта, 51 объект коммерческого назначения. Система теплоснабжения двухтрубная, открытая.

Протяженность тепловых сетей составляет 26,15 км в двухтрубном исчислении.

В ходе проведения исследования, произведен комплексный анализ показателей работы всех звеньев системы (источник - тепловая сеть - потребитель): произведены инструментальные замеры, собрана информация по параметрам работы системы за два последних отопительно-зимних периода.

Все вышеуказанное сводится к убыткам, которые ежегодно несет гарантирующий поставщик - компания «*Toshissiqquvvati*».

Анализ существующего положения при работе рассматриваемой системы теплоснабжения позволил определить направление и необходимую очередность реализации мероприятий по модернизации системы теплоснабжения от котельной «Водник» г. Ташкент (рис. 4).



Рис. 4. Производственные предложения по модернизации системы теплоснабжения

Fig. 4. Production proposals for the modernization of the heat supply system

Результаты исследования

По результатам проведенных исследований и расчетов выявлены основные проблемы в существующей системе теплоснабжения и разработана концепция совершенствования исследуемой энергетической системы.

Ключевыми задачами являются: «закрытие» системы теплоснабжения, реконструкция изношенных участков тепловых сетей, пересмотр баланса тепловых нагрузок и рациональное перераспределения теплоносителя, циркулирующего в системе теплоснабжения.

Анализ проведенных исследований и расчетов показал, что в результате реализации первого этапа «пилотного» проекта, ориентировочное снижение потерь тепловой энергии к 2040 году относительно базового периода (2020 год) сократится на 43 %. Снизится объем подпитки тепловой сети на 67% (рис. 5).

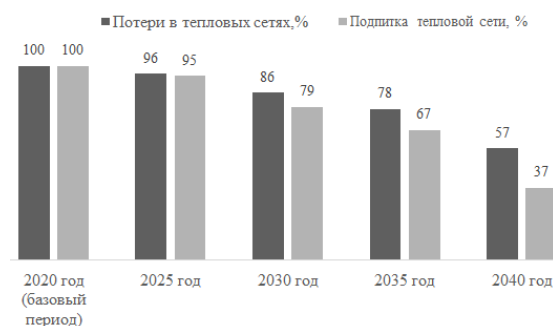


Рис.5. Сокращение потерь и подпитки в тепловых сетях относительно базового периода

Fig.5. Reduction of losses and make-up in heat networks relative to the base period

За счет замены тепловых сетей сократиться число аварий и повреждений в системе, в свою очередь повысит надежность и качество теплоснабжения (рис. 6)

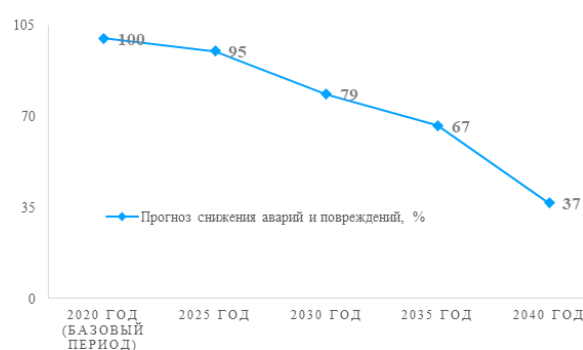


Рис.6. Расчетный прогноз снижения аварийности в сетях относительно базового периода

Fig.6. Estimated forecast of reduction of accidents in networks relative to the base period

Вторым этапом «пилотного» проекта намечены мероприятия по модернизации источников тепловой энергии, замена основного и вспомогательного оборудования на современной и более эффективное. Это позволит сократить затраты на выработку тепловой энергии. Сокращение затрат на топливо с учетом комплекса мероприятий по модернизации системы теплоснабжения прогнозируется на уровне 44% от базового периода.

Так в 2020 году объем природного газа, включенный в расходы ГУП «Тoshissiqquvvati», составил 130 464 тыс м³. К 2030 году прогнозный показатель по расходу топлива составляет 78 981 тыс м³.

Кроме того, прогнозируется снижение потребления электрической энергии на тепловом источнике на 16% относительно базового периода (рис.7).

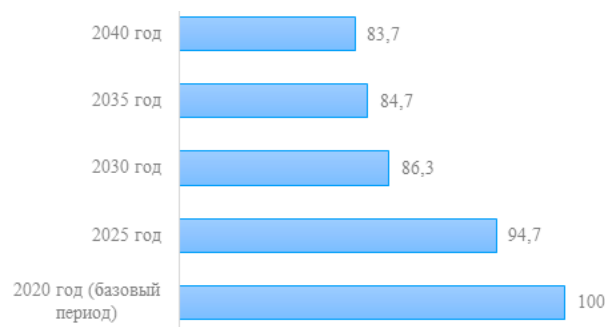


Рис.7. Расчетный прогноз снижения потребления электрической энергии относительно базового периода

Fig.7. Estimated forecast of reduction of electric energy consumption relative to the base period

Кроме того в рамках модернизации системы предусмотрено изменение существующих и разработка новых нормативно-правовых актов, регламентирующих

сферу деятельности не только предприятия «пилотного» проекта, но и всей системы теплоснабжения Республики Узбекистан.

Все этапы реализации проекта, предусматривают предпроектный анализ методом моделирования различных изменений в создаваемой электронной модели.

Моделирование различных режимов на базе существующего режима работы позволит сократить финансовые и производственные риски при реализации проекта на каждом этапе его выполнения.

Обсуждение результатов

Предлагаемые мероприятия, основаны на опыте внедрения аналогичных проектов на территории Республики Татарстан [25-27].

Фактические достигнутые показатели при эксплуатации систем теплоснабжения в городах Республики Татарстан, позволяют говорить о потенциале энергосбережения в системах теплоснабжения при их модернизации.

Реализация мероприятий, согласно приведенной на рисунке 5 иерархии, позволит получить энерго- и ресурсосберегающий эффект, за счет повышения эффективности работы внутренних процессов подготовки теплоносителя и оптимизировать работу всей системы в целом.

Срок окупаемости мероприятия, на сегодняшний день достаточно сложно оценить, так как отсутствуют сметные затраты на поставку и монтаж оборудования.

Основными показателями сокращения затрат и оптимизации процесса выработки и потребления тепловой энергии исследуемого объекта является сокращение затрат на транспортировку теплоносителя, за счет снижения потерь в сетях, улучшения качества самих трубопроводов и корректировки их пропускной способности.

Кроме того, реализация предложенных мероприятий позволит оптимизировать процессы выработки и потребления тепловой энергии, за счет установки приборов учёта и регулирования, увеличить собираемость от населения, свести к минимуму, либо вовсе исключить несанкционированные сливы теплоносителя.

Все вышеизложенное является основным источником прибыли и показателем повышения эффективного теплоснабжения.

Выводы

Разработанные мероприятия по совершенствованию системы теплоснабжения от котельной «Водник» будут реализовываться поэтапно.

Общий экономический эффект и срок окупаемости проекта по модернизации систем теплоснабжения, с учетом всего комплекса мероприятий, будет оценен после их реализации. Это позволит применять на практике разработанный подход без технических и экономических рисков [31-33]. Однако уже на сегодняшний день уже можно говорить о реальном снижении затрат и эффективности предлагаемых мероприятий.

Комплексное и структурированное внедрение предложенных организационных и производственных мероприятий позволяет повысить эффективность работы системы в целом и сдерживать рост тарифов, сокращая при этом себестоимость выпускаемой продукции (тепловой энергии). Данный показатель является одним из главных источников окупаемости аналогичных проектов по совершенствованию энергетических систем.

Разработанная концепция развития исследуемого объекта может быть применима для аналогичных объектов не только в Республике Узбекистан, но и на всей территории Российской Федерации, в рамках программ повышения эффективности морально и физически устаревших энергетических систем.

Литература

1. Схема теплоснабжения муниципального образования г. Набережные Челны на 2021 год на период до 2035 года. Набережные Челны: ООО «ИЦ «Энергоаудит», 2020. Т.4. 82 с.
2. Жуков В.К., Камалетдинов И.И., Минаков А.А. Экономическая эффективность массового внедрения индивидуальных тепловых пунктов в городе Елабуге // Энергосовет. 2014. № 5 (36). С. 36-37.
3. ИТП против ЦТП. Зачем Казань меняет схему горячего водоснабжения [Электронный ресурс]: еженедельник «Аргументы и Факты». 2017. № 13. URL: https://kazan.aif.ru/society/details/itp_protiv_ctp_ (дата обращения 14.12.2021).

4. Стенников В.А. Обеспечение параметрической надежности теплоснабжающих систем // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19, № 3-4. С. 20–30.
5. Gabrielaitiaene I 2008 Evaluation of approaches for modeling temperature wave propagation in district heating pipelines // Heat transfer engineering 1 p. 45–46.
6. Wernstedt F 2017 An agent-based approach to monitoring and control of district heating systems. Lecture notes in computer science 2358 p. 801.
7. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Издательство: КГЭУ. 2017. Т. 19 №1-2. С. 31-40.
8. Филимонов А.Г. Особенности перехода Казани на АИТП при реализации комплексной программы повышения эффективности системы теплоснабжения // Вестник КГЭУ. 2019. №2 (42). С. 127–137.
9. Morvaj B 2016 Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation, and district heating network layout. Energy 116 (1) p. 619–636.
10. Абдулаев Д.А. Гидравлическая устойчивость тепловой сети // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1 (52). С. 67–85.
11. Zvonareva Y, Vankov Y, Shlychov V. Commercial effectiveness assessment of implementation the energy efficiency raising of the building project due to introduction of automatic heat consumption control // Публикация по итогам Научно-технической международной конференции «ПромИнжиниринг-2017» SHS Web of Conferences 35, 01124 (2017). doi: 10.1051/shsconf/20173501124.
12. Звонарева Ю.Н. Оценка экономического эффекта для потребителей при установке автоматизированных узлов учета и регулирования тепловой энергии // Инженерный вестник Дона. 2015. №4. С. 156–161.
13. Кузборская К.С., Звонарева Ю.Н. Сравнение схем подключения потребителей в автоматизированном индивидуальном тепловом пункте // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы 6 Национальной науч.-практ. конф. Казань, 2020. № 2. С. 324–327.
14. Запольская И.Н., Ваньков Ю.В. Повышение эффективности систем ГВС установкой автоматизированных ИТП // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2017, № 4(36). С. 23–34.
15. Drigo M.F. 2008 Methodology of an assessment of economic efficiency investment decisions Management in Russia and abroad 1 p. 18-24.
16. Rafalskaya T.A. 2017 Investigation of failures in operation of heat networks of large heat supply systems Thermal Engineering 64 (4) p. 313-7.
17. Сикерин И.Е. Влияние гидравлического режима сети теплоснабжения на тепловую устойчивость абонентов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2010. № 2. С. 20–22.
18. Ливчак В.И. Совершенствование систем централизованного теплоснабжения крупных городов России // АВОК. 2004. №5. С. 42–49.
19. Звонарева Ю.Н. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 1-2. С. 31–40.
20. Орехов В.Н. Показатели качества теплоснабжения // Новости теплоснабжения. 2012. № 05 (141). С. 22–25.
21. Невский В.В. Стандартные автоматизированные блочные тепловые пункты Danfoss: пособие. М.: ООО «Данфосс», 2015. 50 с.
22. Состав и принцип работы ИТП: [сайт]. [М., 2021]. URL: <http://www.itp.plus/> (дата обращения 12.02.2021).
23. Волков Д.А. О системе теплоснабжения города Набережные Челны // Новости теплоснабжения. 2017. № 03 (199). С. 25–32.
24. Шилкин Н.В. Экономические аспекты внедрения индивидуальных тепловых пунктов // Энергосбережение. 2007. № 3. С. 34–38.
25. Канина Л.П., Чапкина Г.А. Опыт решения вопросов комплексной защиты оборудования систем теплоснабжения при переходных гидравлических режимах // Теплоэнергетика. 2008. № 4. С. 10–14.
26. Шарапов В. И., Ротов П.В. Технологии регулирования нагрузки систем теплоснабжения. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 160 с.
27. Пырклов В.В. Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование. К.: «Такісправи», 2008. 252 с.

28. Глухов С.В. Исследование степени эффективности автоматического регулирования в отопительных системах // Известия Транссиба. 2010. № 2. С. 64–70.
29. Звонарева Ю.Н. Влияние поэтапного внедрения АИТП на гидравлическую устойчивость и эффективность систем теплоснабжения: дис. канд. техн. наук. Казань, 2019. 172 с.
30. Башмаков И. А. Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России // Новости теплоснабжения. 2008. № 2. С. 67–74.
31. О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов [Электронный ресурс]: постановление Правительства Рос. Федерации от 06 мая 2011 г. № 354. Доступ из справ. - правовой системы «Гарант» (дата обращения: 25.03.2021).
32. Колесников А.Н. О переходе от открытых систем теплоснабжения и ГВС к закрытым (в трактовке 190-ФЗ) // Новости теплоснабжения. 2016. № 11 (171). С. 21–27.
33. Балберов А.А. Обоснование экономической эффективности энергосберегающих тепловых пунктов при строительстве зданий // Экономика и управление. 2011. № 5 (78). С. 191–195.
34. Схема теплоснабжения до 2028 года города Елабуга. СПб.: ООО «НэкстЭнерго», 2014. Т.1. 42 с.

Авторы публикации

Звонарева Юлия Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Римма Валентиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Турсунов Курбон Ибрагимович – заместитель министра жилищно-коммунального обслуживания Республики Узбекистан (МЖКО РУз).

Шорохов Игорь Романович – студент магистратуры, Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Scheme of heat supply for the municipality of Naberezhnye Chelny for 2021 for the period until 2035. Naberezhnye Chelny: LLC «EC Energoaudit» 2020:4:82 .
2. Zhukov V, Kamaletdinov I, Minakov A. 2014 Economic efficiency of mass introduction of individual thermal points in the city of Elabuga. *Energoverset*. 36:36-37.
3. ITP versus TTC. 2017 Why does Kazan change the hot water supply scheme: weekly «Arguments and Facts» 13 URL: https://kazan.aif.ru/society/details/itp_protiv_ctp_
4. Stennikov V. Provision of parametric reliability of heat supply systems. *Izvestiya of higher educational institutions. Energy problems*. 2017; 19 (3-4):20-30.
5. Gabrielaitiene I. Evaluation of approaches for modeling temperature wave propagation in district heating pipelines. *Heat transfer engineering*. 2008; 1:45–46.
6. Wernstedt F. An agent-based approach to monitoring and control of district heating systems. *Lecture notes in computer science*. 2017; 2358:801.
7. Zvonareva U, Vankov Y, Vera Y. The work of heat supply system in a phased implementation of automated individual heating stations. *News of higher educational institutions. Energy problem*. Publisher: Kazan state power engineering University (Kazan) 2017;19 (1-2):31-40.
8. Filimonov A. Features of the transition of Kazan to AITP in the implementation of a comprehensive program to improve the efficiency of the heat supply system. *Bulletin KSPEU*. 2019; 2 (42):127-137.
9. Morvaj B. Optimising urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation, and district heating network layout. *Energy*. 2016 ;116 (1):619–636.
10. Abdulaev D. Hydraulic stability of the heating network. *Construction of unique buildings and structures*. 2017; 1 (52):67–85.

11. Zvonareva Y, Vankov Y, Shlychov V. *Commercial effectiveness assessment of implementation the energy efficiency raising of the building project due to introduction of automatic heat consumption control*. SHS Web of Conferences 35, 01124 (2017). doi: 10.1051/shsconf/20173501124.
12. Zvonareva Y. Assessment of the economic effect for consumers during the installation of automated metering and control units for heat energy. *Engineering Bulletin of the Don*. 2015; 4:156-161.
13. Kuzborskaya K, Zvonareva Y. *Comparison of consumer connection schemes in an automated individual heating station*. Instrument-making and automated electric drive in fuel and energy and housing and communal services: materials of the 6 National scientific-practical. conf. Kazan. 2020; 2:324–327.
14. Zapolskaya I, Vankov Y. Improving the efficiency of hot water supply systems by installing automated ITP. *Bulletin KSPEU*. 2017; 4 (36):23–34.
15. Drigo M.F. Methodology of an assessment of economic efficiency investment decisions *Management in Russia and abroad*. 2008;1:18-24.
16. Rafalskaya T.A. Investigation of failures in operation of heat networks of large heat supply systems *Thermal Engineering*. 2017; 64 (4)313-7.
17. Sikerin I. 2010 The influence of the hydraulic mode of the heat supply network on the thermal stability of subscribers. *Actual problems of modern science, technology and education*. 2010; 2:20-22.
18. Livchak V. 2004 Improvement of district heating systems in large cities of Russia. *AVOK* 5 p. 42-49.
19. Zvonareva Y. 2017 The work of the heat supply system with the phased introduction of automated individual heating points. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems* 2017;1-2 : 31-40.
20. Orekhov V. 2012 Indicators of heat supply quality. *Heat supply news*. 2012;5 (141):22-25.
21. Nevsky V. 2015 Standard automated block heating points Danfoss: manual. M.: LLC "Danfoss" 50 p.
22. The composition and principle of operation of ITP: [website]. [M., 2021]. URL: <http://www.itp.plus/>
23. Volkov D. 2017 About the heat supply system of the city of Naberezhnye Chelny. *Heat supply news*. 2013;(199):25-32.
24. Shilkin N. 2007 Economic aspects of the introduction of individual heating points // *Energy saving* 3 p. 34-38.
25. Kanina L, Chapkina G. 2008 Experience in solving issues of complex protection of equipment of heat supply systems under transient hydraulic conditions // *Thermal power engineering* 4 p. 10-14.
26. Sharapov V, Rotov P. 2003 Technologies for regulating the load of heat supply systems. Ulyanovsk: UISTU 160 p.
27. Pyrkov V. 2008 Modern thermal points. Automation and regulation. K.: "Takispravi" 252 p.
28. Glukhov S. 2010 Investigation of the degree of efficiency of automatic regulation in heating systems // *Izvestiya Transsib* 2 p. 64-70.
29. Zvonareva Y. 2019 The impact of the phased introduction of AITP on the hydraulic stability and efficiency of heat supply systems: dis. Candidate of Technical Sciences. Kazan 172 p.
30. Bashmakov I. 2008 Analysis of the main trends in the development of heat supply systems in Russia // *Heat supply News* 2 p. 67-74.
31. On the provision of public services to owners and users of premises in apartment buildings and residential buildings [Electronic resource]: decree of the Government of the Russian Federation. Federation dated May 06, 2011 No. 354. Access from the help. - the legal system "Garant"
32. Kolesnikov A. 2016 On the transition from open heat supply and hot water supply systems to closed ones (in the interpretation of 190-FZ) // *Heat supply News* 11 (171) p. 21-27.
33. Balberov A. 2011 Justification of the economic efficiency of energy-saving thermal points in the construction of buildings // *Economics and management* 5 (78) p. 191-195.
34. The scheme of heat supply to the city of Yelabuga until 2028. SPb.: OOO "Nextenergo" 2014 1 42 p.

Authors of the publication

Julia N. Zvonareva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rimma V. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Kurbon I. Tursunov – Ministry of Housing and Communal Services of the Republic of Uzbekistan.

Igor R. Shorohov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **07.02.2022г.**

Отредактировано **10.03.2022г.**

Принято **10.03.2022г.**



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИТНОГО ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С МИКРОГРАНУЛАМИ

С.А. Соловьев, О.В. Соловьева, И.Г. Ахметова, Ю.В. Ваньков, Р.З. Шакурова

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
solovev.sa@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы, возникающие при создании композитного теплоизоляционного материала, включающего слой микросферических гранул. Провести численное моделирование композитного материала с различным объемным содержанием микросфер и различными вариантами образования пустот. Оценить влияние наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Определить влияние объемного содержания микросферических гранул на тепловой поток через композитный материал. *МЕТОДЫ.* Численное моделирование проводилось путем создания моделей элементарных кубических ячеек композита с упаковкой из 27 микросфер в программном комплексе ANSYS Fluent 19.2. Оценка изоляционных свойств проводилась путем измерения коэффициента теплопроводности. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье исследовано влияние наличия зон, не занятых микросферическими гранулами, на теплоизоляционные свойства композитного материала. Построены модели элементарных кубических ячеек с различным объемным содержанием микрогранул. Построены модели элементарных ячеек с различными вариантами образования пустот, такими как удаление вертикального или горизонтального ряда гранул и уплотнение гранул по вертикали или горизонтали. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Удаление микрогранул оказывает значительное влияние на изоляционные свойства композита. Наименьший коэффициент теплопроводности получен для простой кубической ячейки при объемном содержании микрогранул $\phi = 40$ %. Наличие пустот в материале способствует большим тепловым потерям, причем в случае вертикального сквозного канала тепловые потери больше, чем для горизонтального сквозного канала. В случае уплотнения сфер тепловые потери в зоне, не занятой микрогранулами, компенсируются уменьшением теплового потока в области с уплотнением сфер.

Ключевые слова: теплоизоляция; композитный материал; сферические микрогранулы; теплопроводность; численное моделирование.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2021-175/3 от 30.09.2021 г.

Для цитирования: Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 86-98. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF A COMPOSITE HEAT-INSULATING MATERIAL WITH MICROGRANULES

SA Solovev, OV Soloveva, IG Akhmetova, YV Vankov, RZ Shakurova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
solovev.sa@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems that arise when creating a composite heat-insulating material, including a layer of microspherical granules. Numerical modeling of a

composite material with different volume content of microspheres and different options for the formation of voids. Determination of the influence of the presence of zones not occupied by microgranules on the insulating properties of the composite material. Determination of the influence of the volume content of microspherical granules on the heat flux through the composite material. **METHODS.** Numerical simulation was carried out by creating models of elementary cubic cells of a composite with a package of 27 microspheres in the ANSYS Fluent 19.2 software package. The evaluation of the insulating properties was carried out by measuring the thermal conductivity coefficient. **RESULTS.** The article investigates the influence of the presence of zones not occupied by microspherical granules on the thermal insulation properties of a composite material. Models of elementary cubic cells with different volume content of microgranules are constructed. Models of elementary cells are built with various options for the formation of voids, such as the removal of a vertical or horizontal row of granules and the compaction of granules vertically or horizontally. **CONCLUSION.** The removal of microgranules has a significant effect on the insulating properties of the composite. The lowest thermal conductivity coefficient was obtained for a simple cubic cell with a volume content of microgranules $\varphi = 40\%$. The presence of voids in the material contributes to large heat losses, and in the case of a vertical through channel, the heat losses are greater than for a horizontal through channel. In the case of densification of spheres, heat losses in the zone not occupied by microgranules are compensated by a decrease in the heat flux in the area with densification of spheres.

Keywords: thermal insulation; composite material; spherical microgranules; thermal conductivity; numerical simulation.

Acknowledgments: This research was funded by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment № 075-03-2021-175/3 from 30.09.2021.

For citation: Solovev SA, Soloveva OV, Akhmetova IG, Vankov YV, Shakurova RZ. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 86-98. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-86-98.

Введение

Согласно федеральному закону Российской Федерации № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...», необходимо снижать потребление топливно-энергетических ресурсов и стремиться к рациональному использованию тепловой и электрической энергии. Одним из направлений в энергосбережении является снижение тепловых потерь зданий и сооружений, а также при производстве, транспортировке и потреблении тепловой энергии [1, 2]. Для этих целей применяются различные теплоизоляционные материалы: минеральная вата, стекловата, пенополиуретан, пенополистерол и т.д. Несмотря на широкую распространенность, данные материалы обладают рядом недостатков. Минеральная вата гигроскопична и теряет свои изоляционные свойства при контакте с влагой. Стекловолокно не выдерживает механических нагрузок. Пенополиуретан и пенополистерол являются пожароопасными веществами, выделяющими при горении токсичные вещества. По этой причине в настоящее время в энергетике уделяется внимание замене традиционных изоляционных материалов на более современные материалы, обладающие не только низкой теплопроводностью, но также высокой химической и коррозионной стойкостью, высокой удельной прочностью и легким весом. Ярким представителем класса современных теплоизоляционных материалов являются матричные композиты, армированные микрогранулами. В качестве матрицы применяются различные полимеры, в качестве микрогранул применяют шарики из пенополистерола, стеклянные микросферы, термопластичные микросферы или ценосферы.

В качестве наполнителя в синтаксических пенах и композитных теплоизоляционных материалах нередко применяют ценосферы – алюмосиликатные полые шарики, которые образуются в составе золы-уноса при высокотемпературном факельном сжигании угля. Ценосферы имеют диаметр в среднем 100 мкм, толщина стенки от 2 до 10 мкм, обладают низкой теплопроводностью и высокой температурой

плавления (1400-1500 °С), ввиду чего этот материал получил широкое распространение в качестве изоляционного материала в строительстве и промышленности. Кроме того, высокая температура плавления позволяет применять этот материал также для создания огнеупорных конструкций. Таким образом, ценосферы – естественный побочный продукт процесса горения угля на тепловых электростанциях, обладающий теми же свойствами, что и полые стеклянные сферы. Свойства ценосфер позволяют совмещать их с матричными полимерными материалами, полиэфирами или эпоксидными смолами, получая эффективный теплоизоляционный композит.

В статье [3] исследовали тепловые и механические свойства легкого бетона, содержащего ценосферы, экспериментально доказав, что включение ценосфер летучей золы приводит к значительному снижению теплопроводности бетона, а также препятствует распространению микротрещин благодаря прочной оболочке и малому размеру частиц. В следующей работе [4] разработали высокотемпературную пену из глинистой суспензии с добавлением ценосфер различных размеров (от 100 до 600 мкм), и исследовали её термические свойства методом нестационарного плоского источника. Как и в случае с бетоном, ценосферы показали отличные теплоизолирующие свойства.

Благодаря более высокой прочности на сжатие в сравнении с ценосферами наибольшее распространение получили полые стеклянные микросферы (*hollow glass microsphere* – HGM). Полые стеклянные микросферы благодаря своим уникальным свойствам: легкий вес, низкая теплопроводность, высокая прочность на сжатие и химическая инертность, нашли широкое применение в энергетике, строительстве, транспорте, пищевой и космической промышленности. Полые сферы широко применяются в качестве наполнителей в синтаксических пенах. Включение HGM в соответствующий матричный материал (эпоксидная смола, цемент, полипропилен и т.д.) позволяет получить легкий композит с относительно низким коэффициентом теплопроводности.

Для всестороннего понимания механизма теплопередачи в композитах с HGM необходимо проводить численные и экспериментальные исследования влияния их физических параметров на эффективную теплопроводность. Для моделирования теплопроводности синтаксических пен необходимо учесть их трехфазную структуру: матрица, оболочка полый частицы и газ внутри частицы. При этом теплопроводность синтаксической пены зависит от четырех параметров: тип матричного материала, тип материала стенки полый частицы, отношение толщины стенки к радиусу частицы и объемная доля частиц [5]. Кроме того, необходимо учитывать, что полые сферы могут иметь различное распределение по размеру и толщине стенки, даже частицы одного размера могут иметь разные толщины стенок [6], что также сказывается на их теплопроводящих свойствах. Большая часть теплового потока в синтаксической пене проходит в обход газового ядра внутри полый частицы. Это объясняется тем, что теплопроводность газовой области на два порядка ниже, чем у твердой стенки, и как следствие, пути теплопередачи становятся длиннее, время теплопередачи увеличивается, а эффективность теплопередачи значительно снижается.

Тепловые и механические свойства матричных композитов широко исследованы путем численного моделирования и экспериментальных исследований [7-10]. Изучалось влияние таких параметров как объемная доля частиц, размер частиц и их распределение на теплопроводность композита. В работе [8] авторы предложили многослойную изоляцию переменной плотности с HGM и сравнили её характеристики с существующими на данный момент теплоизоляционными материалами. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная многослойная изоляция переменной плотности, армированная полыми стеклянными микросферами, позволяет уменьшить количество слоев изоляции, а значит и её вес при одновременном снижении теплопроводности. В статье [11] авторы представили модель на основе элементарной ячейки, содержащей одну единственную частицу. Однако такой подход показывает большие расхождения с экспериментальными данными при высоких объемных долях частиц. В работе [12] авторы предложили модель для прогнозирования теплопроводности теплоизоляционных композитов с HGM, в которой микросфера заменяется на эквивалентный наполнитель с известной теплопроводностью, а теплопроводность композита определяется с использованием модели Эшелби. Результаты моделирования показали, что на теплопроводность композита значительно влияют теплопроводности оболочки микросферы и матрицы. В статье [13] авторы представили модель трехмерной кубической элементарной ячейки со случайным расположением HGM в матрице и провели численный анализ теплопроводности композитной ячейки. Распределение

теплового потока в композите оказалось неравномерным, при этом в *HGM* плотность теплового потока резко падает, что указывает на высокое термическое сопротивление полых стеклянных сфер [14]. Результаты экспериментов показали, что 20% массового содержания *HGM* в композите позволяет снизить теплопроводность композита на 47,4% по сравнению с чистой матрицей.

Влияние микроструктуры композита на его эффективную теплопроводность очень существенно. В работе [15] авторы провели численные исследования эффективной теплопроводности пены с полыми сферами методом конечных элементов. На основе упаковок ячеек в виде простого (*simple cubic* – *SC*), объемно-центрированного (*body-centered cubic* – *BCC*) и гранецентрированного (*face-centered cubic* – *FCC*) куба авторы создали 23 различных модели расположения и содержания (объемной долей) сфер. Расчеты показали, что теплопроводность практически не зависит от модели упаковки, но определяющим фактором является объемная доля сфер. С увеличением содержания стеклянных микросфер уменьшается теплопроводность композита.

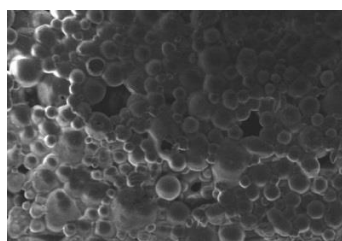
Авторы статьи [16] разработали теплоизоляционный материал из полиборосилоксана (BSiO_2) и полых стеклянных микросфер *HGM* с теплопроводностью 0,045 Вт/(мК) и плотностью 0,30 г/см³. Благодаря BSiO_2 в качестве термостойкого связующего, полые микросферы были хорошо склеены, а композит показал хорошую термическую стабильность и огнестойкость.

В статье [17] авторы оценили теплопроводность композита из бисмалеимидной смолы АРОВМІ с теплопроводностью 0,307 Вт/(мК) с добавлением полых углеродных сфер 4,6 Вт/(мК). Ввиду низкого межфазного связывания частицы и матрицы теплопроводность композита с содержанием 70 об.% углеродных сфер снизилась до 0,284 Вт/(мК). Таким образом, важным фактором, влияющим на теплопроводность композита, является межфазная связь частиц с матрицей

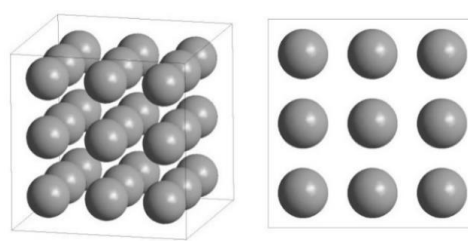
Одним из главных преимуществ композитов являются их настраиваемые свойства. Изменяя тип и состав матрицы и полых сфер, соотношение их объемных долей, можно создать композит с желаемыми механическими и тепловыми свойствами. В работе [18] авторы исследовали влияние плотности *HGM* на прочностные и термические свойства полиметилакрилатной синтаксической пены. Исследования показали, что добавление микросфер с самой высокой плотностью позволило получить композит с самой низкой плотностью без ухудшения его прочностных свойств. При этом на тепловые характеристики плотность *HGM* не оказала значительного влияния.

Материалы и методы

При создании изоляционного материала с применением слоя микросферических гранул могут образовываться дефекты. Например, при плохом перемешивании гранул в основном материале происходит формирование зоны с гранулами с разной плотностью упаковки. В самом неблагоприятном случае можно наблюдать небольшие объемы основного материала, где отсутствуют микросферические гранулы. На рисунке 1 (а) представлен снимок, полученный с помощью электронного микроскопа. Мы видим плотный слой микросферических гранул, а также несколько участков не занятых гранулами. Эти пустоты на рисунке имеют размеры от одного до трех диаметров микросферы.



(а)



(б)

Рис. 1. Упаковка микросфер в композитном материале: (а) – картина упаковки сферических гранул, полученная сканированием электронным микроскопом; (б) – модель расчетной области

Fig. 1. Packing of microspheres in a composite material: (a) – a picture of the packing of spherical granules obtained by scanning with an electron microscope; (b) – a model of the computational domain

Целью настоящего исследования является определение влияния наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Изоляционные свойства при наличии дополнительных пустот оцениваются посредством

расчета коэффициента теплопроводности.

В расчетах используется простая кубическая упаковка (SC). Данное приближение обосновано простотой модели для учета изменения параметров занимаемого объема тем или иным материалом при удалении или перераспределении микросферических гранул в исследуемой области.

На рисунке 1 (б) представлена расчетная область, состоящая из 27 сфер, по 3 сферы в направлении каждой координатной оси. Выбор трех рядов сфер позволяет исследовать несколько вариантов образования пустот в слое гранул. Также рассматриваются несколько вариантов объемного содержания сферы в единичной кубической ячейке, определяемого как

$$\varphi = \frac{V_{\text{сфера}}}{V_{\text{ячейка}}} \cdot 100\% = \frac{4\pi R^3}{3L^3} \cdot 100\% \quad (1)$$

где R – внешний радиус микросферы, L – размер стороны единичной кубической ячейки. В настоящем исследовании мы рассматривали варианты $\varphi=10\%$, 20% , 30% , 40% . Так как в исследовании используется микросферу с твердой стенкой, то введем параметр толщины стенки t . Тогда внутренний радиус области сферы, заполненный газом, будет $R-t$.

В настоящем исследовании для выбора геометрических размеров, параметров материалов и верификации модели мы будем опираться на данные исследований работ [5, 13]. В частности, выберем внешний диаметр микросферической гранулы $D = 2R = 58,64$ мкм, $t = 1,6$ мкм. Размер единичной кубической ячейки рассчитывается из уравнения (1).

Так как твердая стенка микросферической гранулы, как правило, имеет коэффициент теплопроводности выше, чем заключенный внутри газ, то оценим объемное содержание каждого компонента композитного материала в единичной кубической ячейке. Результаты расчетов представлены в таблице 1. С увеличением плотности упаковки также увеличивается объемное содержание твердой стенки гранул. Так для $\varphi = 40\%$ в единичной кубической ячейке материал стенки гранул занимает уже 6,2 % объема.

Таблица 1

Объемное содержание составляющих компонентов микросферической гранулы в единичной кубической ячейке

Объемное содержание сфер, %	Объемное содержание газа, %	Объемное содержание твердой стенки, %
10	8,45	1,55
20	16,90	3,10
30	25,35	4,65
40	33,80	6,20

Далее рассмотрим варианты образования пустот в построенной упаковке из 27 гранул. Первым вариантом рассмотрим удаление некоторых микросфер из построенной упаковки, например, целого горизонтального ряда (рис. 2 (а)). Затем рассмотрим вариант удаления целого вертикального ряда (рис. 2 (б)). Описание рассматриваемых случаев образования пустот приведено в Таблице 2.

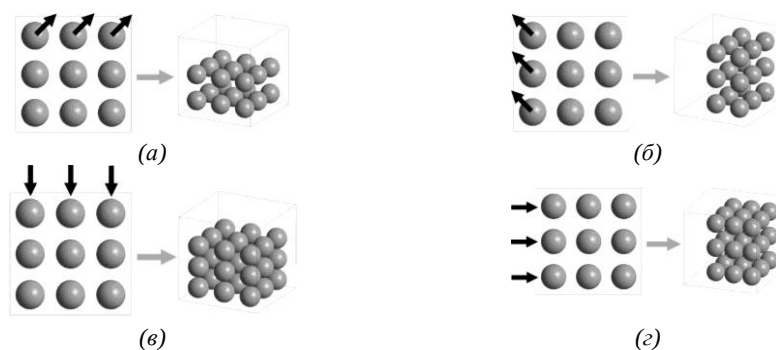


Рис. 2. Примеры геометрических моделей образования пустот для $\varphi = 20\%$: (а) – удаление горизонтального ряда; (б) – удаление вертикального ряда; (в) – уплотнение рядов по вертикали; (г) – уплотнение рядов по горизонтали.

Fig. 2. Examples of geometric models of the formation of voids for $\varphi = 20\%$: (a) - removal of a horizontal row; (b) - removal of a vertical row; (c) - compaction of rows vertically; (d) - compaction of rows horizontally.

Удаление сферических гранул из модели упаковки влечет к уменьшению объемного содержания газа в исследуемом объеме. Кроме подхода с удалением гранул также можно использовать подход с уплотнением существующих гранул в выделенном объеме. Для значений $\phi = 30\%$ и $\phi = 40\%$ дополнительное перемещение гранул внутри исследуемого объема не принесет существенного уплотнения или образования пустоты. Для значений $\phi = 10\%$ и $\phi = 20\%$ рассмотрим варианты с уплотнением в горизонтальном и в вертикальном направлении. Примеры представлены на рисунке 2 (в, г).

Таблица 2

Варианты моделей образования пустот в упаковке микросферических гранул

Случай	Описание
1	27 сфер, базовый случай
2	18 сфер, удаление горизонтального ряда
3	18 сфер, удаление вертикального ряда
4	27 сфер, уплотнение по горизонтали
5	27 сфер, уплотнение по вертикали
6	Пустой куб

Рассмотрим передачу тепловой энергии через композитный материал, состоящий из основного материала и микросферических гранул с газом и твердыми стенками. Примем незначительным влияние конвекции и радиации, согласно исследованиям [5, 19]. Тогда в качестве механизма передачи тепла мы имеем теплопроводность. Уравнение сохранения энергии запишем как [19]:

$$\nabla^2 T_i(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

где T_i – температура в i -ом материале в точке (x, y, z) . В нашем исследовании мы будем рассматривать 3 материала: основной материал, газ внутри микросферы, материал стенки микросферы.

Для оценки свойств теплопроводности композитного материала мы используем закон Фурье как [20]:

$$\vec{q}_i(x, y, z) = -k_i \nabla T_i(x, y, z) \quad (3)$$

где q_i – вектор теплового потока в i -ом материале в точке (x, y, z) . На границе i -го и j -го материалов выполняются условия неразрывности в виде

$$T_i(x, y, z) = T_j(x, y, z), \vec{q}_i(x, y, z) = \vec{q}_j(x, y, z) \quad (4)$$

Для оценки изменения теплоизоляционных свойств композитного материала рассмотрим средний коэффициент теплопроводности как [21, 22]

$$k_{eff} \approx \frac{\vec{q}_l}{\nabla T_l} = \frac{\vec{q}_l L}{T_1 - T_2} \quad (5)$$

где $\vec{q}_l$ – средний тепловой поток при прохождении расстояния L и изменении температуры от T_1 до T_2 .

Программное обеспечение ANSYS Fluent 19.2 использовано для решения описанных выше уравнений. Для реализации решения определим расчетную область и граничные условия (рис. 3 (а)). Пусть на нижней границе расчетной области задана температура T_1 , и на верхней границе задана температура T_2 ($T_1 > T_2$). На остальных внешних границах расчетной области заданы условия симметрии.

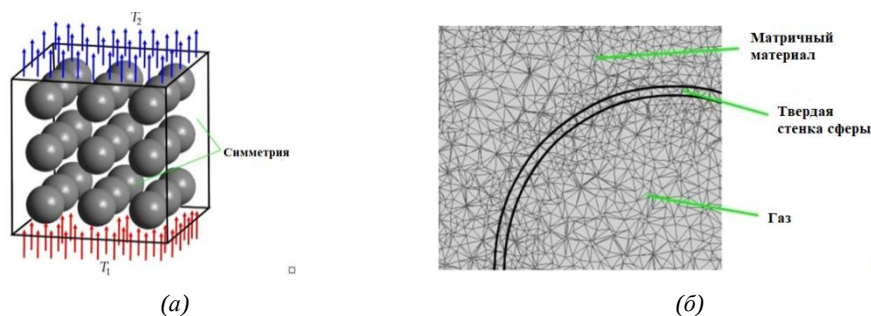


Рис.3. Расчетная область: (а) – граничные условия; (б) – сеточное разбиение.

Fig.3. Calculation area: (a) – boundary conditions; (b) - grid partitioning.

Все расчетная область заполнена построенной сеткой. Пример сеточного разбиения в окрестности границы микросферы представлен на рисунке 3 (б). В зоне твердой стенки гранулы в направлении нормали располагается от 2-3 ячейки, что приемлемо для задачи теплопроводности в твердом теле. Общее количество ячеек в области с 27 микросферами составляет в среднем 6,000,000 элементов.

Так как мы приняли геометрические размеры микросферических гранул и объемное содержание сфер в единичной кубической ячейке, опираясь на работы [5, 13], то физические свойства материалов выберем аналогичными значениями. Это позволит нам верифицировать наши модели. Итак, для расчетов выберем параметры коэффициентов теплопроводности материалов: основной материал матрицы – $k_c = 0,93$ Вт/м·К [5], газ внутри сфер – $k_g = 0,023$ Вт/м·К [23], твердая стенка микросферы – $k_w = 1,03$ Вт/м·К [24].

Температуру на нижней границе расчетной области выберем $T_1 = 30$ °C (303,15 K), температуру на верхней границе $T_2 = 10$ °C (283,15 K). При этом в нашем исследовании размер кубической расчетной области зависит от параметра φ . Так для $\varphi = 10\%$ длина $L = 305,49$ мкм, а для $\varphi = 40\%$ длина $L = 192,3$ мкм. Проведем расчет кубической области без микросфер и посмотрим изменение температуры по длине расчетной области материала. Изменение температуры в зависимости от пройденного расстояния вдоль материала имеет линейный характер.

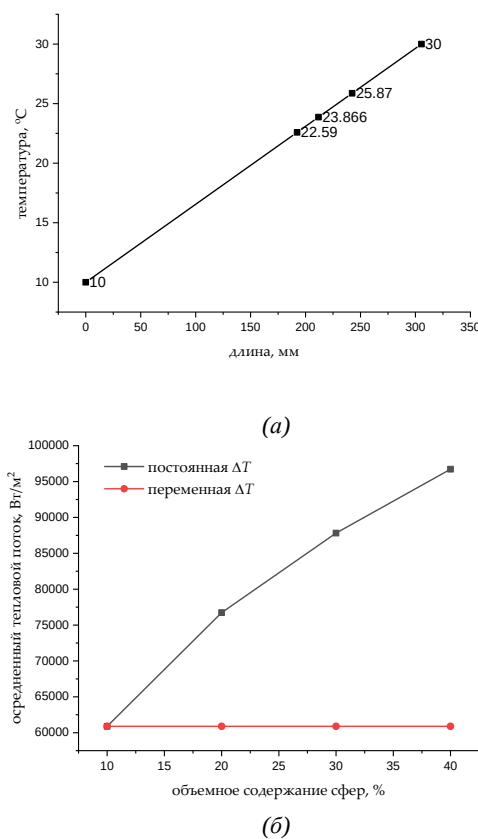


Рис.4. Зависимость параметров теплопередачи от температуры на границе расчетной области для расчетной области без микросфер: (а) – зависимость температуры от длины; (б) – зависимость теплового потока от разности температур.

Fig.4. Dependence of the heat transfer parameters on the temperature at the boundary of the computational domain for the computational domain without microspheres: (a) – the dependence of temperature on length; (b) - the dependence of the heat flux on the temperature difference.

На рисунке 4 (а) черной линией представлен график зависимости среднего теплового потока для всех вариантов φ . Очевидно, что для более короткой по размеру области мы имеем больший тепловой поток при фиксированном значении ΔT . Мы можем скорректировать температуру на одной из границ расчетной области в зависимости от значения φ . Это позволит допустить, что на единицу длины материал матрицы проходит одинаковый тепловой поток. Зафиксируем температуру $T_2 = 10$ °C. Тогда с учетом

линейной зависимости определим значения T_1 для размера области при каждом значении ϕ (рис. 4 (а)). На рисунке 4 (б) красной линией представлен график зависимости среднего теплового потока для всех вариантов ϕ при корректировке T_1 под размеры каждой расчетной области. В этом случае мы видим одинаковый тепловой поток. В нашем исследовании мы рассмотрим оба варианта задания ΔT (постоянный и изменяемый) для всех расчетов.

Результаты и обсуждение

Для всех построенных геометрических вариантов проведены расчеты согласно описанной выше вычислительной модели. Сначала рассмотрим расчеты для граничных условий с постоянным значением $\Delta T = 20$ °С. Отметим, что для случаев удаления ряда микрогранул мы рассматривали несколько вариаций. Для случая с удалением одного горизонтального ряда мы рассматривали три варианта: удаление нижнего ряда, среднего ряда и верхнего ряда. Рассчитанные величины среднего теплового потока и среднего коэффициента теплопроводности отличались незначительно. Поэтому для окончательных результатов выбраны осредненные значения по трем вариантам. Аналогичные результаты наблюдаются для случая удаления вертикального ряда. Результаты расчетов при удалении бокового ряда или центрального ряда показывают близкие значения среднего теплового потока и среднего коэффициента теплопроводности.

Рассмотрим значения среднего теплового потока. Результаты представлены на рисунке 5 (а). Очевидно, что наибольший тепловой поток будет для случая пустого куба (случай 6). Наличие 27 микросфер в исследуемом объеме существенно уменьшает тепловой поток через композитный материал. Максимальное уменьшение теплового потока по сравнению со случаем пустого куба наблюдается для $\phi = 40$ %, так как там наибольшая часть объема матрицы заменена микросферами, которые имеют меньший коэффициент теплопроводности.

Также мы видим, что с увеличением параметра ϕ тепловой поток не возрастает монотонно при наличии микросфер. Это связано с заданием граничных условий. Перепад температуры $\Delta T = T_1 - T_2$ постоянен, а размер куба L расчетной области меняется в зависимости от ϕ . Согласно формуле (5) тепловой поток будет меняться при изменении k_{eff} и L . Имеем зависимость $\phi \sim k_{eff} / L$. Для варианта $\phi = 10$ % размер куба очень большой, и этот параметр преобладает над значением коэффициента теплопроводности. При увеличении ϕ уменьшаются оба параметра k_{eff} и L . Когда k_{eff} начинает иметь больше значение по сравнению с L , мы наблюдаем уменьшение среднего теплового потока.

Далее оценим влияние неравномерности распределения микросфер в композитном слое изоляционного материала. При удалении гранул из слоя (случаи 2 и 3) мы, очевидно, наблюдаем увеличение среднего теплового потока. При этом более существенные отличия в изменении абсолютной величины теплового потока наблюдаются с увеличением ϕ . Интересны для сравнения результаты расчетов случаев 2 и 3, так как в обоих случаях удалены по 9 гранул. При удалении вертикального ряда мы видим большее увеличение теплового потока, чем при удалении горизонтального ряда. Такие результаты получены при всех исследуемых значениях ϕ . Таким образом, сквозной вертикальный канал без микросфер способствует большим тепловым потерям для изоляционного материала.

Результаты для случаев уплотнения микросфер при $\phi = 10$ % и 20 % также представлены на рисунке 5. Изменения в величине теплового потока незначительно отличаются от случая равномерного распределения гранул. При этом уплотнение по высоте слоя микросфер приводит к увеличению теплового потока, а уплотнение гранул по ширине приводит к небольшому уменьшению теплового потока. Таким образом, разрежение и увеличение теплового потока в одной зоне расчетной области компенсируется уплотнением и уменьшением теплового потока в другой зоне расчетной области.

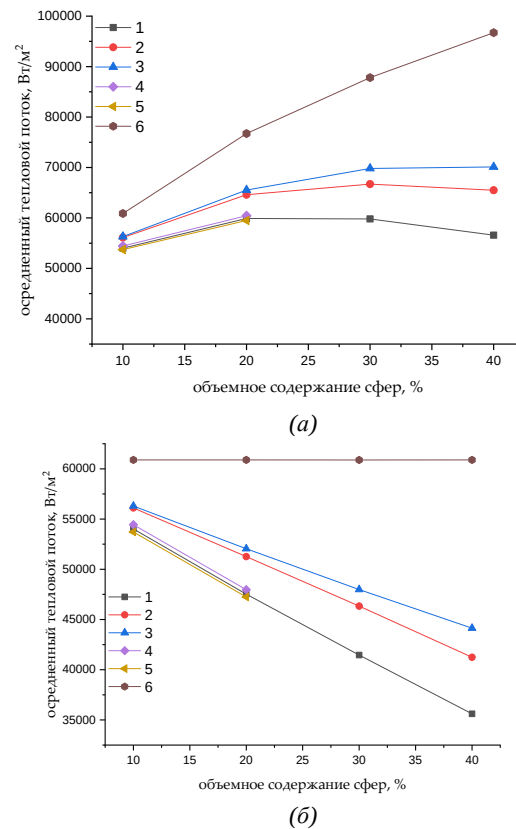


Рис. 5. Средний тепловой поток. Цифры соответствуют случаям из табл. 2: (а) – для постоянной $\Delta T = 20^\circ\text{C}$; (б) – для переменной ΔT .

Fig. 5. Average heat flow. The figures correspond to the cases from Table 2: (a) - for the constant $\Delta T = 20^\circ\text{C}$; (b) - for the variable ΔT .

Далее проведены расчеты с изменяемым значением $\Delta T = T_1 - T_2$ в зависимости от величины ϕ . В этом случае в формуле (5) $L/\Delta T = \text{const}$ и $\phi \sim k_{\text{eff}}$. Результаты расчета среднего теплового потока представлены на рисунке 5(б). В отличие от предыдущих расчетов, здесь мы видим постоянное значение для случая 6 кубической области без микросферических гранул. Для случаев с наличием микросфер мы наблюдаем монотонное уменьшение теплового потока с увеличением ϕ . При этом качественные изменения при изменении в распределении микросфер аналогичны изменениям для варианта постоянного ΔT .

Далее рассчитаем коэффициент теплопроводности композитного материала для всех исследуемых случаев. Как для варианта с постоянным ΔT , так и с переменным мы имеем одинаковые значения k_{eff} для соответствующих случаев и вариантов. Результаты представлены на рисунке 6 (а). Видно, что поведение графиков на рисунке 6 (а) повторяет поведение графиков на рисунке 5 (б). Как уже было описано выше, при переменной ΔT по формуле (5) $L/\Delta T = \text{const}$ и $\phi \sim k_{\text{eff}}$.

При отсутствии микросфер мы получаем коэффициент теплопроводности равный коэффициенту теплопроводности материала матрицы. При добавлении микросфер уменьшается коэффициент теплопроводности композитного материала. Аналогично графикам для теплового потока, уменьшение коэффициента теплопроводности соответствует увеличению количества гранул. Существенные различия наблюдаются для случаев 2 и 3 с одинаковым количеством микросфер. При значении начального объемного содержания микросфер $\phi = 40\%$ отличие между результатами при удалении горизонтального слоя или вертикального слоя составляет около 6 %.

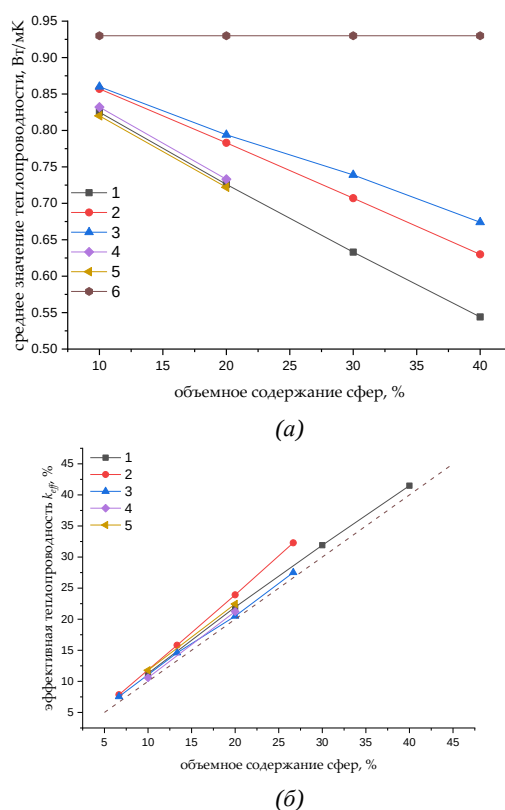


Рис. 6. Зависимость теплопроводности от объемного содержания сфер. Номера соответствуют случаям из табл. 2: (а) – среднее значение теплопроводности; (б) – эффективная теплопроводность.

Fig. 6. The dependence of thermal conductivity on the volume content of spheres. The numbers correspond to the cases from Table 2: (a) – the average value of thermal conductivity; (b) – effective thermal conductivity.

Далее проведем анализ зависимости изменения коэффициента теплопроводности для всех исследуемых случаев в зависимости от объемного содержания непосредственно расположенных микросфер в композитном материале. Например, для $ф = 30\%$ при удалении горизонтального или вертикального ряда фактическое объемное содержание микросфер в исследуемой области составит значение 20% . На рисунке 6 (б) представлены результаты расчетов. По горизонтальной оси отложены значения фактического объемного содержания гранул в матрице. Мы видим, что для многих вариантов изменение в коэффициенте теплопроводности примерно равно изменению в объемном содержании микросферических гранул в композитном материале. Больше всего отклоняется от прямолинейной зависимости от объемного содержания микросфер случай. Таким образом, именно удаление горизонтального ряда отклоняется от пропорциональной зависимости от объемного содержания микросфер.

Выводы

В настоящей работе мы исследовали влияние наличия зон, не занятых микрогранулами, на изоляционные свойства композитного материала. Определение изоляционных свойств мы определяли с помощью измерения коэффициента теплопроводности при наличии дополнительных пустот. Наличие микросфер или их частичное удаление в исследуемом объеме существенно уменьшает тепловой поток через композитный материал. При этом наибольшие отклонения с разным количеством микросфер наблюдаются при увеличении плотности гранул $ф$ в исследуемом объеме. Максимальное изменение теплового потока и коэффициента эффективной теплопроводности по сравнению со случаем пустого куба наблюдается для $ф = 40\%$, так как там наибольшая часть объема матрицы заменена микросферами, которые имеют меньший собственный коэффициент теплопроводности. Подробный анализ результатов показал нелинейность зависимости изменения параметров теплопроводности композитного материала от объемного содержания микросферических гранул для разных исследуемых случаев. Так удаление горизонтального ряда больше всех исследуемых случаев приводит к отклонению от пропорциональной зависимости от объемного содержания микросфер.

Литература

1. Гапоненко С. О., Файзлиев Р.А., Калинина М.В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения путем применения отражающего элемента // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 1(49). С. 204-217.
2. Гапоненко С. О., Файзлиев Р.А., Калинина М.В. Метод повышения эффективности тепловой изоляции трубопроводов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. № 2(50). С. 142-147.
3. Zhou H., Brooks A.L. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres // Construction and Building Materials. 2018. V. 198, pp. 512-526.
4. Brooks A.L., Shen A., Zhou H. Development of a high-temperature inorganic synthetic foam with recycled fly-ash cenospheres for thermal insulation brick manufacturing // Journal of Cleaner Production. 2020. V. 246, 118748.
5. Liu B., Wang H., Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder // Materials. 2018. Vol. 11, N5, 133.
6. Curd M.E., Morrison N.F., Smith M.J., et al. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic microspheres for syntactic foam applications // Composites Part B: Engineering. 2021. V. 223, 108952.
7. Petkova-Slipets R., Penka Z. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams // Civil and Environmental Engineering. 2019. V. 15, N1, pp. 36-41.
8. Wang P., Ji L., Yuan J., et al. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMs and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45, N11, pp. 7088-7097.
9. Yang H., Jiang Y., Liu H., et al. Mechanical, thermal and fire performance of an inorganic-organic insulation material composed of hollow glass microspheres and phenolic resin // Journal of Colloid and Interface Science. 2018. V. 530, pp. 163-170.
10. Shao Nn., Zhang Yb., Liu Z., et al. Fabrication of hollow microspheres filled fly ash based foam geopolymers with ultra-low thermal conductivity and relative high strength // Construction and Building Materials. 2018. V. 185, pp. 567-573.
11. Liang J.Z., Li F.H. Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method // Polymer Testing. 2007. Vo 26, N3, pp. 419-424.
12. Park Y.K., Kim J.G., Lee J.K. Prediction of thermal conductivity of composites with spherical microballoons // Materials Transactions. 2008. V. 49, pp. 2781-2785.
13. Wang H., Hou F., Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass microspheres // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265, 120739.
14. Xiao P., Yifeng Z., Peng W., et al. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled cement-based composites by variational asymptotic homogenization method // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 161, 114191.
15. Jia Z., Wang Z., Hwang D.J., et al. Prediction of the effective thermal conductivity of hollow sphere foams // ACS Applied Energy Materials. 2018. V. 1, N3, pp. 1146-1157.
16. Zhan Yl., Zang Cg., Jiao Qj., et al. Heat-insulating materials with high-temperature resistance through binding hollow glass microspheres with vinyl-functionalized polyborosiloxane // Journal of Materials Science. 2020. V. 55, pp. 14264-14279.
17. Shabde V.S., Hoo K.A., Gladysz G.M. Experimental determination of the thermal conductivity of three-phase syntactic foams // Journal of Materials Science. 2006. V. 41, N13, pp. 4061-4073.
18. Ozkutlu M., Dilek C., Bayram G. Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams // Composite Structures. 2018. V. 202, pp. 545-550.
19. Qin Q.H. Trefftz finite element method and its applications // Applied Mechanics Reviews. 2005. V. 58, pp. 316-337.
20. Wang H., Qin Q.H. Hybrid FEM with fundamental solutions as trial functions for heat conduction simulation // Acta Mechanica Solida Sinica. 2009. V. 22, pp. 487-498.
21. Wang H., Qin Q.H., Xiao Y. Special n-sided Voronoi fiber/matrix elements for clustering thermal effect in natural-hemp-fiber-filled cement composites // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. V. 92, pp. 228-235.
22. Wang H., Zhao X.J., Wang J.S. Interaction analysis of multiple coated fibers in cement composites by special n-sided interphase/fiber elements // Composites Science and Technology. 2015. V. 118, pp. 117-126.
23. Lienhard J.H., Lienhard, J.H. A Heat Transfer Textbook // Phlogiston Press: Cambridge. USA,

2005.

24. Kang Y., Morita K. Thermal conductivity of the CaO–Al₂O₃–SiO₂ system // ISIJ International. 2006. V. 46, pp. 420–426.

Авторы публикации

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика» (ИК), Казанский государственный энергетический университет.

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС), Казанский государственный энергетический университет.

Ахметова Ирина Гареевна – д-р. техн. наук, зав. кафедрой «Экономика и организация производства» (ЭОП), Казанский государственный энергетический университет.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р. техн. наук, зав. кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gaponenko SO, Fazliev RA, Kalinina MV. Method of increasing the efficiency of thermal insulation by applying a reflective element. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021; 13(1):204-217.
2. Gaponenko SO, Fazliev RA, Kalinina MV. Method of increasing the efficiency of thermal insulation of pipelines. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2021; 13(2):142-147.
3. Zhou H, Brooks AL. Thermal and mechanical properties of structural lightweight concrete containing lightweight aggregates and fly-ash cenospheres. *Construction and Building Materials*. 2018;198:512-526. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.074
4. Brooks AL, Shen A, Zhou H. Development of a high-temperature inorganic synthetic foam with recycled fly-ash cenospheres for thermal insulation brick manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 246:118748. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118748
5. Liu B, Wang H, Qin Q. H. Modelling and characterization of effective thermal conductivity of single hollow glass microsphere and its powder. *Materials*. 2018; 11(1):133. doi:10.3390/ma11010133
6. Curd ME, Morrison NF, Smith MJ, et al. Geometrical and mechanical characterisation of hollow thermoplastic microspheres for syntactic foam applications. *Composites Part B: Engineering*. 2021; 223:108952. doi:10.1016/j.compositesb.2021.108952
7. Petkova-Slipets R, Penka Z. An analysis of the structure and thermal conductivity of hollow microsphere filled syntactic foams. *Civil and Environmental Engineering*. 2019; 15(1):36-41. doi:10.2478/cee-2019-0006
8. Wang P, Ji L, Yuan J, et al. Modeling and optimization of composite thermal insulation system with HGMs and VDMLI for liquid hydrogen on orbit storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(11):7088-7097. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.110
9. Yang H, Jiang Y, Liu H, et al. Mechanical, thermal and fire performance of an inorganic-organic insulation material composed of hollow glass microspheres and phenolic resin. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018; 530:163-170. doi:10.1016/j.jcis.2018.06.075
10. Shao Nn, Zhang Yb, Liu Z, et al. Fabrication of hollow microspheres filled fly ash based foam geopolymers with ultra-low thermal conductivity and relative high strength. *Construction and Building Materials*. 2018;185:567-573. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.07.077
11. Liang JZ, Li FH. Simulation of heat transfer in hollow-glass-bead-filled polypropylene composites by finite element method. *Polymer Testing*. 2007; 26(3):419-424. doi:10.1016/j.polymertesting.2006.12.014
12. Park YK, Kim JG, Lee JK. Prediction of thermal conductivity of composites with spherical microballoons. *Materials Transactions*. 2008; 49:2781-2785. doi:10.2320/matertrans.MRA2008139
13. Wang H, Hou F, Chang C. Experimental and computational modeling of thermal conductivity of cementitious syntactic foams filled with hollow glass microspheres. *Construction and Building Materials*. 2020; 265:120739. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120739
14. Xiao P, Yifeng Z, Peng W, et al. Estimation of thermal conduction in hollow-glass-beads-filled

cement-based composites by variational asymptotic homogenization method. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 161:114191. doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.114191

15. Jia Z, Wang Z, Hwang DJ, et al. Prediction of the effective thermal conductivity of hollow sphere foams. *ACS Applied Energy Materials*. 2018; 1(3):1146-1157. doi:10.1021/acsaem.7b00264

16. Zhan Yl, Zang Cg, Jiao Qj, et al. Heat-insulating materials with high-temperature resistance through binding hollow glass microspheres with vinyl-functionalized polyborosiloxane. *Journal of Materials Science*. 2020; 55:14264-14279. doi:10.1007/s10853-020-05046-y

17. Shabde VS, Hoo KA, Gladysz GM. Experimental determination of the thermal conductivity of three-phase syntactic foams. *Journal of Materials Science*. 2006; 41(13):4061-4073. doi:10.1007/s10853-006-7637-x

18. Ozkutlu M, Dilek C, Bayram G. Effects of hollow glass microsphere density and surface modification on the mechanical and thermal properties of poly(methyl methacrylate) syntactic foams. *Composite Structures*. 2018;202:545-550. doi:10.1016/j.compstruct.2018.02.088

19. Qin QH. Trefftz finite element method and its applications. *Applied Mechanics Reviews*. 2005; 58:316-337. doi:10.1115/1.1995716

20. Wang H, Qin QH. Hybrid FEM with fundamental solutions as trial functions for heat conduction simulation. *Acta Mechanica Sinica*. 2009; 22:487-498. doi:10.1016/S0894-9166(09)60300-1

21. Wang H, Qin QH, Xiao Y. Special n-sided Voronoi fiber/matrix elements for clustering thermal effect in natural-hemp-fiber-filled cement composites. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 92:228-235. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.093

22. Wang H, Zhao XJ., Wang JS. Interaction analysis of multiple coated fibers in cement composites by special n-sided interphase/fiber elements. *Composites Science and Technology*. 2015; 118:117-126. doi:10.1016/j.compscitech.2015.08.022

23. Lienhard JH, Lienhard JH. A Heat Transfer Textbook. *Phlogiston Press: Cambridge*. USA, 2005.

24. Kang Y, Morita K. Thermal conductivity of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *ISIJ International*. 2006; 46:420-426. doi:10.2355/isijinternational.46.420

Authors of the publication

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 18.03.2022г.

Отредактировано 25.03.2022г.

Принято 25.03.2022г.



АНАЛИЗ РАБОТЫ ДЕАЭРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ КОТЕЛЬНОЙ

О.В. Пазушкина, М.В. Золин, И.А. Силкин

Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия
zolinm6@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы защиты оборудования тепловых электростанций и систем теплоснабжения от внутренней коррозии. Изучить этапы развития отечественных деаэрационных аппаратов и принципов осуществления атмосферной и вакуумной деаэрации в рамках котельной г. Ульяновска. Провести анализ работы и обслуживания деаэраторов: ДСА-75, АВАКС и ДВ-75 в котельной г. Ульяновск. Рассмотреть систему водоподготовки, реализованную в котельной ОАО «Ульяновский патронный завод», а затем в УМУП «Городская теплосеть». *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялся аналитический метод оценки работы атмосферного деаэратора ДСА-75 и вакуумного деаэратора ДВ-75. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Приведены основные технические характеристики атмосферного деаэратора ДСА-75 и вакуумного деаэратора ДВ-75, а также были получены графические зависимости, характеризующие работу вышеприведенных деаэраторов. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Анализ работы деаэратора «АВАКС» показал, что данный аппарат так и не смог занять достойное место не то чтобы основного, но и даже дополнительного деаэрационного устройства в рассматриваемой в данной статье котельной г. Ульяновск, а также встать в один ряд с давно зарекомендовавшими себя деаэраторами, разработанными в ЦКТИ. Авторами установлено, что в настоящее время на рассматриваемой котельной УМУП «Городская теплосеть» система водоподготовки с использованием традиционного вакуумного деаэратора ДВ-75 хорошо отлажена и вполне выполняет свои функции, обеспечивая при этом качественную обработку воды.

Ключевые слова: *тепловая электростанция; котельная; атмосферная деаэрация; вакуумная деаэрация; деаэратор.*

Для цитирования: Пазушкина О.В., Золин М.В., Силкин И.А. Анализ работы деаэрационных устройств на производственной котельной. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С.99-113. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-99-113.

ANALYSIS OF THE OPERATION OF DEAERING DEVICES AT THE INDUSTRIAL BOILER HOUSE

OV. Pazushkina, MV. Zolin, IA. Silkin

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia
zolinm6@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems of protecting equipment of thermal power plants and heat supply systems from internal corrosion. To study the stages of development of domestic deaeration devices and the principles of atmospheric and vacuum deaeration in the framework of the boiler house in Ulyanovsk. To analyze the operation and maintenance of deaerators: DSA-75, AWACS and DV-75 in the boiler house of JSC «Ulyanovsk Cartridge Plant», and in the UMUP «City Heating System». *METHODS.* When solving this problem, we used an analytical method for evaluating the operation of the DSA-75 atmospheric deaerator and the DV-75 vacuum deaerator. *RESULTS.* The article presents the main technical characteristics of the atmospheric deaerator DSA-75 and the vacuum deaerator DV-75, and graphical dependencies characterizing the operation of the above deaerators were obtained. *CONCLUSION.* An analysis of the work of the «AWACS» deaerator showed that this device was never able to take its rightful place as the main and additional deaeration device in the boiler

house in Ulyanovsk. Accordingly, the «AWACS» deaerator could not stand on a par with the long-established deaerators developed at CKTI. The authors found that at the present time, at the UMUP «City Heating System» boiler house considered in this article, the water treatment system using the traditional DV-75 vacuum deaerator is well debugged and performs its functions. Thus, high-quality water treatment is ensured in the boiler house.

Keywords: thermal power plant; boiler house; atmospheric deaeration; vacuum deaeration; deaerator.

For citation: Pazushkina OV, Zolin MV, Silkin IA. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(1): 99-113. doi:10.30724/1998-9903-2021-24-1-99-113.

Введение

Водоподготовка является одним из ключевых и крайне необходимых этапов, как в цикле работы небольших промышленных котельных, так и на тепловых электростанциях. Основными этапами подготовки воды являются предочистка, обессоливание и деаэрация. Термическая деаэрация является наиболее энергоемким процессом, и, должно быть, еще продолжительное время останется одним из основных средств обеспечения надежности систем теплоснабжения и их теплоисточников. Для осуществления данного процесса в теплоэнергетических установках применяются термические деаэраторы, которые прошли достаточно долгий путь освоения и модернизируются до сих пор с целью достижения наиболее качественных показателей деаэрированной воды.

До второй половины XX века на тепловых электростанциях передовые позиции занимали струйные деаэраторы атмосферного типа, представляющие собой аппараты, в которых вода благодаря системе дырчатых тарелок разделялась на струи, стекающие каскадами сверху вниз. Далее перфорированные тарелки задерживали пребывание воды в деаэраторе, а навстречу струям воды двигался пар. Характер обтекания паром струй приближался к поперечному, а расположение нескольких тарелок по высоте колонки увеличивало общее время пребывания воды в ней. Таким образом, осуществлялся процесс удаления из воды коррозионно-агрессивных газов. Но, со временем, требования к качеству деаэрированной воды повышались, что, в свою очередь побуждало теплоэнергетиков принимать меры по модернизации конструкций деаэрационных аппаратов и улучшению самого процесса деаэрации.

Огромным шагом в развитии конструкций деаэраторов было создание Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ) струйно-барботажных деаэраторов для деаэрации подпиточной воды теплосети и деаэрации добавочной питательной воды на тепловых электростанциях. Если рассматривать деаэраторы вакуумного типа, то на крупных теплоисточниках – ТЭЦ и котельных большой тепловой мощности – для подпитки тепловой сети обычно используют струйно-барботажные вакуумные деаэраторы горизонтального типа производительностью 400 и 800 м³/ч конструкции ЦКТИ. На котельных меньшей мощности часто используются струйно-барботажные вакуумные деаэраторы вертикального типа производительностью от 5 до 300 м³/ч [1]. Данные аппараты выпускаются серийно и достаточно хорошо освоены в эксплуатации. В теплоэнергетических установках, работающих на закрытые системы теплоснабжения с малыми расходами подпиточной воды, при наличии источников пара применяются также серийно выпускаемые атмосферные деаэраторы с барботажным листом, установленным в нижней части струйной деаэрационной колонки. Помимо конструкций деаэраторов, ежегодно ученые теплоэнергетики предлагают новые решения для улучшения систем водоподготовки. В частности, в работах [2, 3] доказано, что управление термическими деаэраторами по нескольким регулирующим и регулируемым параметрам позволяет повысить надежность и экономичность работы тепловой электрической станции за счет обеспечения заданной концентрации удаляемого газа (O₂ или CO₂) в деаэрированной воде при оптимальном режиме работы турбоустановки с максимальной выработкой электроэнергии на тепловом потреблении. В источнике [4] предложены технологии снижения расхода выпара деаэраторов избыточного давления, позволяющие сократить энергетические затраты на процесс термической деаэрации. В работах [5-7] предложены различные схемы включения термических деаэраторов, направленные на достижение наибольшей выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Также, можно отметить, что в материалах [8-11] предложены и описаны

весьма незаурядные технологии низкотемпературной деаэрации воды на ТЭЦ, где в качестве десорбирующего агента используется природный газ вместо пара или перегретой воды, что, по заявлению авторов, позволяет увеличить экономичность работы станции.

В зарубежных источниках вопросам дегазации воды уделяется очень мало внимания [12]. Компания [13] предлагает варианты вакуумной, каталитической и мембранной дегазации. Вакуумные дегазаторы небольшой производительности производит и компания [14]. Сравнение различных типов деаэрации (атмосферной, химической, мембранной, вакуумной) применительно к одной из ТЭЦ Литвы приведено в [15], причем автором установлено, что полностью автоматизированные системы вакуумной деаэрации служат хорошей альтернативой в случае отказа от пара на теплоисточниках.

Данная статья посвящена описанию работы деаэрационных устройств на одной из производственных котельных г. Ульяновска. Актуальность представленной статьи обусловлена необходимостью обеспечения нормативного качества подпиточной воды теплосети для городской системы теплоснабжения.

Анализ работы деаэрационной техники на производственной котельной

В настоящей статье выполнен анализ работы деаэрационных устройств и техники на примере котельной ОАО «Ульяновский патронный завод» (УПЗ), который находится в г. Ульяновск.

В 1916 году Ульяновский патронный завод (УПЗ) был введен в эксплуатацию и, соответственно, в то же время была введена в эксплуатацию котельная при заводе. Данная котельная была в ведомстве УПЗ и обслуживалась силами заводчан вплоть до 2017 года. 1 сентября 2017 году котельная УПЗ была передана в УМУП «Городская теплосеть», которая в настоящее время и обслуживает данную котельную.

Говоря об истории развития технологий водоподготовки, отметим, что во второй половине XX - первом десятилетии XXI века, как и в большинстве крупных предприятий России, в котельной УПЗ основным способом удаления из воды кислорода и диоксида углерода была атмосферная деаэрация, реализованная с помощью деаэратора атмосферного типа ДСА-75. Деаэратор ДСА, корпус которого изготавливают из высококачественной углеродной стали, а внутреннее оборудование из нержавеющей стали, является видоизмененным деаэратором типа ДА, который также состоит из деаэрационной колонки и бака-аккумулятора, но отличается тем, что баки-аккумуляторы модели ДСА имеют большую емкость, чем баки-аккумуляторы модели ДА. Принцип работы деаэратора ДСА следующий. Вода, поступающая через верхнее отверстие деаэрационной колонки, попадает на перфорированные тарелки, затем просачивается через мелкие отверстия и попадает на следующий ряд точно таких же тарелок, которых в деаэрационной колонке может быть установлено до 5 рядов. После этого, вода попадает на барботажный лист, откуда по выводной трубе устремляется в бак-аккумулятор. Из бака-аккумулятора навстречу воде устремляется поток пара, который нагревает исходную воду до состояния кипения. На этой фазе из воды выделяются молекулы коррозионно-агрессивных газов и устремляются по патрубку в охладитель выпара. Охладитель выпара представляет собой теплообменник трубчатого типа, внутри которого содержится система трубок. Корпус охладителя изготовлен из нержавеющей стали, а система трубок – из высококачественной или коррозионно-стойкой стали. В данном аппарате происходит конденсация выпара, где в качестве охлаждающей среды выступает очищенная вода либо конденсат. Далее, соответственно, выпар охлаждается и поступает в дренажный бак, а выделившиеся газы улетучиваются в атмосферу. Окончательная дегазация воды происходит в баке-аккумуляторе, где мелкие газовые пузырьки улетучиваются из жидкости [16].

Также отметим, что атмосферная деаэрация должна происходить при температуре 104-106°C и при правильной эксплуатации и своевременном обслуживании атмосферных деаэрационных аппаратов, подготовленная вода на выходе из бака-аккумулятора должна соответствовать таким критериям, как:

- нормативное содержание кислорода должно быть не более 50 мкг/дм³;
- углекислоты в деаэрированной воде быть вовсе не должно.

Но в случае с котельной УПЗ г. Ульяновска показатели качества деаэрированной воды на выходе из деаэратора ДСА-75 были далеки от нормы. Как показывает проведенный авторами анализ, это обусловлено следующими причинами:

1. Процесс деаэрации происходил при температуре 80 °C.
2. В деаэрационной колонке все перфорированные тарелки были забиты

ржавчиной.

3. Барботажная линия внутри деаэратора была оторвана.

4. Отсутствовал регулятор подачи пара в деаэратор. В данном случае дежурный в котельной собственноручно регулировал подачу пара, меняя положение заслонки в зависимости от показаний датчиков давления и температуры.

5. Из бака-аккумулятора по трубопроводу отвода деаэрированной воды часть воды подавалась на питание паровых котлов, а оставшаяся часть спускалась в установленный на улице (под открытым небом) бассейн. Далее из бассейна с помощью насосов осуществлялась подача воды на подпитку теплосети.

В итоге, можно сказать, что большого смысла в достижении идеальных условий процесса деаэрации воды не было, так как даже если бы деаэрированная вода на выходе из бака-аккумулятора была нормативного качества, то в открытом бассейне она вновь насыщалась кислородом. Следовательно, при данной схеме работы, деаэратор ДСА-75 в котельной УПЗ выступал в качестве обычного теплообменника, где банально осуществлялся подогрев химически-очищенной воды до температуры 80 °С.

Однако с течением времени развивалась не только деаэрационная техника, но и различные рекламные компании, которые, естественно, больше усилий прикладывали к раскручиванию самой рекламы, нежели к модернизации техники. Соответственно, это послужило поводом тому, что периодически начали появляться новые устройства, а специалисты промышленных предприятий, упустив из виду факторы, от которых зависит качество деаэрации, нередко устанавливали подобное оборудование на тепловые электростанции, ТЭЦ и котельные. Примеры с эксплуатацией данной техники описаны в работах [17-19] д.т.н., профессора В.И. Шарапова.

Попытка применения деаэратора «АВАКС» в котельной УПЗ

В 2010 году, с целью разделения нагрузки деаэратора ДСА-75 и повышения качества деаэрированной воды, на котельной УПЗ был установлен деаэратор фирмы «АВАКС». Аджиевский вакуумно-атмосферный кавитационно-струйный (АВАКС) деаэратор, конструктивная схема которого приведена на рисунке 1 [18], разработан и изготавливается на ОАО «Кинешемский машиностроительный завод». По заявленным характеристикам, «АВАКС» способен осуществлять процесс деаэрации при температуре от 60 °С без использования пара и имеет следующие характеристики:

- Номинальная производительность: 10 – 30 т/ч;
- Давление воды на входе в деаэратор: $> 0,3 \text{ МПа}$ ($> 3 \text{ кг/см}^2$);
- Минимальная температура воды на входе в деаэратор: 60 °С;
- Давление воды на выходе из деаэратора: 0,01 – 0,02 МПа;
- Содержание растворенного O_2 в деаэрированной воде: $< 20 \text{ мкг/дм}^3$;
- Свободная углекислота в деаэрированной воде отсутствует;
- Давление гидротестирования деаэратора — 1 МПа (10 кг/см^2);
- «Сухая» масса — не более 40 кг.

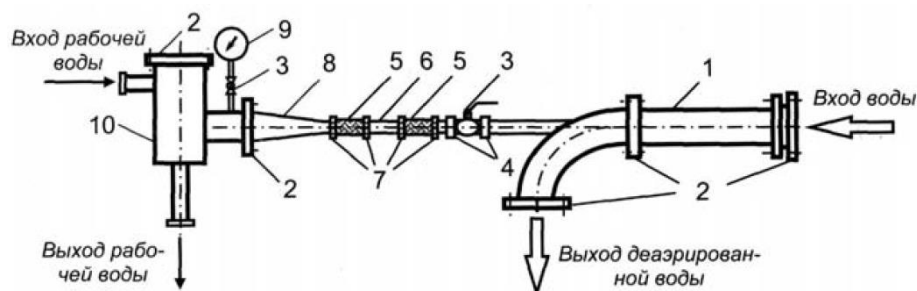


Рис. 1. Конструктивная схема деаэратора «АВАКС»: 1 – деаэратор; 2 – фланцы; 3 – кран; 4 – резьбовые соединения; 5 – резиновый шланг; 6 – стеклянная трубка; 7 – хомуты; 8 – диффузор; 9 – вакуумметр; 10 – водоструйный эжектор

Fig. 1. Design scheme of the «AWACS» deaerator: 1 - deaerator; 2 - flanges; 3 - tap water; 4 - threaded connections; 5 - rubber hose; 6 - glass tube; 7 - clamps; 8 - diffuser; 9 - vacuum gauge; 10 - water-jet ejector

Конструкция данного аппарата позволяет реализовать центробежный эффект закрученного потока воды в горизонтальной трубе. Схема подключения деаэратора «АВАКС» приведена на рисунке 2 [17].

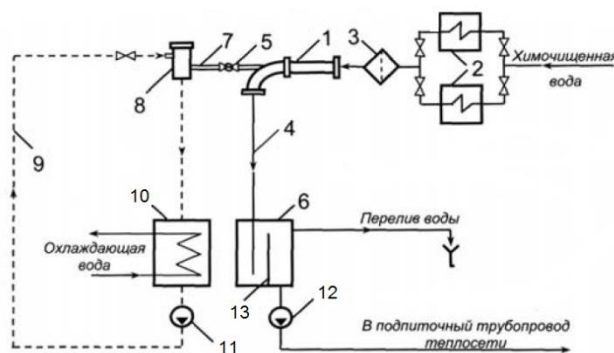


Рис. 2. Схема подключения деаэратора «АВАКС»: 1 – деаэратор; 2 – пароводяной подогреватель; 3 – сетчатый фильтр; 4 – трубопровод деаэрированной воды; 5 – кран; 6 – бак-аккумулятор; 7 – трубопровод водопаровоздушной смеси; 8 – водоструйный эжектор; 9 – трубопровод рабочей воды эжектора; 10 – бак рабочей воды эжектора; 11 – насос рабочей воды эжектора; 12 – подпиточный насос; 13 – перегородка в баке

Fig. 2 – Scheme for connecting the «AWACS» deaerator: 1 – deaerator; 2 – steam-water heater; 3 – mesh filter; 4 – deaerated water pipeline; 5 – tap water; 6 – storage tank; 7 – pipeline of the water-steam-air mixture; 8 – water-jet ejector; 9 – pipeline of working water of the ejector; 10 – ejector working water tank; 11 – pump for working water of the ejector; 12 – make-up pump; 13 – partition in the tank

Принцип работы данной деаэрационной установки заключается в следующем, после химводоочистки на деаэрацию поступает исходная химически-очищенная вода с температурой 30 °С, которая по пути в деаэратор 1 подогревается до температуры 60 °С в пароводяных подогревателях 2 и проходит через сетчатый фильтр 3. Для осуществления процесса деаэрации в деаэраторе 1, давление на входе должно быть 3,5 кгс/см². Соответственно, для поддержания давления 3,5 кгс/см², устанавливается насос подачи исходной воды. Поток исходной воды, поступающий под давлением в деаэратор 1, раскручивается завихрителем до определенных скоростей. Затем раскрученный поток за счет центробежных сил прижимается к стенкам корпуса, образуя вакуумную полость, в которой происходит испарения воды и выделение растворенного газа. Парогазовая смесь (выпар) удаляется из деаэратора 1 с помощью водоструйного эжектора 8 через газоотводящую трубку. В данном случае работа водоструйного эжектора 8 осуществляется по замкнутой схеме. С помощью насоса 11 рабочей воды эжектора рабочая вода забирается из бака 10 рабочей воды эжектора и по трубопроводу 9 рабочей воды эжектора подается в водоструйный эжектор 8, тем самым отсасывая паровоздушную смесь через трубопровод 7 водопаровоздушной смеси и создавая вакуум в деаэраторе 1. Затем рабочая вода вновь сливается в бак 10 рабочей воды эжектора. После деаэрации вода проходит обтекатель и по трубопроводу 4 деаэрированной воды поступает в бак-аккумулятор 6, откуда с помощью подпиточного насоса 12 поступает в теплотель.

Отметим, что сама идея разработки деаэратора «АВАКС» весьма интересна, а также требует немало теоретических и экспериментальных исследований для проработки всех деталей подобного проекта. В работах [17-19] изложены результаты испытаний данного аппарата, которые показали, что:

- Эксплуатация данного деаэратора возможна только в режиме многократной рециркуляции, причем для удаления кислорода до нормативного уровня 50 мкг/дм³ требуется от 8 до 388 «прогонов» воды через деаэратор;

- Содержание CO₂ в деаэрированной воде на выходе из деаэратора «АВАКС» соответствует содержанию CO₂ в сырой недеаэрированной воде;

- «АВАКС» недостаточно устойчив к изменениям температурного и гидравлического режима, так как при малейших изменениях этих режимов структуру водопаровоздушной смеси, отводимой из деаэратора необходимо регулировать (рис. 1). Анализ эксплуатации показал, что структура смеси, отводимой из деаэратора, может быть паровоздушной, водопаровоздушной или вовсе водяной.

В работах [20-22] сделан акцент на то, что одной из причин малой эффективности по удалению коррозионно-активных газов деаэраторов «АВАКС» является то, что деаэратор «АВАКС» одноступенчатый, прямоточный и характеризуется малым

располагаемым временем процесса деаэрации. Далее, на основании результатов натурных испытаний деаэраторов «АВАКС» доказано, что использовании таких аппаратов в качестве основного деаэрационного устройства в технологических схемах энергообъектов возможно только при включении деаэратора по схеме с рециркуляцией при подаче добавочной воды на всасе насоса рециркуляции.

После перехода котельной УПЗ в ведение УМУП «Городская теплосеть» было выявлено, что мгновенная подпитка теплосети на момент установки деаэратора «АВАКС» (2010 г.) и до 2017 г. составляла 30-40 т/ч. Пропускная способность деаэратора «АВАКС» была 9-12 т/ч. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что деаэратор «АВАКС» не смог занять место ни основного, ни дополнительного деаэрационного устройства в котельной УПЗ г. Ульяновск.

Модернизация и переоборудование атмосферного деаэратора

1 сентября 2017 года ОАО «Ульяновский патронный завод» (УПЗ) г. Ульяновск передали свою котельную в ведение УМУП «Городская теплосеть». Причиной этому стало два фактора:

- отсутствие своевременного и периодического обслуживания котельной УПЗ;
- низкое качество деаэрированной воды в сетях, относящихся к котельной УПЗ.

Далее, УМУП «Городская теплосеть» были предприняты меры по восстановлению системы водоподготовки, а именно наладки процесса деаэрации в атмосферном деаэраторе ДСА-75. Предприятие выполнило следующие работы:

1. Была вскрыта деаэрационная колонка деаэратора и выведена в ремонт, в ходе которого перфорированные тарелки были очищены от следов коррозии.
2. Был установлен охладитель выпара на деаэраторе.
3. Внутри деаэрационной колонки была восстановлена барботажная линия.
4. В баках-аккумуляторах были установлены датчики уровня (нижний, средний, верхний).
5. На входе в деаэратор в трубопровод отвода деаэрированной воды был установлен регулятор подпитки, который в зависимости от показаний датчиков уровня в баках-аккумуляторах в автоматическом режиме должен открываться на определенный уровень, пропуская через себя деаэрированную воду.

6. На входе в деаэратор в трубопровод подвода исходной воды был установлен регулятор подачи пара, что, собственно, избавляло от потребности в дежурном персонале, который бы осуществлял регулирование задвижки.

Таким образом, была проведена полная автоматизация и восстановление до рабочего состояния атмосферной деаэрационной установки ДСА-75.

Так как большинству промышленных предприятий для технологических нужд необходим пар, то после передачи котельной в ведение УМУП «Городская теплосеть» подача пара на нужды УПЗ осуществлялась от котельной УМУП «Городская теплосеть». Отметим, что в котельной, принятой от УПЗ, имеется 4 водогрейных котла КВГМ-50, которые работают только в зимний период года. В летний период водогрейные котлы КВГМ-50 были отключены по причинам:

- их достаточно большой теплопроизводительности – 50 Гкал/ч;
- расход воды через котлы КВГМ-50, который должен быть не менее 550 м³, летом значительно сокращается и составляет около 290 м³, что, в принципе, недостаточно для того, эксплуатировать данные котлы.

Переоборудование атмосферного деаэратора в вакуумный

В летний период для ГВС на центральных тепловых пунктах круглогодично работали паровые котлы. Соответственно, пар постоянно поступал на нужды УПЗ, а летом, дополнительно, пар использовали для подогрева воды в пароводяных подогревателях. Следовательно, летом УПЗ приходилось покупать пар у УМУП «Городская теплосеть». По причине высокой стоимости производственного пара в конце 2018 г. УПЗ начали проводить мероприятия по строительству собственных парогенераторов и, соответственно, предупредили УМУП «Городская теплосеть» о том, что в ближайшее время откажутся от покупки пара. В результате, в том же 2018 г. руководством УМУП «Городская теплосеть» было принято решение о переходе от атмосферной деаэрации к вакуумной по причине отсутствия потребителей пара. При этом предприятие понесло минимальные затраты по восстановлению вакуумной деаэрационной установки, так как в организации имелось:

- деаэрационная колонка объёмом на 75 м³;
- 2 бака-аккумулятора суммарной ёмкостью на 100 м³;
- теплообменники для подогрева исходной воды перед деаэратором;

– вакуумные насосы ВВН-6 для создания вакуума в деаэраторе.

Таким образом, была проведена трансформация атмосферного деаэратора ДСА-75 в вакуумный деаэратор ДВ-75. Рассмотрим его подробнее.

Как уже ранее упоминалось в данной статье, деаэрационная установка ДВ-75, габаритные размеры которой приведены на рисунке 3 [23], представляет собой сложное техническое устройство, состоящее из деаэрационной колонки, баков-аккумуляторов, охладителя выпара и воздухоотсасывающего устройства, в качестве которого в данном случае выступает вакуумный насос ВВН-6.

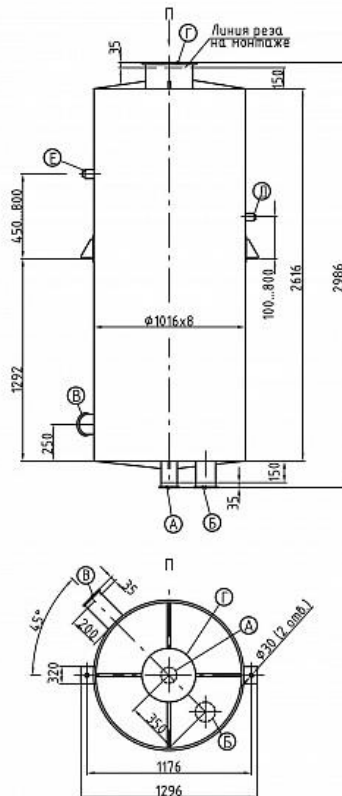


Рис. 3. Габаритные и присоединительные размеры вакуумного деаэратора ДВ-75

Fig. 3. Overall and connecting dimensions of the DV-75 vacuum deaerator

В качестве теплоносителя в деаэраторе ДВ-75 может использоваться как перегретая вода, так и пар. Конкретно в котельной УМУП «Городская теплосеть» в качестве греющей среды деаэратора ДВ-75 используется вода, которая с температурой 5-15°C предварительно подогревается в водяном подогревателе и поступает в деаэрационную колонку уже с температурой 68-72°C.

Особенности монтажа вакуумного деаэратора

Вакуумный деаэратор в отличие от атмосферного имеет свои особенности монтажа на объекте. Так как работа вакуумного деаэратора производится при давлении ниже атмосферного, то основной проблемой становится подача деаэрированной воды после деаэратора в систему теплоснабжения. Данная проблема решается следующими способами:

- использованием промежуточного бака запаса деаэрированной воды и насосов подачи деаэрированной воды;
- установкой деаэрационной колонки на достаточной высоте относительно бака-аккумулятора, для того, чтобы деаэрированная вода, за счет высоты свободного падения, могла преодолевать вакуум и самотеком поступать в баки-аккумуляторы.

Преимуществом первого способа, несомненно, является возможность установки деаэрационной колонки на небольшой высоте, относительно баков-аккумуляторов. Но недостатком данного способа является то, что установка на небольшой высоте может стать причиной возникновения кавитации перед насосом, которая способна вызвать разрушающие напряжения в материале, пластические деформации и, как следствие, быстрое изнашивание деталей. Как правило, высота установки вакуумного деаэратора выбирается из расчета максимально возможного вакуума (-10 м.вод.ст.) высоты столба

воды в баке-аккумуляторе, сопротивления сливного трубопровода и перепада давлений необходимого для обеспечения движения деаэрированной воды. Поэтому с точки зрения явления кавитации способ установки деаэрационной колонки на высоте 12-16 м наиболее безопасен, однако, в свою очередь, наименее выгоден с экономической точки зрения, так как ведет к увеличению капитальных затрат на строительство котельной.

Кавитационная устойчивость зависит от конкретных условий: конструкции насоса, условий эксплуатации, свойств перекачиваемой жидкости, материалов, из которых изготовлено рабочее колесо и другие детали, а также времени работы насоса в условиях кавитации. Для предотвращения возникновения явления кавитации необходимо обеспечить высоту водяного столба на всасе насоса не менее величины указанной в паспорте насоса как кавитационный запас или *NPSH* (*Net Positive Suction Head*) или чистая позитивная высота всасывания. Различают 2 вида кавитационных запасов: *NPSHa* и *NPSHr*, где *NPSHa* (допустимый кавитационный запас) является характеристикой системы водоподготовки. *NPSHr* – требуемый кавитационный запас, м, является параметром насоса, который указывается заводом-изготовителем. То есть, *NPSHr* – это требуемое значение подпора на всасывающем патрубке насоса, которое в зависимости от марки и производительности насоса обычно колеблется в диапазоне от 1 до 5 м.

Таким образом, для нормальной работы насоса необходимо, чтобы допустимый кавитационный запас системы *NPSHa* превышал требуемый кавитационный запас насоса *NPSHr*. В качестве меры безопасности следует добавлять дополнительный запас надежности величиной 0,5 м к значению требуемого запаса насоса (1):

$$NPSHa \geq NPSHr + 0,5 \quad (1)$$

На рисунке 4 приведем схему подачи деаэрированной воды в теплотель после вакуумного деаэратора.

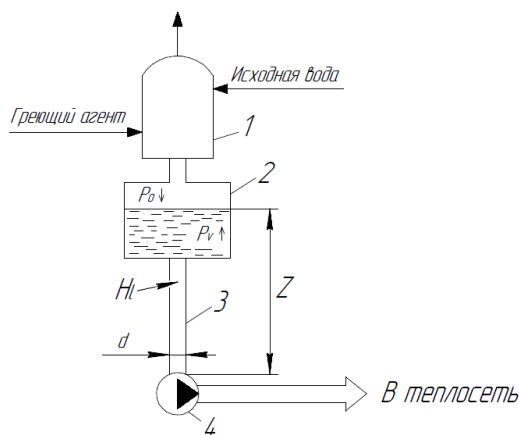


Рис. 4. Схема подачи деаэрированной воды в теплотель после вакуумного деаэратора:

1 – деаэрационная колонка; 2 – бак-аккумулятор; 3 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 4 – подпиточный насос

Fig. 4. Scheme of deaerated water supply to the heating system after the vacuum deaerator:

1 – deaeration column; 2 – storage tank; 3 – deaerated water pipeline; 4 – pump

Допустимый кавитационный запас рассчитывается по следующей формуле:

$$NPSHa = \frac{(P_0 - P_v) \cdot 10}{\rho \cdot g} + Z - H_l \quad (2)$$

где P_0 – давление на поверхности жидкости, кгс/см²; P_v – давление насыщенных паров жидкости при определенной температуре, кгс/см²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; Z – геометрическая высота столба жидкости от уровня в баке до уровня насоса, м; H_l – потери напора на трение по длине трубопровода, м.

Потери напора по длине трубопровода рассчитываются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$H_l = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

где λ – коэффициент сопротивления трения по длине; l и d – размеры трубопровода, м; V – средняя скорость течения, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Отметим, что, при переоборудовании в котельной атмосферного деаэратора в вакуумный, деаэрационная колонка была установлена на достаточной высоте 12 м относительно баков-аккумуляторов, что, таким образом, обеспечило допустимый кавитационный запас.

Материалы и методы

Технологическая схема химподготовки водогрейной части котельной УПЗ приведена на рисунке 5.

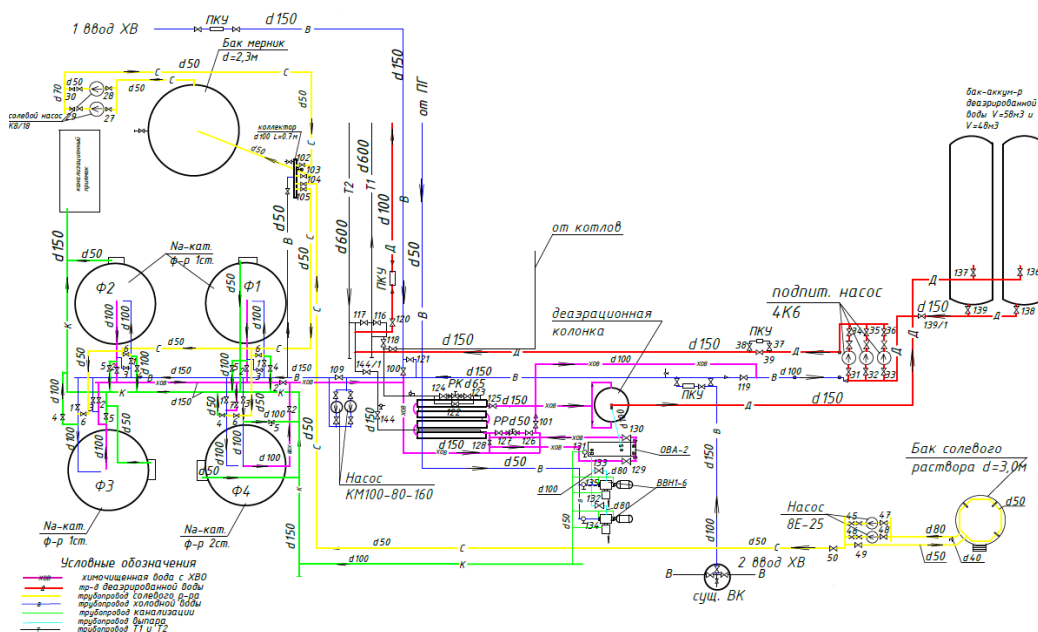


Рис. 5. Технологическая схема химподготовки водогрейной части котельной ОАО «Ульяновский патронный завод»

Fig. 5. Technological scheme of chemical preparation of the hot water part of the boiler house of JSC «Ulyanovsk Cartridge Plant»

Упрощенная схема включения деаэратора ДВ-75 приведена на рисунке 6.

В деаэраторе ДВ-75 применена двухступенчатая схема деаэрации: первая ступень – струйная, вторая – барботажная, в качестве которой используется непрвальная перфорированная тарелка. Принцип работы данного деаэратора следующий. Вода, направляемая на деаэрацию, по трубе попадает на верхнюю тарелку, которая секционирована с таким расчетом, что при минимальной (30%) нагрузке в работе учувствует только часть отверстий во внутреннем секторе. Следовательно, при увеличении нагрузки включаются в работу дополнительные ряды отверстий. Секционирование верхней тарелки исключает гидравлические перекосы по пару и воде при изменениях нагрузки, а также всегда обеспечивает обработку паром струй воды. Пройдя струйную часть, вода попадает на перепускную тарелку, предназначенную для сбора и перераспределения воды на начальный участок, расположенный ниже барботажной тарелки. Перепускная тарелка имеет отверстие в виде сектора, который с одной стороны примыкает к вертикальной сплошной перегородке, идущей вниз до основания корпуса колонки. Вода с перепускной тарелки направляется на непрвальную барботажную тарелку, выполненную в виде кольца с рядами отверстий, ориентированными перпендикулярно потоку воды. К барботажной тарелке примыкает водосливный порог, который проходит до нижнего основания деаэратора. Вода протекает по барботажному листу, переливается через порог и попадает в сектор, образуемый порогом и перегородкой, а затем отводится из деаэратора через трубу.

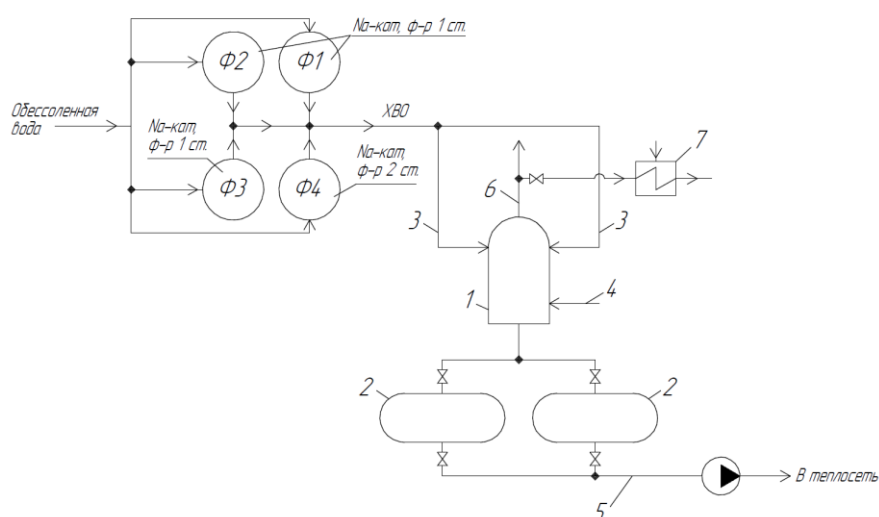


Рис. 6. Схема включения деаэратора ДВ-75:

1 – деаэрационная колонка; 2 – бак-аккумулятор; 3 – трубопровод подвода исходной воды; 4 – трубопровод подвода греющего агента; 5 – трубопровод отвода деаэрированной воды; 6 – трубопровод отвода пара; 7 – охладитель пара; ф1 – ф4 – фильтры.

Fig. 6. The scheme of switching on the DV-75

deaerator: 1 – deaeration column; 2 – storage tank; 3 – source water supply pipeline; 4 – heating agent supply pipeline; 5 – deaerated water discharge pipeline; 6 – vapor removal pipeline; 7 – vapor cooler; f1 – f4 – filters

Предварительно подогретая вода, которая используется в качестве греющего агента, по трубе подводится под барботажную тарелку и, попадая в область с давлением ниже атмосферного, вскипает. Под тарелкой образуется паровая подушка, и пар, проходя через отверстия, барботирует воду. Вода, оставшаяся после вскипания, по водоперепускной трубе поступает на барботажную тарелку, где проходит обработку совместно с исходным потоком воды. С увеличением нагрузки, а, следовательно, и расхода греющего агента, высота паровой подушки увеличивается, и избыточный пар перепускается в обвод барботажного листа через отверстия в перепускных трубах. Затем пар проходит через горловину в перепускной тарелке и поступает в струйный отсек, где большая часть конденсируется.

В данной статье авторами применен аналитический метод для анализа работы атмосферного деаэратора ДСА-75 и вакуумного деаэратора ДВ-75. В качестве основных критериев анализа была выбрана температура, при которой происходила деаэрация и остаточное содержание кислорода в деаэрированной воде. Для анализа были выбраны месяцы с наиболее холодной температурой наружного воздуха - январь и февраль, и с более теплой температурой наружного воздуха – май, июнь. Что касается деаэратора ДВ-75, то ввиду отсутствия данных по теплым месяцам (май и июнь) анализ производился только по холодным месяцам (январь и февраль). Но, в свою очередь, для деаэратора ДВ-75 имеются данные по давлению в деаэраторе, жесткости и щелочности воды.

В таблице 1 [24] и таблице 2 [25] приведены основные технические характеристики атмосферного деаэратора ДСА-75 и вакуумного деаэратора ДВ-75.

Таблица 1

Технические характеристики деаэратора ДСА-75/25

Деаэратор	ДСА-75/25
Производительность номинальная, т/ч	75
Диапазон производительности, т/ч	22,5÷90
Давление рабочее избыточное, МПа	0,02
Температура деаэрированной воды, °С	104,25
Диапазон подогрева воды, °С	10÷50
Содержание растворенного O ₂ в исходной воде, мг/дм ³	≤ 20
Концентрация O ₂ в деаэрированной воде, мкг/кг	≤ 30
Объем бака, м ³	25

Таблица 2

Технические характеристики деаэратора ДВ-75	
Деаэратор	ДВ-75
Производительность номинальная, т/ч	75
Давление рабочее абсолютное, МПа (кгс/см ²)	0,0075-0,05 (0,075-0,5)
Давление исходной воды избыточное, МПа (кгс/см ²)	0,2 (2,0)
Рабочая среда	Вода, пар
Температура деаэрированной воды, °С	40-80
Температура теплоносителя, °С	70-180
Пробное гидравлическое давление, абс., МПа (кгс/см ²)	0,3 (3,0)
Максимальное давление при работе защитного устройства, абс., МПа (кгс/см ²)	0,17 (1,7)
Нагрев воды при номинальной производительности миним/макс, °С	15/25
Тип охладителя выпара	ОВВ-8
Тип эжектора (Рвс 0,02 МПа)	ЭВ-60
Тип эжектора (Рвс 0,006 МПа)	ЭВ-100
Масса сухая, кг	1050

Из таблицы 1 видно, что, при нормальных условиях работы, температура деаэрированной воды на выходе из деаэратора ДСА-75 должна стремиться к температуре 104,25 °С с остаточным содержанием кислорода не более 30 мкг/кг. Также из таблицы 2 видно, что, при нормальных условиях работы, температура деаэрированной воды на выходе из деаэратора ДВ-75 должна быть в диапазоне температур 40-80 °С с остаточным содержанием кислорода не более 30 мкг/кг.

Результаты

По полученным данным авторами построены графические зависимости суточных температурных режимов в зимний и летний периоды (рис. 7-10), которые приведены ниже.

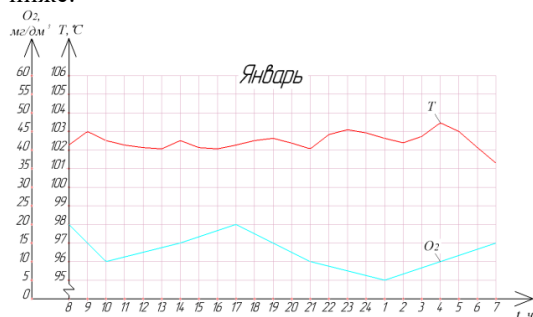


Рис. 7. Суточный график температурного режима деаэратора ДСА-75 в январе 2018 г

Fig. 7. Daily graph of the temperature regime of the DSA-75 deaerator in January 2018

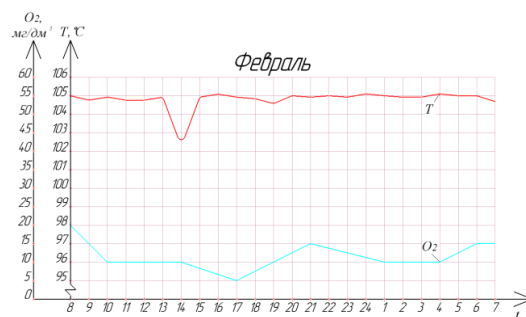


Рис. 8. Суточный график температурного режима деаэратора ДСА-75 в феврале 2018 г

Fig. 8. Daily graph of the temperature regime of the DSA-75 deaerator in February 2018

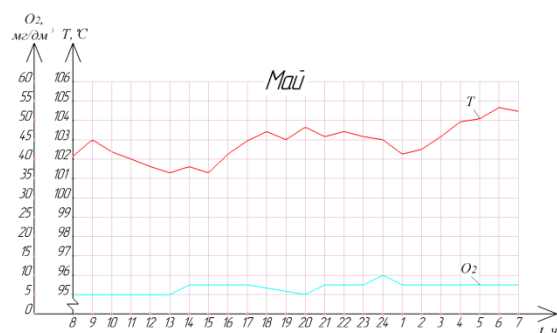


Рис. 9. Суточный график температурного режима деаэратора ДСА-75 в мае 2018 г

Fig. 9. Daily graph of the temperature regime of the DSA-75 deaerator in May 2018

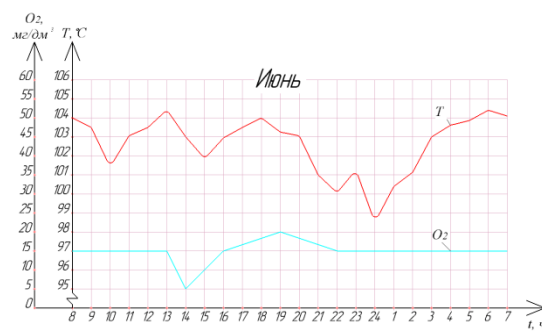


Рис. 10. Суточный график температурного режима деаэратора ДСА-75 в июне 2018 г

Fig. 10. Daily graph of the temperature regime of the DSA-75 deaerator in June 2018

Далее, для деаэратора вакуумного ДВ-75 также были построены суточные графики рисунки 11 и 12.

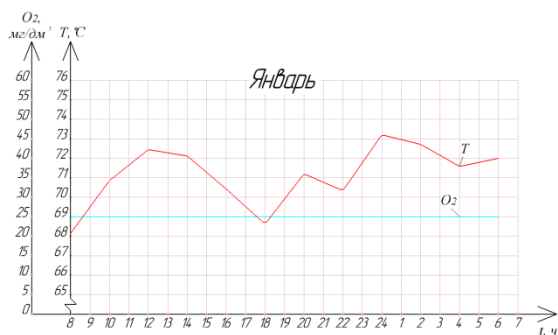


Рис. 11. Суточный график температурного режима деаэратора ДВ-75 в январе 2021 г

Fig. 11. Daily graph of the temperature regime of the DV-75 deaerator in January 2021.

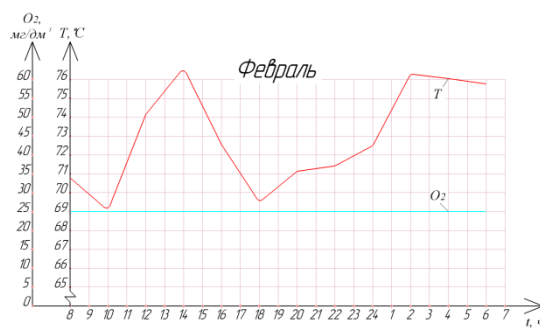


Рис. 12. Суточный график температурного режима деаэратора ДВ-75 в феврале 2021 г

Fig. 12. Daily graph of the temperature regime of the DV-75 deaerator in February 2021

Обсуждение

Из построенных графиков зависимости (рис. 7-10) по данным с атмосферного деаэратора ДСА-75 можно выделить следующее:

- в январе и феврале наблюдается достаточно стабильный температурный режим, при котором происходит атмосферная деаэрация, так как температура колеблется в малом диапазоне 101-104 °С.

- в мае температура колеблется в пределах 101-105 °С, в июне – в пределах 98-105°С, что также можно назвать стабильными температурными режимами;

- режим работы деаэратора ДСА-75 как в холодные, так и в теплые месяцы соответствует нормальным условиям работы для осуществления атмосферной деаэрации;

- содержание кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора ДСА-75 не превышает 30 мкг/кг;

- диоксид углерода полностью отсутствует в деаэрированной воде.

Что касается деаэратора вакуумного ДВ-75, то по нему ситуация аналогичная (рис. 11-12), а именно:

- в январе наблюдается колебание температуры, при которой происходит вакуумная деаэрация, в пределах 68-73 °С, что является допустимым;

- в феврале наблюдается большее колебание температур при вакуумной деаэрации, которое находится в пределах 69-77 °С;

- режим работы деаэратора ДВ-75 в холодные месяцы соответствует нормальным условиям работы для осуществления вакуумной деаэрации;

- содержание кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора ДВ-75 не превышает 30 мкг/кг;

- диоксид углерода полностью отсутствует в деаэрированной воде.

Можно заключить, что в настоящее время в рассматриваемой котельной УМУП «Городская теплосеть» система водоподготовки достаточно отлажена и выполняет свои функции, обеспечивая при этом качественную обработку воды.

Выводы

1. Рассматривая развитие деаэрационных устройств, можно отметить, что те или иные сложности и проблемы в эксплуатации крупных тепловых электростанций и небольших котельных в конечном итоге привели к созданию немалого числа разновидностей термических деаэраторов, которые в настоящее время серийно выпускаются и имеют широкий типоразмерный ряд. Эксплуатационным организациям рекомендуется, прежде всего, критически оценивать «новейшие» конструкции деаэраторов. Для достижения высокого качества деаэрированной воды, как правило, необходимо применять хорошо освоенные серийные аппараты, которыми до сих пор остаются деаэраторы, разработанные в ЦКТИ, а также создавать технологически необходимые схемные и режимные условия их эксплуатации.

2. Авторами установлено, что:

- для нормальной работы атмосферного деаэратора (при температуре не ниже 100°С) необходим источник пара, который в настоящее время в большинстве котельных отсутствует из-за их перевода в водогрейный режим;

- для обеспечения нормального стекания воды после вакуумной деаэрационной колонки в бак-аккумулятор деаэрационную колонку необходимо устанавливать на высоту, которая выбирается из расчета максимально возможного вакуума (-10 м.вод.ст.)

высоты столба воды в баке-аккумуляторе, сопротивления сливного трубопровода и перепада давлений, необходимого для обеспечения движения деаэрированной воды;

– для подачи деаэрированной воды после вакуумного деаэратора в сеть необходимо, чтобы допустимый кавитационный запас системы превышал требуемый кавитационный запас насоса;

– в настоящее время на рассматриваемой котельной УМУП «Городская теплосеть» система водоподготовки с использованием традиционного вакуумного деаэратора ДВ-75 хорошо отлажена и вполне выполняет свои функции, обеспечивая при этом качественную обработку воды.

3. В настоящей статье показана возможность перехода с атмосферной деаэрации на вакуумную. Такой переход весьма актуален на сегодняшний день на многих котельных по причине отказа от производства и потребления пара. Затраты на модернизацию рассмотренной котельной минимальны.

Литература

1. Шарапов В.И., Пазушкина О.В., Мингараева Е.В. Низкотемпературная деаэрация воды в теплоэнергетических установках / В. И. Шарапов, О. В. Пазушкина, Е. В. Мингараева; Ульян. гос. техн. ун-т. Ульяновск: УлГТУ, 2020. 202 с.
2. Sharapov V.I., Tsyura D.V. The water thermal deaeration processes management technologies // Russian national symposium on power engineering. Kazan: KSPEU.2001.
3. Малинина О.В. Технологии транспорта и утилизации выпара термических деаэраторов // Проблемы энергетики. Известия вузов. 2004. №3-4. С. 100-111.
4. Шарапов В.И., Феткуллов М.Р., Цюра Д.В. Об энергетической эффективности управления деаэраторами ТЭЦ по нескольким параметрам // Проблемы энергетики. Известия вузов. 2005. № 3-4. С. 46-54.
5. Шарапов В.И., Кузьмин А.В. О подогреве подпиточной воды теплосети основным конденсатом турбины // Проблемы энергетики. Известия вузов. 2012. № 3-4. С. 3-13.
6. Шарапов В.И., Кудрявцева Е.В (Мингараева), Пазушкина О.В. Массообмен и гидродинамика деаэраторов ТЭС при использовании в качестве десорбирующей среды природного газа // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.9 № 1-2. С. 86-94.
7. Шарапов В.И., Пазушкина О.В., Золин М.В. Энергоэффективная схема включения вакуумного деаэратора в систему регенерации теплофикационной турбоустановки // С.О.К. 2019 № 6. С. 36-39.
8. Sharapov V.I., Kudryavtseva E.V. (Mingaraeva). Hydrodynamics and mass transfer deaeration of water on thermal power plants when used natural gas as a desorbing agent // Journal of Physics: Conference Series. 2017.
9. Sharapov V.I., Zamaleev M.M., Kudryavtseva E.V. Methods for Monitoring the Vacuum Seals of Turbine Systems and Vacuum Deaerators // Power Technology and Engineering. 2015. V. 49, N 4. pp. 287-290.
10. Sharapov V.I., Pazushkina O.V., Kudryavtseva E.V. Energy-Effective Method for Low-Temperature Deaeration of Make-up Water on the Heating Supply System of Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2016. V. 63. No. 1. pp. 687-690.
11. Sharapov V.I., Kudryavtseva E.V. Energy Efficiency of Low-Temperature Deaeration of Makeup Water for a District Heating System // Power Technology and Engineering. 2016. V. 50. N 2. pp. 204-207.
12. Mayr F. Kesselbetriebstechnik, V.: Dr. Ingo Resch, 10. Auflage. 2003. Seite 392.
13. WasserBauGesellschaft Kulmbach mbH. Available at: <https://www.wbg-kulmbach.de>. Accessed to: 15 октября 2021 г.
14. Eurowater Wasseraufbereitung GmbH, Hamburg, Deutschland. <https://www.wlw.de/de/firma/eurowater-wasseraufbereitung-gmbh-346176>. Ссылка активна на 15 октября 2021 г.
15. Подчернин Д.П. Сравнение различных систем деаэрации и особенности их внедрения // Новости теплоснабжения. 2017. - № 2.
16. Журнал о котельном оборудовании. Доступно по: <https://kotlotech.ru/deaerator-dsa/> Ссылка активна на 18 июля 2021 г.
17. Деаэраторы «АВАКС». // АВОК. 2004. № 6 (статья и приложенный к журналу компакт-диск).
18. Шарапов В.И. Проверка деаэратора «АВАКС» в промышленной эксплуатации / В.И. Шарапов, М.Е. Орлов // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 2 (52). С. 60–

62.

19. Шарапов В.И. Деаэрация воды в теплогенерирующих установках малой мощности // Новости теплоснабжения. 2007. № 5. С. 16-22.

20. Ледуховский Г.В., Виноградов В.Н., Шатова И.А. Реконструкция атмосферных струйных деаэраторов с применением кавитационных деаэрационных устройств «АВАКС» // Вестник ИГЭУ. 2014. № 6. С. 5–10.

21. Разинков А.А., Петухова А.Ю., Ледуховский Г.В. Характеристики вакуумно-атмосферной деаэрационной установки на базе деаэраторов "ДСА" и "АВАКС" // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов, Пятая Всероссийская научно-практическая конференция, г. Волжский, 23-26 сентября 2014 г. / Сборник материалов конференции. Волжский: Филиал МЭИ в г. Волжском, 2014. 182 с. С. 132-137.

22. Leduhovsky, G.V. Modeling The Water Decarbonization Processes In Atmospheric Deaerators / G.V., Leduhovsky // Thermal engineering. 2017. V. 64. N. 2. pp. 127-133.

23. ОО Армикс. Доступно по: <https://www.armatyra.org/product/9512/>. Ссылка активна на 18 июля 2021 г

24. Теплотех-Комплект. Доступно по: https://tt-k.ru/Deaerator_DSA_75-25.htm. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

25. Промышленное ЭнергоОборудование. Доступно по: <http://kes-ur.ru/store/10000138/10000586/10000588/deaerator-vakuumnyy-dv-5-deaerator-vakuumnyu-dsv-9/>. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

Авторы публикации

Пазушкина Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В.И. Шарапова», Ульяновский государственный технический университет.

Золин Максим Вячеславович – аспирант, Ульяновский государственный технический университет.

Силкин Игорь Александрович – магистрант, Ульяновский государственный технический университет.

References

1. Sharapov VI, Pazushkina OV, Mingaraeva EV. *Nizkotemperaturnaya deaeratsiya vody v teploenergeticheskikh ustanovkakh; Ul'yan. gos. tekhn. un-t. Ul'yanovsk : UIGTU*, 2020. 202 p.

2. Sharapov VI, Tsyura DV. The water thermal deaeration processes management technologies. *Russian national symposium on power engineering*. Kazan: KSPEU.2001.

3. Malinina OV. Tekhnologii transporta i utilizatsii vypara termicheskikh deaeratorov. *Problemy energetiki. Izvestiya vuzov*. 2004;3-4:100-111.

4. Sharapov VI, Fetkullov MR, Tsyura DV. Ob energeticheskoi effektivnosti upravleniya deaeratorami TETs po neskol'kim parametram. *Problemy energetiki. Izvestiya vuzov*. 2005;3-4:46-54.

5. Sharapov VI, Kuz'min AV. O podogreve podpitochnoi vody teploseti osnovnym kondensatom turbiny. *Problemy energetiki. Izvestiya vuzov*. 2012;3-4:3-13.

6. Sharapov VI, Kudryavtseva EV. (Mingaraeva), Pazushkina OV. Massoobmen i gidrodinamika deaeratorov TES pri ispol'zovanii v kachestve desorbiruyushchei sredy prirodnogo gaza. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2017;9(1-2):86-94.

7. Sharapov VI, Pazushkina OV, Zolin MV. *Energoeffektivnaya skhema vklyucheniya vakuumnogo deaeratora v sistemu regeneratsii teplofikatsionnoi turboustanovki*. S.O.K. 2019; 6:36-39.

8. Sharapov VI, Kudryavtseva EV. (Mingaraeva) Hydrodynamics and mass transfer deaeration of water on thermal power plants when used natural gas as a desorbing agent. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017.

9. Sharapov VI, Zamaleev MM, Kudryavtseva EV. Methods for Monitoring the Vacuum Seals of Turbine Systems and Vacuum Deaerators. *Power Technology and Engineering*. 2015; 49 (4):287-290.

10. Sharapov VI, Pazushkina OV, Kudryavtseva EV. Energy-Effective Method for Low-

Temperature Deaeration of Make-up Water on the Heating Supply System of Heat Power Plants. *Thermal Engineering*. 2016;63(1):687-690.

11. Sharapov VI, Kudryavtseva EV. Energy Efficiency of Low-Temperature Deaeration of Makeup Water for a District Heating System. *Power Technology and Engineering*. 2016;50(2):204-207.

12. Mayr F. Kesselbetriebstechnik, V.: Dr. Ingo Resch, 10. Auflage. 2003. Seite 392.

13. WasserBauGesellschaft Kulmbach mbH. Доступно по: <https://www.wbg-kulmbach.de>. Ссылка активна на 15 октября 2021 г.

14. Eurowater Wasseraufbereitung GmbH, Hamburg, Deutschland. <https://www.wlw.de/de/firma/eurowater-wasseraufbereitung-gmbh-346176>. Ссылка активна на 15 октября 2021 г.

15. Podchernin D.P. Sravnenie razlichnykh sistem deaeratsii i osobennosti ikh vnedreni. *Novosti teplosnabzheniya*. 2017;2.

16. Zhurnal o kotel'nom oborudovanii. Dostupno po: <https://kotlotech.ru/deaerator-dsa/>. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

17. Deaeratory «AWACS». // AVOK. 2004. № 6.

18. Sharapov VI, Orlo M.E. Proverka deaeratora «AWACS» v promyshlennoi ekspluatatsii. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2008;2 (52):60–62.

19. Sharapov VI. Deaeratsiya vody v teplogeneriruyushchikh ustanovkakh maloi moshchnosti. *Novosti teplosnabzheniya*. 2007;5:16-22.

20. Ledukhovskii GV, Vinogradov VN, Shatova IA, et al. Rekonstruktsiya atmosferykh struinykh deaeratorov s primeneniem kavitatsionnykh deaeratsionnykh ustroystv «AWACS». *Vestnik IGEU*. 2014; 6:5-10.

21. Razinkov AA, Petukhova AY., Ledukhovskii GV. Kharakteristiki vakuumno-atmosfernoi deaeratsionnoi ustanovki na baze deaeratorov «DSA» i «AWACS». *Resurso-energoberezhenie i ekologo-energeticheskaya bezopasnost' promyshlennykh gorodov, Pyataya Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*, g. Volzhskii, 23-26 sentyabrya 2014 g. Sbornik materialov konferentsii. Volzhskii: Filial MEI v g. Volzhskom, 2014;182:132-137.

22. Leduhovsky GV. Modeling The Water Decarbonization Processes In Atmospheric Deaerators. *Thermal engineering*. 2017;64(2):127-133.

23. ООО Армикс. Dostupno po: <https://www.armatyra.org/product/9512/>. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

24. *Teplotekh-Komplekt*. Dostupno po: https://tt-k.ru/Deaerator_DSA_75-25.htm. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

25. *Promyshlennoe EnergoOborudovanie*. Dostupno po: <http://kes-ur.ru/store/10000138/10000586/10000588/deaerator-vakuumnyy-dv-5-deaerator-vakuumnyy-dsv-9/>. Ссылка активна на 18 июля 2021 г.

Authors of the publication

Olga V. Pazushkina – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: o.pazushkina@yandex.ru.

Maksim V. Zolin – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: zolinm6@gmail.com.

Igor A. Silkin – Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia.

Получено 17.02.2022г.

Отредактировано 26.03.2022г.

Принято 26.03.2022г.



СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩИХ ПОТОКОВ ГАЗА В ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Л.Е. Осипов, К.О. Десятов

Ю.М. Бродов

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. На основе спектрального анализа оценить влияние установки турбины турбокомпрессора на аэромеханику пульсирующих потоков газа в выпускной системе двигателя и предложить способ управления аэродинамическими и теплообменными характеристиками нестационарных потоков газа за счет создания эффекта эжекции в выпускной системе. МЕТОДЫ. Лабораторный эксперимент на натурной модели поршневого двигателя был выбран для достижения поставленной цели. Спектральный анализ гармонических зависимостей использовался для оценки изменения структуры газовых потоков в выпускной системе. Математическое моделирование рабочего цикла дизельных двигателей применялся для оценки потенциальных положительных эффектов от применения системы эжекции в выпускном тракте дизеля. Системы трехмерного твердотельного моделирования применялись для эскизных (инженерных) проработок новых (модернизированных) конструкций систем выпуска. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описаны лабораторное оборудование, измерительная система и методы обработки данных. Приводится описание граничных условий в ходе проведения экспериментальных исследований. Производится сравнение аэромеханических и теплообменных характеристик нестационарных потоков в выпускной системе двигателя с турбокомпрессором и без него. Показаны качественные и количественные отличия в аэромеханике и теплофизике процессов. Предложен способ аэромеханического совершенствования выпускной системы за счет создания эжекции. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выявлено, что турбина турбокомпрессора оказывает значимое влияние на аэромеханические характеристики потоков в выпускной системе. Наблюдается значимое снижение максимальной скорости потока в выпускном тракте (до 3 раз) при установке турбокомпрессора. Происходит снижение расходных характеристик через выпускную систему с турбонаддувом (в пределах 30 %). Установлено, что эффект эжекции в выпускной системе двигателя приводит к стабилизации течения, росту расхода газа на 6-12 %, снижению удельного расхода топлива в среднем на 1 % и улучшению показателей надежности на 1,11-1,74 %.

Ключевые слова: двигатель; турбокомпрессор; аэромеханика потоков газа; система выпуска; спектры; аэромеханическое совершенствование.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта 18-79-10003.

Для цитирования: Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Осипов Л.Е., Десятов К.О. Спектральный анализ газодинамических характеристик пульсирующих потоков газа в выпускной системе поршневого двигателя // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 114-125. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-114-125.

SPECTRAL ANALYSIS OF GAS-DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PULSING GAS FLOWS IN THE EXHAUST SYSTEM OF A PISTON ENGINE

LV. Plotnikov, BP. Zhilkin, LE. Osipov, KO. Desyatov,

Yu. M. Brodov.

**Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia**

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To On the basis of spectral analysis, to evaluate the effect of installing a turbocharger turbine on the aeromechanics of pulsating gas flows in the engine exhaust system and to propose a method for controlling the aerodynamic and heat transfer characteristics of unsteady gas flows by creating an ejection effect in the exhaust system. *METHODS.* A laboratory experiment on a full-scale piston engine model was chosen to achieve this goal. Spectral analysis of harmonic dependences was used to assess changes in the structure of gas flows in the exhaust system. Mathematical modeling of the operating cycle of diesel engines was used to assess the potential positive effects of the use of an ejection system in the exhaust tract of a diesel engine. Three-dimensional solid modeling systems were used for sketch (engineering) studies of new (modernized) exhaust system designs. *RESULTS.* The article describes laboratory equipment, measuring system and data processing methods. A description of the boundary conditions in the course of experimental research is given. Comparison of aeromechanical and heat exchange characteristics of unsteady flows in the exhaust system of an engine with and without a turbocharger is carried out in the article. The qualitative and quantitative differences in aeromechanics and thermal physics of processes are shown. The proposed method of aeromechanical improvement of the exhaust system by creating an ejection. *CONCLUSION.* It was revealed that the turbine of a turbocharger has a significant effect on the aeromechanical characteristics of flows in the exhaust system. A significant decrease in the maximum flow rate in the exhaust tract (up to 3 times) is observed when installing a turbocharger. There is a decrease in flow characteristics through the turbocharged exhaust system (within 30%). It was found that the ejection effect in the engine exhaust system leads to stabilization of the flow, an increase in gas consumption by 6-12%, a decrease in specific fuel consumption by an average of 1% and an improvement in reliability indicators by 1.11-1.74%.

Keywords: engine; turbocharger; aeromechanics of gas flows; exhaust system; spectra; aeromechanical improvement.

Acknowledgments: the work has been supported by the Russian Science Foundation (grant No. 18-79-10003).

For citation: Plotnikov LV, Brodov YuM, Zhilkin BP, Osipov LE, Desyatov KO. Spectral analysis of gas-dynamic characteristics of pulsing gas flows in the exhaust system of a piston engine. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1):114-125. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-114-125.

Введение

Эффективность рабочего цикла двигателей определяется аэромеханическим совершенством процессов в выпускной системе [1-3]. Например, в некоторых статьях приводятся результаты по настройке конструкции выпускных систем с целью улучшения экономичности и экологичности бензиновых и дизельных двигателей [4, 5]. Основная идея при доработке выпускных систем состоит в улучшении аэромеханики движения потоков с целью снижения гидравлического сопротивления и, соответственно, в улучшении расходных характеристик.

Отдельного внимания заслуживают научные работы по исследованию режимов работы ПДВС и параметров отработавших газов (ОГ) в выпускной системе на экологические и эксплуатационные показатели. Так, *Fernoaga V.* и др. [6] с помощью искусственного интеллекта исследуют влияние противодействия на выпуске на эффективность двигателя и токсичность его ОГ. В результате был предложен способ прогнозирования поведения ПДВС при разных значениях противодействия на выпуске. *Khoa N.X.* и др. [7] на основе экспериментальных исследований и математического моделирования оценивали степень влияния тепломеханических параметров потоков газа в выпускной системе на эффективность системы рециркуляции двигателя и, соответственно, на его экологические характеристики. *Aiello V.C.* и др. [8] проводили, анализировали влияние характеристик газовых потоков и уровень их загрязнения на эффективность теплообменных аппаратов и функционирование системы наддува. *Huang T.* и др. [9] разработали способ прогнозирования температуры ОГ двигателя при его работе на разных

режимах (в том числе на переходных режимах) с целью повышения эффективности работы сажевого фильтра (это повысит его надежность и экологическую безопасность). Antanenкова I.S. и др. [10] предложили оригинальные термодинамические системы для использования ОГ судовых двигателей с целью повышения их КПД, а также разработали методики расчета подобных систем. В некоторые научные работы направлены на разработку измерительных приборов для более точного определения параметров потоков в выпускной системе с целью разработки современных систем управления ПДВС [11, 12].

Дополнительно можно выделить ряд статей по созданию математических моделей течения газов в выпускных системах [13-15]. Например, Kim K.-H. и др. [16] предложил оригинальную одномерную математическую модель для расчета основных параметров потоков в системах газообмена ПДВС. В свою очередь, Kong K.-J. и др. [17] разработали комплексную 1D-3D физико-математическую модель также для изучения структуры и характеристик потоков газа во впускной и выпускной системах двигателей. Эти модели были созданы с целью изучения структуры потоков, а также для прогнозирования газодинамических, теплообменных, расходных и экологических характеристик потоков в системах газообмена для улучшения эксплуатационных показателей ПДВС и проектирования конкурентноспособных энергетических установок. Следует отметить, что исследование структуры пульсирующего потока в выпускной системе является довольно сложной и трудоемкой задачей, которая требует применения очень дорогостоящего оборудования [18, 19].

Отдельным направлением исследований является турбокомпрессор (ТК) для наддува двигателей. Известно, что ТК оказывает существенное влияние на рабочий цикл ПДВС [20-22]. При этом, следует отметить, что существует относительно небольшое количество работ по детальному изучению влияния лопаточного аппарата ТК на газодинамику и теплообмен в газодинамических системах двигателей.

Одним из самых известных и эффективных способов для оценки аэромеханики пульсирующих потоков в газодинамических системах сложной конфигурации является спектральный анализ [23, 24]. Он активно применяется во всех отраслях науки и техники, включая поршневое двигателестроение [25, 26]. Поэтому в данном исследовании этот метод был выбран за основу при обработке экспериментальных данных.

Таким образом, задачами данного исследования являлись: 1) на основе спектрального анализа оценить влияние установки турбины турбокомпрессора на аэромеханику пульсирующих потоков газа в выпускной системе двигателя; 2) предложить способ управления газодинамическими и теплообменными характеристиками потоков газа за счет создания эффекта эжекции в выпускной системе.

Материалы и методы

Исследования проводились на динамическом стенде, имитирующем процесс выпуска в ПДВС с турбонаддувом (рис. 1). Стенд включал источник сжатого воздуха, который подавал его в цилиндр с давлением от 50 до 250 кПа. Перед подачей воздуха в цилиндр осуществлялась его стабилизация (выравнивание давления) в специальном баке. Из цилиндра воздух подавался в головку блока со штатным клапанным механизмом. Впускные и выпускные клапана приводились во вращение с помощью электрического двигателя с системой автоматического управления. Частота вращения распределительного вала изменялась от 300 до 1500 мин⁻¹, что соответствует частоте вращения коленвала от 600 до 3000 мин⁻¹. Из головки блока воздух поступал в выпускной трубопровод длиной 400 мм с внутренним диаметром 30 мм. На выходе из выпускного трубопровода устанавливался турбокомпрессор. Общая длина системы выпуска составляла около 500 мм.

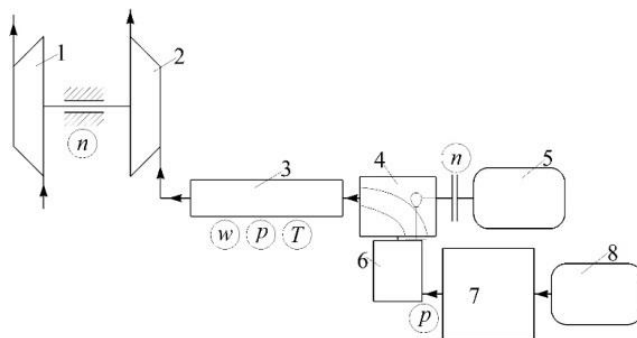


Рис. 1. Компоненка лабораторного стенда и места расположения датчиков: 1 – компрессор ТК; 2 – турбина ТК; 3 – выпускной коллектор; 4 – головка цилиндров; 5 – электрический привод распределителя; 6 – объем, имитирующий цилиндр

Fig. 1. Layout of the laboratory stand and sensor locations: 1 – TC compressor; 2 – TC turbine; 3 – exhaust manifold; 4 – cylinder head; 5 – camshaft electric drive; 6 – volume simulating engine cylinder; 7 – volume for flow

двигателя; 7 – объем для стабилизации потока;
8 – источник сжатого воздуха; p – датчик
давления; n – датчик частоты вращения; w –
датчик скорости потока газа; T – датчик
температуры

stabilization;

8 – compressed air source; p – pressure sensor; n –
speed sensor; w – gas flow velocity sensor; T –
temperature sensor

В выпускном трубопроводе измерялись следующие физические величины: скорость потока воздуха w_x , давление потока p_x , температура потока T и локальный коэффициент теплоотдачи α_x . Дополнительно измерялось давление на входе в цилиндр (давление на выпуске) p_{out} . Также определялись частоты вращения ротора турбокомпрессора и коленчатого вала двигателя. Измерение скорости потока воздуха производилось с помощью термоанемометра постоянной температуры, давление потока – быстродействующим датчиком давления, температура – термопарой. Локальный коэффициент теплоотдачи также определялась с помощью термоанемометра и специального датчика с чувствительным элементом в виде тонкой нити (так называемый, тепловой датчик). Для определения количественных значений коэффициента теплоотдачи применялся метод косвенной тарировки датчика на основе аналогии Рейнольдса. Система измерений, применяемая в данном исследовании, подробнее описана в [27].

В данной работе исследования проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялась оценка влияния наличия турбины ТК в выпускной системе ПДВС на аэродинамические характеристики течения, т.е. пульсационные составляющие скорости и давления потока. Очевидно, что лопатки турбины в выпускной системе оказывают механическое влияние на течение и одновременно турбина является источником аэродинамического сопротивления. В работе основной анализ осуществляется на основе сравнения графиков спектров для функций $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$.

На втором этапе исследования был предложен способ газодинамического совершенствования системы выпуска ДВС. В качестве метода для совершенствования аэромеханики потоков в выпускной системе использовался эффект эжекции [28]. Этот эффект обычно используется для выравнивания поля скоростей и увеличения расходных характеристик через исследуемую систему. В данном случае, проводилась оценка по влиянию эффекта эжекции на пульсационные составляющие потока в выпускной системе ПДВС с помощью спектрального анализа и на теплообменные характеристики течения газа.

На основе данных о аэромеханике течений в рассматриваемых системах спектральный анализ функций скорости и давления потока от времени проводился с помощью программы *PowerGraph* на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Основные показатели спектра при обработке были: 1) тип спектра был амплитудный; 2) число значений спектра во время быстрого преобразования Фурье было 1048576; 3) тип весовой функции был треугольным. Спектральный анализ гармонических функций скорости и давления потоков является классическим подходом для изучения характеристик потока при различных граничных условиях.

Результаты

Исходные данные об изменении скорости и давления потока, а также локального коэффициента теплоотдачи во времени в выпускной системе ПДВС с ТК и без него для одного из режимов представлены на рисунке 2.

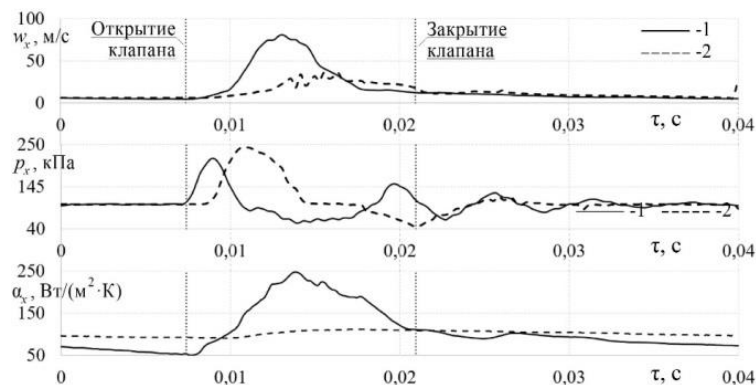


Рис. 2. Зависимости местной скорости w_x и давления p_x потока, а также локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени для выпускной системы без ТК (1) и системы с ТК (2) при $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 200 \text{ кПа}$

Fig. 2. Dependences of the local velocity w_x and the pressure p_x of the flow, as well as the local heat transfer coefficient α_x in time for the exhaust system without TC (1) and the system with TC (2) at $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 200 \text{ kPa}$

Из рисунка 2 видно, что оснащение ПДВС турбокомпрессором приводит к серьезным изменениям в аэромеханике пульсирующих потоков газа. Например, снижение максимальной скорости потока воздуха в случае наличия в системе ТК достигает 10-55 %. При этом, максимальная величина давления потока в выпускном канале, наоборот, возрастает (на 5-15 %), что, в частности, указывает на увеличение аэродинамического сопротивления системы. Коэффициент аэродинамического сопротивления ξ для базовой выпускной системы составлял в среднем 2,5, а при наличии ТК – $\xi \approx 4,4$ (также средняя величина). Можно отметить, более быстрое гашение колебательных явлений статического давления в выпускной системе при наличии ТК (рис. 2). Наибольшие визуальные отличия наблюдаются для функции $\alpha_x = f(\tau)$. Имеет место существенное сглаживание кривой $\alpha_x = f(\tau)$ в выпускной системе с ТК по сравнению с базовой системой. При этом, максимальные значения локального коэффициента теплоотдачи снижаются более, чем в 2 раза.

Спектральный анализ первичных закономерностей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ также для одного из режимов работы лабораторного стенда приведен на рисунке 3. Из рисунка видно, что установка ТК в выпускную систему ПДВС оказывает заметное влияние на график амплитуд спектра скорости потока. Имеет место снижение значимых амплитуд пульсаций скорости до двух раз, что характерно как для низкочастотных пульсаций, так и для высокочастотных. При этом, кратность значимых частот остается неизменной для базовой выпускной системы и системы с ТК. Значимые частоты спектра скорости имеют значения: 12,6 Гц, 25,0 Гц, 37,5 Гц и т.д., т.е. кратность имеет величину $\sim 12,5$ Гц. При этом, значимые частоты спектра давления имеют почти аналогичные значения: 12,4 Гц, 24,8 Гц, 37,1 Гц и т.д., т.е. в данном случае кратность имеет величину $\sim 12,4$ Гц. Однако, амплитуды пульсаций значимых частот спектра закономерностей $p_x = f(\tau)$ для потоков в выпускной системе с ТК имеют величины в 1,2-1,5 раза выше, чем для базовой системы.

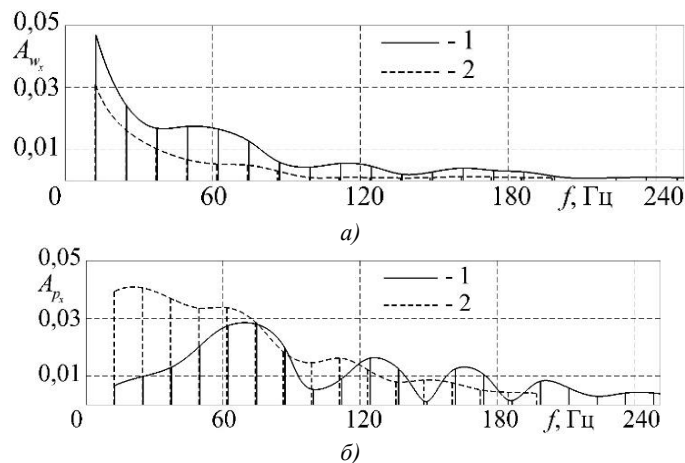


Рис. 3. Графики амплитуд спектра скорости w_x (а) и давления p_x (б) потока воздуха в выпускной системе двигателя без турбокомпрессора (1) и с ТК (2) при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 200 \text{ кПа}$

Fig. 3. Graphs of the amplitudes of the velocity spectrum w_x (a) and pressure p_x (b) of the air flow in the exhaust system of the engine without a turbocharger (1) and with TC (2) at $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 200 \text{ kPa}$

Установленные столь значительные отличия в закономерностях изменения спектральных функций для аэромеханических характеристик потоков в выпускной системе с ТК и без него свидетельствуют о перестройке структуры потоков, наличии внешних возмущений и сложном пространственном развитии течения в зависимости от режимов работы ПДВС и ТК, а также о заметном влиянии лопаток турбины на газодинамические характеристики пульсирующих потоков. Можно предположить, что изменение газодинамики вызывает изменение интенсивности теплообмена, что необходимо учитывать в инженерных расчетах процессов газообмена ПДВС.

На втором этапе исследований изучались аэромеханические процессы в системе выпуска с эффектом эжекции. Исходные данные об изменении скорости потока и локального коэффициента теплоотдачи во времени в базовой выпускной системе и системе с эффектом эжекции представлены на рисунке 4. Графики спектров первичной функции $w_x = f(\tau)$ для разных частот вращения коленвала приведен на рисунке 5.

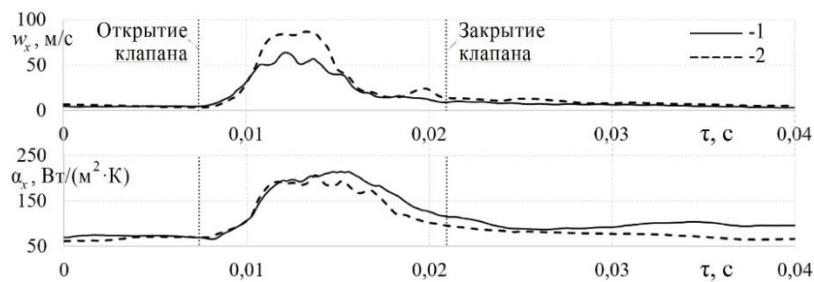


Рис. 4. Зависимости местной скорости потока w_x и локального коэффициента теплоотдачи α_x во времени для выпускной системы с ТК (1) и системы выпуска с эжекцией (2) для $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ и $p_{out} = 100 \text{ кПа}$

Fig. 4. Dependences of the local flow velocity w_x and the local heat transfer coefficient α_x in time for the exhaust system with TC (1) and the exhaust system with ejection (2) for $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ and $p_{out} = 100 \text{ kPa}$

Из рисунка 4 видно, что эжекция в выпускной системе приводит к незначительному росту максимальной скорости потока в пределах 5-25 % по сравнению с базовой системой. Также имеет место усиление некоторых колебательных явлений в процессе впуска и после закрытия клапана. Это может быть связано с отсутствием стабилизации потока через эжекционную трубку. Следует отметить, что расход воздуха через выпускную систему с эжекцией увеличивается примерно на 6-12 % (потенциально это свидетельствует о лучшей очистке цилиндра от ОГ). При этом, наблюдается снижение локального коэффициента теплоотдачи в диапазоне 3-15 % при создании в выпускной системе эффекта эжекции (рис. 4).

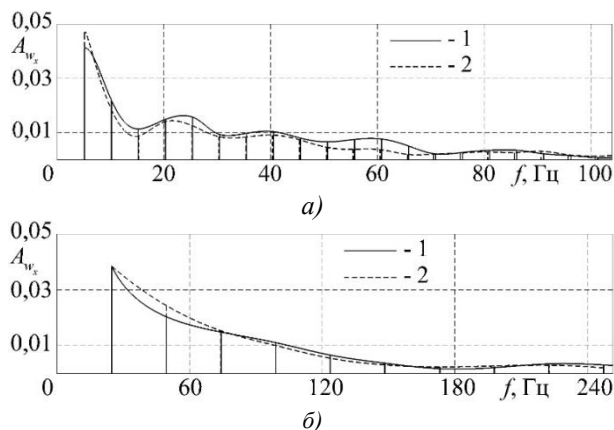


Рис. 5. Графики амплитуд спектра скорости w_x потока воздуха в выпускном тракте двигателя без системы эжекции (1) и с эжекцией (2) при $p_{out} = 100 \text{ кПа}$ и разных частотах n : а – $n = 600 \text{ мин}^{-1}$; б – 3000 мин^{-1}

Fig. 5. Graphs of the amplitudes of the velocity spectrum w_x of the air flow in the exhaust tract of the engine without ejection system (1) and with ejection (2) at $p_{out} = 100 \text{ kPa}$ and different frequencies n : а – $n = 600 \text{ min}^{-1}$; б – 3000 min^{-1}

Наличие в выпускной системе эффекта эжекции не оказывает заметного влияния на графики амплитуд спектра скорости потока (рис. 5). Значимые частоты спектра при скорости вращения вала 600 мин^{-1} имеют значения: 5,1 Гц, 10,2 Гц, 15,3 Гц и т.д., т.е. кратность имеет величину 5,1 Гц. Значимые частоты спектра при скорости $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$: 24,9 Гц, 49,6 Гц, 74,3 Гц, т.е. кратность, имеет величину 24,7 Гц. Установлено, что при скоростях вращения коленвала до 1500 мин^{-1} амплитуды пульсаций значимых частот в выпускной системе с эжекцией снижаются до 9 % по сравнению с базовой системой. При частотах вала более 1500 мин^{-1} отличия в амплитудах не превышает 5 % (что находится в пределах неопределенности эксперимента).

Таким образом, можно констатировать, что система эжекции в выпускном тракте вызывает стабилизацию течения и приводит к подавлению теплоотдачи. В прикладном аспекте это может положительно сказаться на протекании рабочего цикла двигателя, поскольку потенциально будет улучшена очистка цилиндра от ОГ (это повысит мощность ПДВС) и снизится тепловая напряженность основных элементов выпускной системы (это повысит надежность двигателя).

Обсуждение

Рассмотрим прикладной аспект модернизации выпускной системы посредством создания в ней эффекта эжекции на примере различных двигателей внутреннего сгорания.

Один из возможных вариантов конструктивного исполнения системы эжекции в выпускном тракте ПДВС с турбонаддувом представлен на рисунке 6. Еще раз отметим, что научная идея создания эжекции в данном случае состоит в том, чтобы создать в выпускном тракте дополнительное разрежение, которое будет способствовать лучшей очистке цилиндра двигателя от ОГ. Для того, чтобы не создавать отдельную систему с сжатым воздухом наддувочный воздух после компрессора ТК можно перенаправлять в выпускной тракт поршневого двигателя с целью создания эффекта эжекции. Это позволит выровнять поле скоростей в выпускном тракте, а также снизить флуктуации (колебания) скорости и давления пульсирующего потока газа [29]. Следует подчеркнуть, что эффект эжекции может быть создан в выпускной системе двигателя без наддува – в этом случае необходим внешний источник сжатого воздуха (см. ниже примеры таких систем).

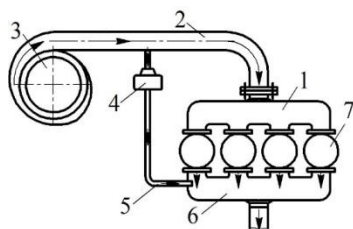


Рис. 6. Принципиальная схема газозвушной системы поршневого двигателя с турбонаддувом: 1 – впускной трубопровод; 2 – выходной патрубок компрессора; 3 – турбокомпрессор; 4 – электромагнитный клапан для сброса наддувочного воздуха; 5 – эжекционная трубка; 6 – выпускной трубопровод

Fig. 6. Schematic diagram of the gas-air system of a turbocharged piston engine: 1 – inlet pipe; 2 – compressor outlet pipe; 3 – turbocharger; 4 – solenoid valve for discharge of charge air; 5 – ejection tube; 6 – exhaust pipe

Для оценки потенциальных положительных эффектов от модернизации системы выпуска ПДВС в программном комплексе ACTUS (разработчик ABB Turbo Systems) проводилось математическое моделирование рабочего цикла дизельного двигателя 6ЧН 21/21 с учетом эжекции на выпуске. В результате установлено, что коэффициент остаточных газов максимально снижается до 10 % на частичных режимах работы дизеля за счет использования эффекта эжекции, что привело к падению удельного расхода топлива в среднем на 1,1 %. Следует отметить, что снижение удельного расхода топлива на 1 % для двигателя 6ЧН 21/21 позволит снизить общее потребление топлива конечным потребителям примерно на 2 кг/ч. Таким образом в эксплуатации ежегодно суммарные расходы на топливо уменьшатся на 700 тыс. руб. для одного двигателя.

Также была проработана конструкция выпускной системы с эжекцией для дизельного двигателя без турбокомпрессора 6Ч 13/14, а также эскиз установки эжекционных трубок в выпускной тракт (рис. 7 и 8). Подчеркнем, что данная система выпуска не содержит систему турбонаддува. В связи с этим для работы системы эжекции необходимы внешние источники сжатого воздуха (поз. 5 на рис. 7).

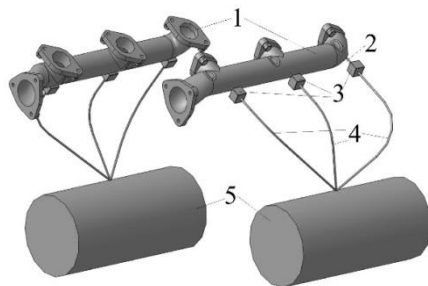


Рис. 7. Трехмерная модель выпускной системы с эжекцией дизеля 6Н 13/14: 1 – выпускной коллектор; 2 – эжекционная трубка; 3 – электромагнитные клапаны; 4 – трубопровод со сжатым воздухом; 5 – источник сжатого воздуха

Fig. 7. Three-dimensional model of the exhaust system with diesel ejection 6H 13/14: 1 – exhaust manifold; 2 – ejection tube; 3 – solenoid valves; 4 – compressed air pipeline; 5 – compressed air source

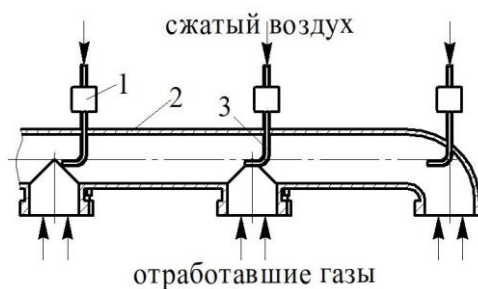


Рис. 8. Эскиз установки эжекционных трубок в выпускную систему дизеля 6Н 13/14: 1 – электромагнитный клапан; 2 – выпускной коллектор; 3 – эжекционная трубка

Fig. 8. Sketch of the installation of ejection tubes in the exhaust system of diesel 6H 13/14: 1 – solenoid valve; 2 – exhaust manifold; 3 – ejection tube

На рисунке 9 представлена еще одна конструкция выпускной системы с эффектом эжекции для дизеля с наддувом 6ЧН 10,5/13,5.

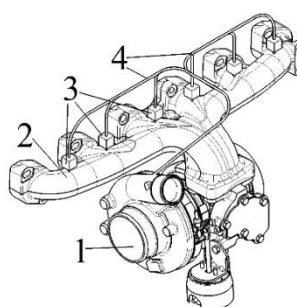


Рис. 9. Трехмерная модель выпускной системы с эжекцией для двигателя 6ЧН 10,5/13,5: 1 – турбокомпрессор; 2 – выпускной коллектор; 3 – электромагнитные клапаны; 4 – трубопроводы со сжатым воздухом

Fig. 9. Three-dimensional model of the exhaust system with ejection for the 6CHN 10.5/13.5 engine: 1 - turbocharger; 2 – exhaust manifold; 3 – solenoid valves; 4 – compressed air pipelines

Дополнительно была выполнена расчетно-аналитическая оценка положительных эффектов по улучшению надежности от подавления теплоотдачи в выпускной системе с эжекцией. Применительно к тепловозному двигателю 6ЧН 21,5/18,5 была рассчитана интенсивность отказов для базовой и модернизированной систем выпуска. Статистические данные для базовой модификации выпускной системы были предоставлены ООО «Уральский дизель-моторный завод». На основании этих данных была пересчитана вероятность безотказной работы для рассматриваемого дизеля при наработке 2000 часов, которая выросла в диапазоне 1,11-1,74 %.

Таким образом, инженерные проработки конструкций выпускных систем для разных дизелей показали, что все модификации поршневых ДВС могут быть оснащены системой эжекции без существенного увеличения затрат (материальных, технологических, эксплуатационных). При этом, данная система может быть применима для двигателей различного назначения, разных типов и мощностей, а также работающих на бензине или дизельном топливе. Одним из важнейших условий применения системы эжекции состоит в создании необходимого разрежения в выпускном тракте. Оно должно быть не сильно высоким, поскольку может вызвать заклинивание канала и ухудшение очистки цилиндра. Но и не слабым, чтобы наблюдалось выравнивание скоростей и изменение структуры пульсирующего потока.

Выводы

Можно сформулировать следующие основные выводы на основе анализа данных, представленных в статье.

1. Создана оригинальная лабораторная установка, позволяющая исследовать нестационарные процессы в аэродинамических системах, конфигурация которых характерна для выпускных систем поршневых двигателей. Используемая система измерений позволила получить уникальные экспериментальные данные о мгновенных значениях скорости и локального коэффициента теплоотдачи пульсирующих потоков в системе выпуска ПДВС. На основе спектрального анализа удалось сделать выводы о влиянии системы наддува (лопаток турбины турбокомпрессора) на структуру течения, а

также предложить способ газодинамического совершенствования выпускной системы двигателя.

2. Турбина турбокомпрессора оказывает значимое влияние на аэромеханические характеристики потоков в выпускной системе ПДВС. Наибольшее снижение максимальной скорости потока в выпускном канале при установке ТК достигает трех раз по сравнению со случаем без ТК. Также имеет место выраженное затухание флуктуаций статического давления потока $p_x = f(\tau)$ в выпускном канале с ТК. Происходит снижение расходных характеристик через рассматриваемую систему, что указывает на то, что турбина ТК воздействует на газодинамическую систему как мощное аэродинамическое сопротивление. При этом, спектральный анализ закономерностей $w_x = f(\tau)$ и $p_x = f(\tau)$ показывает, что влияние турбокомпрессора на поток имеет более сложный физический механизм. Наблюдается заметное гашение пульсационных составляющих в закономерностях $w_x = f(\tau)$ (амплитуда спектра снижается до 2 раз) в случае наличия турбокомпрессора в системе выпуска. Однако, пульсационные составляющие в функции $p_x = f(\tau)$ возрастают в 2-3 раза, что особенно характерно для низкочастотных составляющих спектра. Это свидетельствует об изменении структуры потока, наличии возмущающих факторов и повышении общей аэромеханической динамики процесса выпуска в ПДВС.

3. Предложен способ управления аэромеханическими характеристиками потоков в выпускной системе ПДВС с ТК и без него. Показано, что создание эффекта эжекции в выпускной системе приводит к значимому изменению аэромеханики потоков. Рост максимальной скорости потока в выпускном канале достигает 20 % по сравнению с базовой системой выпуска. Расходные характеристики через модифицированную систему выпуска возрастают на 6-12 %. Спектральный анализ закономерностей $w_x = f(\tau)$ выявил, что эффект эжекции приводит к снижению пульсационных составляющих скорости потока при частотах вращения коленвала до 1500 мин⁻¹ (снижение составляет до 9 % по сравнению с базовой системой). Тогда, как высоких частотах ($n \approx 3000$ мин⁻¹) не наблюдается существенных отличий в графиках амплитуд спектра скорости (максимальные отличия $\pm 3,3$ %).

4. В прикладном аспекте исследования было установлено, что применение эффекта эжекции в дизеле размерности 21,5/18,5 повысит надежность элементов выпускной системы в среднем на 1,5 % по сравнению с базовым ПДВС.

5. Выполнена инженерная проработка установки системы эжекции в выпускные системы дизельных двигателей 6Н 13/14 и 6ЧН 10,5/13,5, которая показала, что любые ПДВС могут быть оснащены рассматриваемой системой без существенных изменений конструкций и материальных затрат. Также для дизеля 6ЧН 21/21 на основе численного моделирования рабочего процесса показано, что установка системы эжекции в выпускной тракт приводит к снижению коэффициента остаточных газов до 10 % на частичных режимах работы ПДВС, что вызывает уменьшение удельного расхода топлива в пределах 1,1 %.

6. Данные об аэромеханических процессах в газодинамических системах сложной конфигурации расширяют базу знаний в области механики жидкостей и газов, а также могут найти практическое применение при разработке уникальных систем газообмена двигателей с турбонаддувом и без него.

Литература

1. Breeze P. Piston Engine-Based Power Plants. UK: Academic Press, 2017. 102 p.
2. Flint M., Pirault J.P. Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications. USA: SAE International, 2009. 576 p.
3. Baechtel J. Performance Automotive Engine Math. USA: S-A Design, 2011. 160 p.
4. Liu Z.G., Swor T.A., Deilzen J.A., Severance C.L., Schauer J.J.A source dilution sampling system for characterization of engine emissions under transient or steady-state operation // Aerosol Science and Technology. 2008. V. 42. No 4. P. 270-280.
5. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer // Procedia Engineering, 2017. V. 206. P. 80-85.
6. Fernoaga V., Sandu V., Balan T. Artificial intelligence for the prediction of exhaust back pressure effect on the performance of diesel engines // Applied Sciences (Switzerland). 2020. V. 10. No 20. Article number 7370.
7. Khoa N.X., Quach Nhu Y., Lim O. Estimation of parameters affected in internal exhaust residual gases recirculation and the influence of exhaust residual gas on performance and emission of a spark ignition engine // Applied Energy. 2020. V. 278. Article number 115699.

8. Aiello V.C., Kini G., Staedter M.A., Garimella S. Investigation of fouling mechanisms for diesel engine exhaust heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2020. V. 181. Article number 115973.
9. Huang T., Hu G., Meng Z., Zeng D. Exhaust temperature control for safe and efficient thermal regeneration of diesel particulate filter // *Applied Thermal Engineering*. 2021. V. 189. Article number 116747.
10. Antanenkova I.S., Koroleva A.P., Frantsuzov M.S., Sukhikh A.A., Sytchev V.V. Designing the Main Heat-Transfer Equipment of an ORC-System for the Internal Combustion Engines of Shipboard Installations // *Thermal Engineering*. 2021. V. 68. No 1. P. 25-36.
11. Jiang W., Shen T. Nonlinear observer-based exhaust manifold pressure estimation and fault detection for gasoline engines with exhaust gas recirculation // *International Journal of Engine Research*. 2021. V. 22. No 4. P. 1377-1392.
12. Nyerges Á., Zöldy M. Verification and comparison of nine exhaust gas recirculation mass flow rate estimation methods // *Sensors (Switzerland)*. 2020. V. 20. No 24. Article number 7291.
13. Boulanger J., Liu F., Neill W.S., Smallwood G.J. An improved soot formation model for 3d diesel engine simulations // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. V. 129. No 3. P. 877-894.
14. Wang Q., Li Y., Hu H. Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k-distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals // *Infrared Physics & Technology*. 2019. V. 96. P. 276-290.
15. Ali S.M., Chakraborty A. Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning // *Applied Thermal Engineering*. 2015. V. 90. P. 54-63.
16. Kim K.-H., Kong K.-J. One-dimensional gas flow analysis of the intake and exhaust system of a single cylinder diesel engine // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. V. 8. No 12. Article number 1036.
17. Kong K.-J., Jung S.-H., Jeong T.-Y., Koh D.-K. 1D-3D coupling algorithm for unsteady gas flow analysis in pipe systems // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. V. 33. No 9. P. 4521-4528.
18. Nasir E.F., Sanders S.T. Laser absorption tomography for ammonia measurement in diesel engine exhaust // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2020. V. 126. No 11. Article number 178.
19. Kim H.-S. Effect of exhaust manifold geometry and engine parameters on flow pulsations inside the exhaust system with CCC under firing conditions // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. V. 35. No 2. P. 805-813.
20. Miller J. *Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems*. USA: S-A Design, 2008, 162 p.
21. Leufvén O., Eriksson L. Measurement, analysis and modeling of centrifugal compressor flow for low pressure ratios // *International Journal of Engine Research*. 2016. V. 17. No 2. P. 153-168.
22. Plotnikov L.V. Features of the gas dynamics and local heat transfer in intake system of piston engine with supercharging // *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017. V. 899. Article number 042008.
23. Pu R. *Hyperspectral remote sensing: fundamentals and practices*. USA: CRC Press, 2017. 466 p.
24. Budko A.Y., Nazarkin A.S., Medvedev M.Y. A study of shock wave processes in the combustion chamber and the estimation method of the knock intensity based on ion current signal analysis // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. V. 13. No 11. P. 3667-3672.
25. Demic M.D., Glisovic Ja.D. Contribution to research of thermal loads in commercial vehicles powertrain mounts // *Vojnotehnički glasnik*. 2017. V. 65. No 4. P. 882-903.
26. Danilov I., Popova I., Moiseev Yu. Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing diesel engine connecting rod bearings // *Transport Problems*. 2018. V. 13. No 1. P. 123-133.
27. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P. Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system // *Applied Thermal Engineering*. 2019. V. 160. Article number 114123.
28. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. Improvement of the thermal and mechanical flow characteristics in the exhaust system of piston engine through the use of ejection effect // *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017. V. 891. Article number 012154.

29. Plotnikov L.V., Zhilkin B.P., Brodov Y.M. Improved cleaning of the engine cylinder from the exhaust gas using the active ejection in the exhaust tract // *Applied mechanics and materials*. 2015. V. 792. P. 553-558.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р. техн. наук, зав. кафедрой турбин и двигателей, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: tot@ustu.ru.

Осипов Леонид Евгеньевич – аспирант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: klumbaa@outlook.com.

Десятов Константин Олегович – магистрант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. E-mail: iwan.logo2018@yandex.ru.

References

1. Breeze P *Piston Engine-Based Power Plants*. UK: Academic Press, 2017. 102 p.
2. Flint M, Pirault JP *Opposed Piston Engines: Evolution, Use, and Future Applications*. USA: SAE International, 2009. 576 p.
3. Baechtel J. *Performance Automotive Engine Math*. USA: S-A Design, 2011. 160 p.
4. Liu ZG, Swor TA, Deilzen JA, et al. A source dilution sampling system for characterization of engine emissions under transient or steady-state operation. *Aerosol Science and Technology*. 2008;42(4):270-280.
5. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM The Influence of Piston Internal Combustion Engines Intake and Exhaust Systems Configuration on Local Heat Transfer. *Procedia Engineering*. 2017;206:80-85.
6. Fernoaga V, Sandu V, Balan T Artificial intelligence for the prediction of exhaust back pressure effect on the performance of diesel engines. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020;10(20):7370.
7. Khoa NX, Quach NY, Lim O Estimation of parameters affected in internal exhaust residual gases recirculation and the influence of exhaust residual gas on performance and emission of a spark ignition engine. *Applied Energy*. 2020;278:115699.
8. Aiello VC, Kini G, Staedter MA, et al. Investigation of fouling mechanisms for diesel engine exhaust heat recovery. *Applied Thermal Engineering*. 2020;181:115973.
9. Huang T, Hu G, Meng Z, et al. Exhaust temperature control for safe and efficient thermal regeneration of diesel particulate filter. *Applied Thermal Engineering*. 2021;189:116747.
10. Antanenkova IS, Koroleva AP, Frantsuzov MS, et al. Designing the Main Heat-Transfer Equipment of an ORC-System for the Internal Combustion Engines of Shipboard Installations. *Thermal Engineering*. 2021;68(1):25-36.
11. Jiang W, Shen T Nonlinear observer-based exhaust manifold pressure estimation and fault detection for gasoline engines with exhaust gas recirculation. *International Journal of Engine Research*. 2021;22(4):1377-1392.
12. Nyerges Á, Zöldy M Verification and comparison of nine exhaust gas recirculation mass flow rate estimation methods. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(24):7291.
13. Boulanger J, Liu F, Neill WS, et al. An improved soot formation model for 3d diesel engine simulations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007;129(3):877-894.
14. Wang Q, Li Y, Hu H Numerical simulation of remote infrared imaging for marine exhaust system using wide-band k-distribution model combined with a new grouping method for spectral sub-intervals. *Infrared Physics & Technology*. 2019;96:276-290.

15. Ali SM, Chakraborty A Thermodynamic modelling and performance study of an engine waste heat driven adsorption cooling for automotive air-conditioning. *Applied Thermal Engineering*. 2015;90:54-63.
16. Kim K-H, Kong K-J One-dimensional gas flow analysis of the intake and exhaust system of a single cylinder diesel engine. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(12):1036.
17. Kong K-J, Jung S-H, Jeong T-Y, et al. 1D-3D coupling algorithm for unsteady gas flow analysis in pipe systems. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019;33(9):4521-4528.
18. Nasir EF, Sanders ST Laser absorption tomography for ammonia measurement in diesel engine exhaust. *Applied Physics B: Lasers and Optics*. 2020;126(11):178.
19. Kim H-S Effect of exhaust manifold geometry and engine parameters on flow pulsations inside the exhaust system with CCC under firing conditions. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021;35(2):805-813.
20. Miller J Turbo: Real World High-Performance Turbocharger Systems. USA: S-A Design, 2008, 162 p.
21. Leufvén O, Eriksson L Measurement, analysis and modeling of centrifugal compressor flow for low pressure ratios. *International Journal of Engine Research*. 2016;17(2):153-168.
22. Plotnikov LV Features of the gas dynamics and local heat transfer in intake system of piston engine with supercharging. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017;899:042008.
23. Pu R Hyperspectral remote sensing: fundamentals and practices. USA: CRC Press, 2017. 466 p.
24. Budko AY, Nazarkin AS, Medvedev MY A study of shock wave processes in the combustion chamber and the estimation method of the knock intensity based on ion current signal analysis. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(11):3667-3672.
25. Demic MD, Glisovic JaD Contribution to research of thermal loads in commercial vehicles powertrain mounts. *Vojnotehnički glasnik*. 2017;65(4):882-903.
26. Danilov I, Popova I, Moiseev Y Analysis and validation of the dynamic method for diagnosing diesel engine connecting rod bearings. *Transport Problems*. 2018;13(1):123-133.
27. Plotnikov LV, Zhilkin BP Specific aspects of the thermal and mechanic characteristics of pulsating gas flows in the intake system of a piston engine with a turbocharger system. *Applied Thermal Engineering*. 2019;160:114123.
28. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM Improvement of the thermal and mechanical flow characteristics in the exhaust system of piston engine through the use of ejection effect. *IOP Conf. Series: Journal of Physics*. 2017;891:012154.
29. Plotnikov LV, Zhilkin BP, Brodov YM Improved cleaning of the engine cylinder from the exhaust gas using the active ejection in the exhaust tract. *Applied mechanics and materials*. 2015;792:553-558.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Boris P. Zhilkin – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Yurii M. Brodov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

Leonid E. Osipov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Konstantin O. Desyatov – Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Получено 28.01.2022г.

Отредактировано 18.02.2022г.

Принято 25.02.2022г.



ЦИФРОВОЙ АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, О.В. Козелков¹, А.С. Малацион²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ООО «Стэк Мастер», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: Параметры электромеханических преобразователей, функционирующих в составе рабочих комплексов, могут изменяться в результате влияния внешних факторов, таких как изменение характеристик окружающей среды, а также вследствие параметрических возмущений, обусловленных изменением физических характеристик элементов электромеханических преобразователей. В этой связи разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих анализ и контроль функционирования электромеханических преобразователей является актуальной задачей. В статье рассматривается цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока, основанный на получении характеристик в таблично-графической форме, отражающих зависимость между вектором нестабильных параметров объекта исследования χ и обобщённым интегральным критерием Q как функцией невязки выходных координат электромеханического преобразователя и его эталонной модели. Получены дискретные передаточные функции эталонной модели и моделей чувствительности по контролируемым нестабильным параметрам электромеханического преобразователя и на основе декомпозиции дискретных моделей построены соответствующие схемы непосредственного программирования. Цифровые алгоритмы полученных моделей представлены разностными уравнениями состояния и выхода. Приведена структурная схема вычисления обобщённого интегрального критерия Q и точечных зависимостей $\chi(Q)$. Дискретная аппроксимация проведена с применением билинейного преобразования (формулы Тастина). Компьютерный эксперимент получения точечных χ -зависимостей проводился с различной степенью точности, зависящей от шага вариаций контролируемых параметров электромеханического преобразователя внутри заданного диапазона изменения. Полученные результаты дают возможность оценки контролируемых нестабильных параметров электромеханических преобразователей постоянного тока с требуемой точностью.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь; цифровой алгоритм; контроль нестабильных параметров; обобщённый интегральный критерий; эталонная модель; модель чувствительности.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Малацион А.С. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 126-140. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140.

DIGITAL ALGORITHM MONITORING FUNCTIONING OF ELECTROMECHANICAL DC CONVERTER

NA. Malev¹, OV. Pogoditsky¹, OV. Kozelkov¹, AS. Malacion²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²LLC «Stek Master», Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: The parameters of electromechanical converters functioning as part of working sets can change as a result of the influence external factors, such as changes in the characteristics of the environment. Changes in parameters also occur due to parametric disturbances caused by changes in the physical characteristics of the elements electromechanical converters. In this regard, the development of methods and algorithms that provide analysis and control of the functioning electromechanical converters is an urgent task. The article discusses a digital algorithm for monitoring the functioning of an electromechanical DC converter, based on obtaining characteristics in a tabular-graphic form. These characteristics reflect the relationship between the vector of unstable parameters of the research object χ and the generalized integral criterion Q as a function of the discrepancy between the output coordinates of the electromechanical converter and its reference model. Discrete transfer functions of the reference model and sensitivity models are obtained for the monitored unstable parameters of the electromechanical converter. Based on the decomposition of discrete models, the corresponding direct programming schemes in the Frobenius form are constructed. The digital algorithms of the obtained models are represented by the difference equations of state and output. The structural scheme calculation of the generalized integral criterion Q and point dependencies $\chi(Q)$ is given. Discrete approximation was carried out using a bilinear transformation (Tustin's formula). A computer experiment for obtaining point χ -dependencies was carried out with varying degrees of accuracy, depending on the step of variations monitored parameters of the electromechanical converter within a given range of variation. The results obtained make it possible to assess the monitored unstable parameters of electromechanical DC converters with the required accuracy.

Keywords: electromechanical converter; digital algorithm; monitoring of unstable parameters; generalized integral criterion; reference model; sensitivity model.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV, Malacion AS. Digital algorithm monitoring functioning of electromechanical dc converter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24 (1):126-140. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-126-140.

Введение

Качество функционирования электромеханических преобразователей (ЭМП) в составе рабочих комплексов в различных отраслях промышленности определяется динамическими показателями и точностью работы в установившемся режиме. Данные характеристики должны быть по возможности инвариантны к изменению параметров электромеханических преобразователей. Нестабильность параметров может быть вызвана как внешними факторами и условиями эксплуатации, что, в свою очередь, приводит к износу и старению изделия, так и особенностями функционирования объекта исследования, приводящими к параметрическим возмущениям [1 – 4]. Внешние возмущения являются координатными или аддитивными [5] и учитываются как дополнительное слагаемое матричных дифференциальных уравнений ЭМП [6]. Параметрические возмущения обусловлены изменением физических характеристик элементов исследуемого объекта и вызывают появление приращений коэффициентов дифференциальных уравнений ЭМП.

Координатные и параметрические возмущения по действию, оказываемому на электромеханический преобразователь, имеют принципиальное отличие: координатные возмущения оказывают влияние только на вынужденное движение, а параметрические – как на вынужденную, так и на свободную составляющие движения, то есть параметрические возмущения оказывают влияние, как на переходный процесс, так и на установившийся [2, 6 – 8].

В работе рассматривается метод, позволяющий на основе вычисления сигнала невязки ε между выходными координатами ЭМП постоянного тока и его эталонной модели и последующего определения обобщённого интегрального критерия $Q(\chi)$ с применением моделей чувствительности по нестабильным параметрам [6, 9] сформировать Q -таблицу, по результатам заполнения которой реализуется цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханических преобразователей.

Математическое описание эталонной модели и моделей чувствительности в общем виде представлено системой разностных уравнений в переменных состояния:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)u(k); \\ y(k) &= C(k)x(k), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$ – матрица состояния размерностью $n \times n$, матрица входа размерностью $n \times m$ и матрица выхода размерностью $l \times n$ соответственно;

$y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_l) \in R^l$; $x = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$; $u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$ – векторы выходных координат, переменных состояния и входных воздействий соответственно [10].

Методы

Реализация цифрового алгоритма контроля функционирования ЭМП постоянного тока, описанного линейной непрерывной моделью в операторной форме, предполагает замену оператора Лапласа s дискретным оператором z с получением дробно-рационального выражения

$$W(z) = \frac{\sum_{k=0}^m a_k z^k}{\sum_{k=0}^n b_k z^k} = \frac{a_m z^m + a_{m-1} z^{m-1} + \dots + a_1 z + a_0}{z^n + b_{n-1} z^{n-1} + \dots + b_1 z + b_0}. \quad (2)$$

Входное воздействие $u(t)$ при замене непрерывной модели её цифровым эквивалентом преобразуется в последовательность импульсов, следующих с периодом T_0 , соответствующего шагу дискретизации, и промодулированных по амплитуде сигналом $u(t)$. Для дискретной аппроксимации эталонной модели и моделей чувствительности ЭМП применен метод Тастина, не требующий определения корней исходной непрерывной модели.

Входное воздействие $u(t)$, поступая на интегрирующее звено первого порядка, преобразуется в сигнал

$$v(t) = \int_0^t u(\tau) d\tau, \quad (3)$$

значения которого в дискретные моменты времени равны

$$v[k] = \int_0^{kT_0} u(\tau) d\tau = \int_0^{(k-1)T_0} u(\tau) d\tau + \int_{(k-1)T_0}^{kT_0} u(\tau) d\tau = v[k-1] + I_1[k]. \quad (4)$$

Второе слагаемое в выражении (4) определим по формуле трапеций:

$$I_1[k] = \int_{(k-1)T_0}^{kT_0} u(\tau) d\tau = \frac{T_0}{2} (u[k] + u[k-1]). \quad (5)$$

В результате для определения последовательности $v[k]$ получим рекуррентное соотношение

$$v[k] = \frac{T_0}{2} (u[k] + u[k-1]) + v[k-1], \quad (6)$$

которому соответствует дискретная модель интегратора

$$W(z) = \frac{T_0}{2} \frac{1+z}{1-z}. \quad (7)$$

Для последовательно соединенных i интегрирующих звеньев дискретная модель i -го порядка

$$W^{(i)}(z) = \left[\frac{T_0}{2} \frac{1+z}{1-z} \right]^i. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что дискретная аппроксимация методом Тастина является приближенной заменой непрерывной модели, поскольку

$$z = e^{sT_0}, \text{ откуда } s = \frac{1}{T_0} \ln(z), \quad (9)$$

т.е. переменные s и z связаны трансцендентными соотношениями. Поэтому для получения передаточной функции цифровой модели в виде дробно-рационального выражения (2) следует ограничиться первым членом разложения функции

$$\ln(z) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \left(\frac{z-1}{z+1} \right)^{2k-1}. \quad (10)$$

В итоге с учетом (9) получим следующее приближение для оператора Лапласа:

$$s = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1} \quad (11)$$

или, для интегрирующего звена первого порядка

$$s^{-1} = \frac{T_0}{2} \frac{z+1}{z-1}. \quad (12)$$

Для увеличения точности дискретной аппроксимации необходимо применять методы, использующие информацию о полюсах непрерывной модели, например, такие как z -преобразование (9), метод Цыпкина-Гольденберга, метод Рагазини-Бергена и т.п. [11, 12, 13].

При построении структурной схемы цифрового алгоритма контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока применен беспоисковый градиентный метод с дискретизированными эталонной моделью ЭМП и моделями чувствительности по анализируемым параметрам с целью получения вектора сигнала невязки ε^* , пропорционального вариациям параметров [14, 15, 16]. Соответствующая структурная схема с векторно-матричной формой представления моделей представлена на рисунке 1.

На схеме приняты следующие обозначения: I – объект исследования с нестабильными параметрами; II – дискретная эталонная модель; III – дискретная модель чувствительности; χ – вектор параметров объекта; $Z\Sigma$ – цифровой сумматор; ADC – аналого-цифровой преобразователь; u – вектор входных воздействий; Y^* – вектор выходных координат объекта; Y_m^* – вектор выходных координат эталонной модели; ε^* – вектор невязки; Y_χ^* – вектор функций чувствительности; $\Lambda_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор коэффициентов нормирования; E – единичная матрица; $Q[\varepsilon^*(\chi)]$ – вектор значений линейного интегрального критерия; $f\{Q[\varepsilon^*(\chi)]\}$ – χ -зависимости; $\hat{\chi}$ – вектор оценок нестабильных параметров.

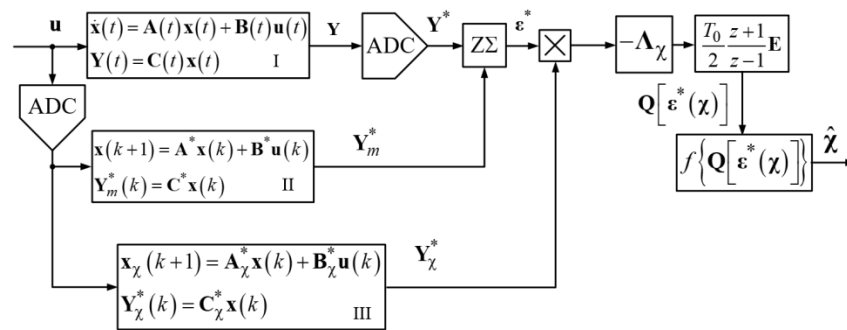


Рис. 1. Векторная структурная схема цифрового алгоритма контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока

Fig. 1. Vector block diagram of a digital algorithm for monitoring the functioning of an electromechanical DC converter

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассматривается серводвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов типа PIVT-6-25/3A. Технические характеристики машины сведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики двигателя PIVT-6-25/3A

Номинальное напряжение U_a , В	Коэффициент передачи по моменту K_m , Н·м/А	Электромагнитная постоянная времени T_a , с	Электромеханическая постоянная времени T_m , с	Частота вращения при максимальном моменте n , об/мин
30	0,072	0,002	0,025	3000

Эталонная модель двигателя постоянного тока типа описывается операторным уравнением второго порядка (13) с коэффициентами, зависящими от следующих параметров: c – коэффициент противо-ЭДС, R_a – активное сопротивление якоря, L_a – индуктивность якоря, J – момент инерции:

$$W_m(s) = \frac{1/c}{\frac{L_a J}{c^2} s^2 + \frac{R_a J_{\text{НОМ}}}{c^2} s + 1}. \quad (13)$$

Модели чувствительности по контролируемым параметрам представлены следующими выражениями [17]:

1) Модель чувствительности по активному сопротивлению якоря R_a

$$\frac{\partial W_m(s, R_a)}{\partial R_a} = \frac{Jcs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2 \right)^2}; \quad (14)$$

2) Модель чувствительности по индуктивности якоря L_a

$$\frac{\partial W_m(s, L_a)}{\partial L_a} = \frac{Jcs^2}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2 \right)^2}; \quad (15)$$

3) Модель чувствительности по моменту инерции J

$$\frac{\partial W_m(s, J)}{\partial J} = \frac{(Ls + R)cs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2 \right)^2}. \quad (16)$$

Дискретную аппроксимацию моделей (13) – (16) производим методом Тастина с применением формулы (12). Данную процедуру целесообразно реализовать в программной среде MatLab с помощью оператора bilinear [18, 19], который позволяет преобразовать непрерывные модели в дискретные $W(z)$ в виде выражения (2). Примем период дискретности $T_0 = 0,001$ с и получим соответствующие дробно-рациональные выражения второго порядка для эталонной модели и четвертого порядка для моделей чувствительности.

Для отражения структуры полученных цифровых моделей применяются структурные схемы программирования [20, 21, 22], иллюстрирующие ход вычислений и облегчающие реализацию модели. Рассмотрим построение схемы программирования на примере модели чувствительности четвертого порядка.

Дискретная форма записи модели чувствительности

$$W_\chi(z) = \frac{Y_\chi(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{D(z)} = \frac{b_4 z^4 + b_3 z^3 + b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^4 + d_3 z^3 + d_2 z^2 + d_1 z + d_0}. \quad (17)$$

Преобразуем выражение (17) к виду

$$W_\chi(z) = \frac{Y_\chi(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{D(z)} = \frac{b_4 + b_3 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_1 z^{-3} + b_0 z^{-4}}{1 + d_3 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_1 z^{-3} + d_0 z^{-4}} \quad (18)$$

и перепишем (18) следующим образом:

$$U_\chi(z) = \left(b_4 + b_3 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_1 z^{-3} + b_0 z^{-4} \right) \cdot E(z),$$

$$\text{где } E(z) = \frac{U(z)}{1 + d_3 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_1 z^{-3} + d_0 z^{-4}}.$$

Схема программирования модели чувствительности, полученная по приведенным соотношениям, представлена на рисунке 2.

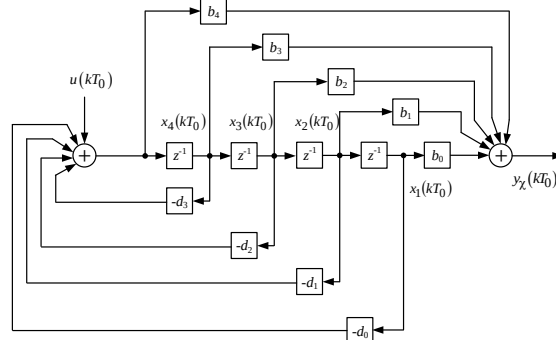


Рис. 2. Структурная схема программирования модели чувствительности

Fig. 2. Block diagram of sensitivity model programming

По схеме программирования находим уравнения состояния

$$\begin{aligned}x_1[(k+1)T_0] &= x_2(kT_0); \\x_2[(k+1)T_0] &= x_3(kT_0); \\x_3[(k+1)T_0] &= x_4(kT_0);\end{aligned}\tag{19}$$

$$x_4[(k+1)T_0] = -d_0x_1(kT_0) - d_1x_2(kT_0) - d_2x_3(kT_0) - d_3x_4(kT_0) + u(kT_0)$$

и уравнение выхода

$$\begin{aligned}y_\chi(kT_0) &= (b_0 - d_0b_4)x_1(kT_0) + (b_1 - d_1b_4)x_2(kT_0) + \\&+ (b_2 - d_2b_4)x_3(kT_0) + (b_3 - d_3b_4)x_4(kT_0) + b_4u(kT_0).\end{aligned}\tag{20}$$

Все модели чувствительности имеют одинаковые схемы программирования и описываются аналогичными уравнениями, которые различаются только величинами коэффициентов числителя.

Уравнения эталонной модели получаем тем же способом:

уравнения состояния

$$\begin{aligned}x_1[(k+1)T_0] &= x_2(kT_0); \\x_2[(k+1)T_0] &= -d_0x_1(kT_0) - d_1x_2(kT_0) + u(kT_0);\end{aligned}\tag{21}$$

уравнение выхода

$$y_m(kT_0) = (b_0 - d_0b_2)x_1(kT_0) + (b_1 - d_1b_2)x_2(kT_0) + b_2u(kT_0).\tag{22}$$

Результаты вычислений коэффициентов числителя и знаменателя цифровых моделей сводим в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов дискретных эталонной модели и моделей чувствительности двигателя постоянного тока типа PIVT-6-25/3A.

Коэффициенты	Модель чувствительности по активному сопротивлению якоря R_a	Модель чувствительности по индуктивности якоря L_a	Модель чувствительности по моменту инерции J	Эталонная модель
b_4	0,00214124554918	4,28249109836543	442,457904805292	—
b_3	0,00428249109836	1,06581410364e-14	876,350827413856	—
b_2	-2,6645352591e-15	-8,5649821967308	-8,5649821965821	0,0553452776642
b_1	-0,0042824910984	-3,9968028886e-14	-876,35082741395	0,1106905553284
b_0	-0,0021412455492	4,28249109836546	433,892922608611	0,0553452776642
d_4	1	1	1	—
d_3	-3,1712889554324	-3,1712889554324	-3,1712889554324	—
d_2	3,71744878841101	3,71744878841101	3, 1744878841101	—
d_1	-1,9078264575077	-1,9078264575077	-1,9078264575077	-1,585654504029
d_0	0,36192064337196	0,36192064337196	0,36192064337196	0,6015939439967

Simulink-модель вычисления обобщённого интегрального критерия $Q[\varepsilon^*(\chi)]$ представлена на рисунке 3.

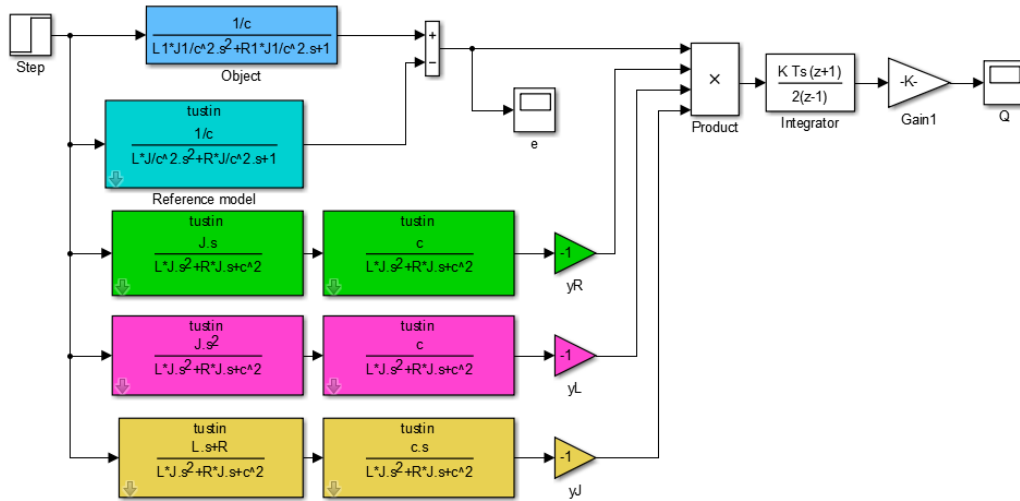


Рис. 3. Simulink-модель вычисления обобщённого интегрального критерия

Fig. 3. Simulink-model for calculating the generalized integral criterion

Моделирование проводим при следующих вариациях параметров:
 $R_{a,var} = f(R_a; 1, 02R_a; 1, 04R_a; 1, 06R_a; 1, 08R_a; 1, 1R_a; 1, 12R_a; 1, 14R_a; 1, 16R_a; 1, 18R_a; 1, 2R_a)$;
 $L_{a,var} = f(L_a; 1, 02L_a; 1, 04L_a; 1, 06L_a; 1, 08L_a; 1, 1L_a; 1, 12L_a; 1, 14L_a; 1, 16L_a; 1, 18L_a; 1, 2L_a)$;
 $J_{var} = f(J; 1, 02J; 1, 04J; 1, 06J; 1, 08J; 1, 1J; 1, 12J; 1, 14J; 1, 16J; 1, 18J; 1, 2J)$.

Полученные для заполнения Q -таблицы (см. табл. 3) результаты моделирования представляют собой массив данных, содержащий для заданного диапазона изменения контролируемых нестабильных параметров количество строк $k = 1331$ в соответствии с выражениями [17]

$$k = \beta^r = 11^3 = 1331,$$

$$\text{где } \beta = \frac{\chi_{imax} - \chi_{imin}}{\Delta\chi_i} + 1 = \frac{1,2 - 1}{0,02} + 1 = 11.$$

В приведенных выражениях r – количество контролируемых параметров; χ_{imax} – верхняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; χ_{imin} – нижняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; $\Delta\chi_i$ – отклонение (шаг) i -го параметра. Q -таблица не приводится в работе в полном объёме вследствие громоздкости.

Таблица 3

Результаты вычисления обобщённого интегрального критерия $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$

$R_{a,var}$, Ом	$L_{a,var}$, Гн	J_{var} , кг·м ²	$Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$
...	...	...	...

При реализации цифрового алгоритма контроля функционирования исследуемого электромеханического преобразователя средствами программной среды *MatLab* для получения χ -зависимостей $f\{Q[\varepsilon^*(\chi)]\}$ (см. рис. 1) целесообразно использовать блоки одномерных интерполяционных таблиц 1-D *Lookup Table* библиотеки *Lookup Tables* приложения *Simulink*. Полученные компоненты вектора обобщённого интегрального критерия необходимо расположить в Q -таблице таким образом, чтобы значения $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$ и соответствующие ему наборы контролируемых параметров в строках располагались от минимального $Q_\Sigma = 0$, соответствующего эталонным значениям параметров, до максимального.

Графическое отображение Q -таблицы в форме точечных χ -зависимостей представлено на следующих рисунках: зависимость $R_{a,var} = f(Q_\Sigma)$ показана на рис. 4, зависимость $L_{a,var} = f(Q_\Sigma)$ показана на рисунке 5, зависимость $J_{var} = f(Q_\Sigma)$ показана на рисунке 6.

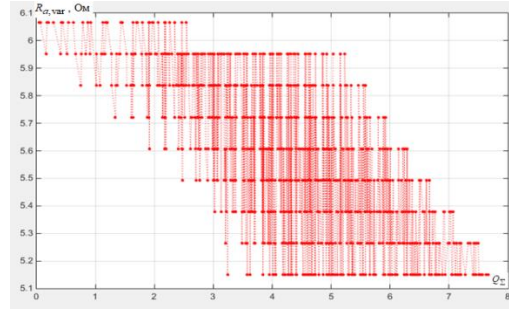


Рис. 4. Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 11$ Fig. 4. Dependence $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta = 11$

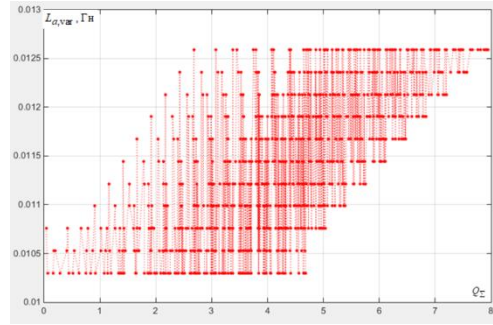


Рис. 5. Зависимость $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 11$ Fig. 5. Dependence $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta = 11$

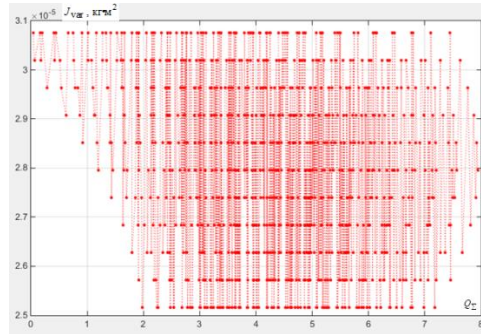


Рис. 6. Зависимость $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 11$ Fig. 6. Dependence $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta = 11$

Следует отметить, что пространство вектора нестабильных параметров χ отображается в общем случае $(r+1)$ -мерным гиперпараллелепипедом. Для рассматриваемого случая с количеством параметров $r = 3$ имеем четырехмерную зависимость $\chi = f(Q_{\Sigma})$.

На рис. 7 – 9 показаны доступные для изображения трехмерные χ -зависимости соответствующих сочетаний контролируемых нестабильных параметров: на рис. 7 показана зависимость $(R_{a,var}, L_{a,var}) = f(Q_{\Sigma})$; на рис. 8 показана зависимость $(R_{a,var}, J_{var}) = f(Q_{\Sigma})$; на рисунке 9 показана зависимость $(L_{a,var}, J_{var}) = f(Q_{\Sigma})$.

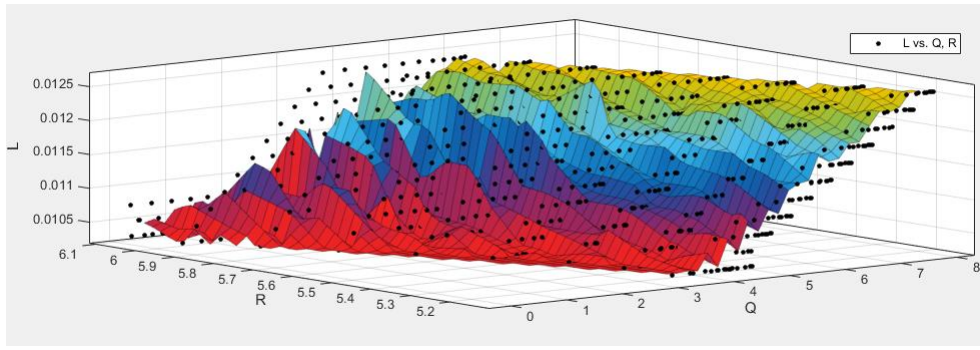


Рис. 7. Зависимость $(R_{a,var}, L_{a,var}) = f(Q_\Sigma)$
при $\beta = 11$

Fig. 7. Dependence
 $(R_{a,var}, L_{a,var}) = f(Q_\Sigma)$
at $\beta = 11$

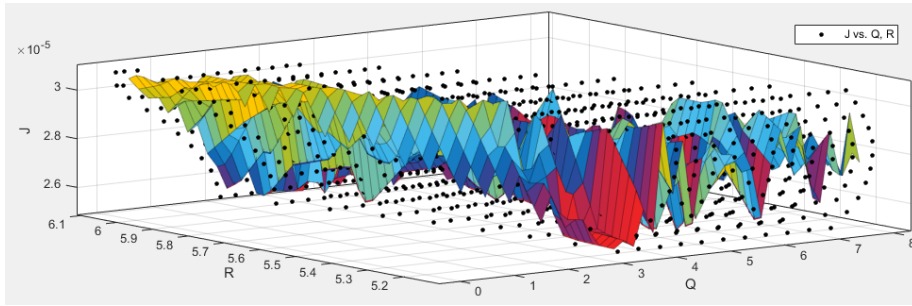


Рис. 8. Зависимость $(R_{a,var}, J_{var}) = f(Q_\Sigma)$
при $\beta = 11$

Fig. 8. Dependence
 $(R_{a,var}, J_{var}) = f(Q_\Sigma)$
at $\beta = 11$

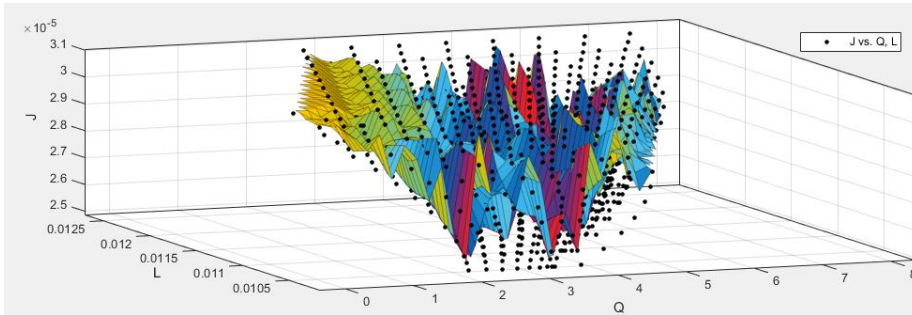


Рис. 9. Зависимость $(L_{a,var}, J_{var}) = f(Q_\Sigma)$
при $\beta = 11$

Fig. 9. Dependence
 $(L_{a,var}, J_{var}) = f(Q_\Sigma)$
at $\beta = 11$

Аналогичные расчеты были произведены при следующих заданных вариациях параметров:

$$\begin{aligned} R_{a,var} &= f(R_a; 1, 05R_a; 1, 1R_a; 1, 15R_a; 1, 2R_a); \\ L_{a,var} &= f(L_a; 1, 05L_a; 1, 1L_a; 1, 15L_a; 1, 2L_a); \\ J_{var} &= f(J; 1, 05J; 1, 1J; 1, 15J; 1, 2J). \end{aligned}$$

Полученные точечные χ -зависимости представлены на рисунке 10 – 12 соответственно.

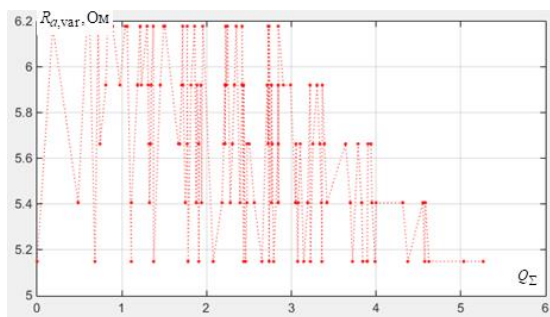


Рис. 10. Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 5$

Fig. 10. Dependence $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta =$

5

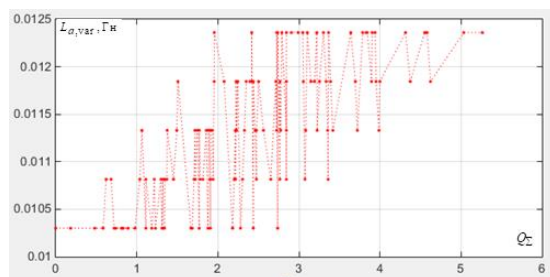


Рис. 11. Зависимость $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 5$

Fig. 11. Dependence $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta =$

5

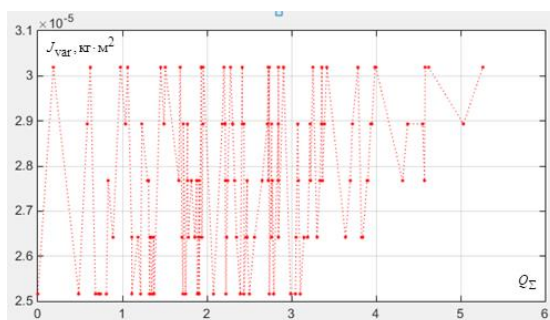


Рис. 12. Зависимость $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 5$

Fig. 12. Dependence $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta =$

5

Трёхмерные χ -зависимости для случая $\beta = 5$ с учетом всей совокупности контролируемых параметров на одном графике были построены следующим образом. Путем замены индуктивности и активного сопротивления якорной цепи электромагнитной постоянной времени $T_a = \frac{L_a}{R_a}$, получаем трехмерную зависимость $T_a, J = f(Q_{\Sigma})$, представленную на рисунке 13.

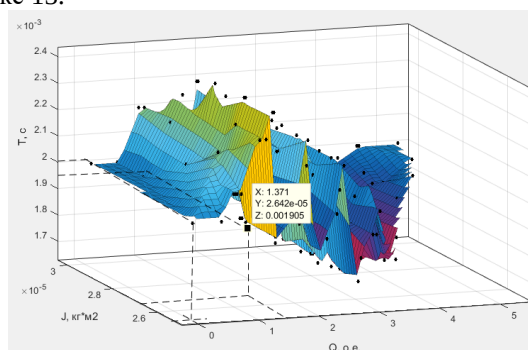


Рис. 13. Зависимость $T_a, J = f(Q_{\Sigma})$ при $\beta = 5$

Fig. 13. Dependence $T_a, J = f(Q_{\Sigma})$ at $\beta =$

5

На рис. 13 показаны узловые точки значений компонент Q -таблицы, а проекции этих точек на соответствующие оси X , Y , Z отражают численные значения обобщённого интегрального критерия Q по оси X и значения нестабильных параметров J и T по осям Y и Z соответственно. Так, например, значение $Q = 0$ соответствует номинальным параметрам ЭМП $T_a = \frac{L_a}{R_a} = \frac{0,0103}{5,15} = 0,002$ с, $J = 2,516 \cdot 10^{-5}$ кг·м². Вторая точка с координатами ($X = 1,371$; $Y = 2,642 \cdot 10^{-5}$; $Z = 0,001905$) соответствует значению $Q = 1,371$ о.е. и нестабильным параметрам $T_a = 0,001905$ с, $J = 2,642 \cdot 10^{-5}$ кг·м²

Представление точечных χ -зависимостей на плоскости является предпочтительным с точки зрения практического применения и при реализации разработанного цифрового алгоритма контроля целесообразно применять именно двумерный способ представления.

В соответствии с алгоритмом контроля функционирования ЭМП, представленном на рис. 1 Simulink-модель системы автоматизированного контроля (см. рис. 3) дополняется подсистемами вычисления оценок нестабильных параметров при $\beta = 5$ и $\beta = 11$. Зависимости $R_{a,var} = f(Q_\Sigma)$, $L_{a,var} = f(Q_\Sigma)$, $J_{var} = f(Q_\Sigma)$ сформированы в данной Simulink-модели с помощью блоков одномерных интерполяционных таблиц 1-D Lookup Table. Соответствующие Simulink-модели подсистем, реализующих точечные χ -зависимости, показаны на рисунке 14.

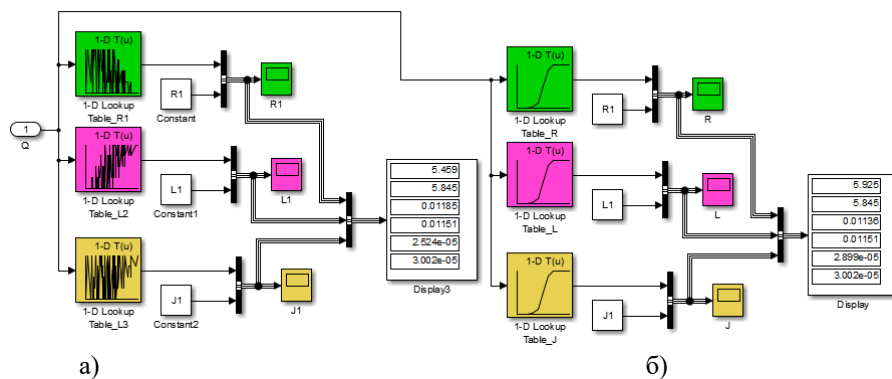


Рис. 14. Simulink-модель подсистем вычисления оценок параметров: а) $\beta = 5$; б) $\beta = 11$

Fig. 14. Simulink Model of Subsystems for Calculating Parameter Estimations: а) $\beta = 5$; б) $\beta = 11$

Моделирование проводилось при следующих детерминированно заданных значениях контролируемых нестабильных параметров:

$R=5.15$; $L=0.0103$; $J=2.516 \cdot 10^{-5}$; $c=0.072$; $R1=1.135 \cdot R$; % 5.8453 $L1=1.117 \cdot L$; % 0.0115
 $J1=1.193 \cdot J$; % 3.0016e-005

Графики, отражающие процесс оценки и, следовательно, контроля функционирования электромеханического преобразователя, представлены на рисунках. 15 – 17.

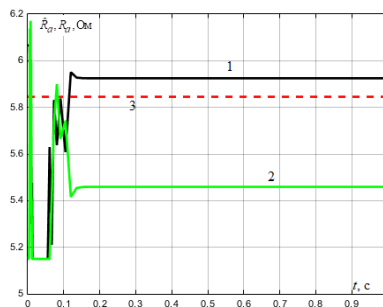


Рис. 15. Зависимости $\hat{R}_a = f(t)$: 1 – оценка активного сопротивления при $\beta = 11$; 2 – оценка активного сопротивления при $\beta = 5$; 3 – заданное значение активного сопротивления

Fig. 15. Dependencies $\hat{R}_a = f(t)$: 1 – active resistance evaluation at $\beta = 11$; 2 – active resistance evaluation at $\beta = 5$; 3 – active resistance set value

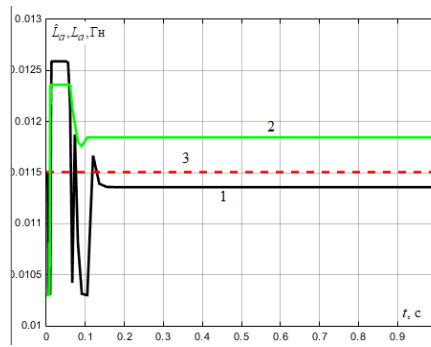


Рис. 16. Зависимости $\hat{L}_a = f(t)$: 1 – оценка индуктивности при $\beta = 11$; 2 – оценка индуктивности при $\beta = 5$; 3 – заданное значение индуктивности

Fig. 16. Dependencies $\hat{L}_a = f(t)$: 1 – inductance evaluation at $\beta = 11$; 2 – inductance evaluation at $\beta = 5$; 3 – inductance set value

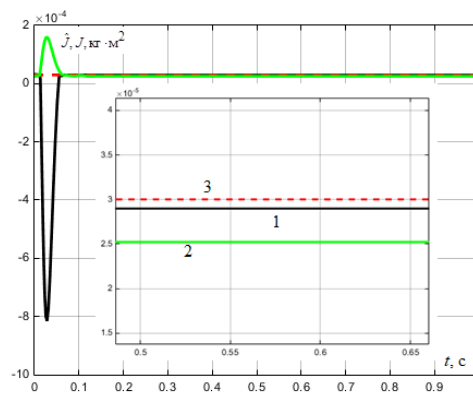


Рис. 17. Зависимости $\hat{J} = f(t)$: 1 – оценка момента инерции при $\beta = 11$; 2 – оценка момента инерции при $\beta = 5$; 3 – заданное значение момента инерции

Fig. 17. Dependencies $\hat{J} = f(t)$: 1 – moment of inertia estimate at $\beta = 11$; 2 – moment of inertia estimate at $\beta = 5$; 3 – moment of inertia set value

Из анализа полученных графиков следует, что процесс вычисления оценок нестабильных параметров электромеханического преобразователя постоянного тока не превышает 0,2 с. Установившиеся значения оценок составили, соответственно: при $\beta = 5$ $\hat{R}_a = 5,459$ Ом; $\hat{L}_a = 0,01185$ Гн; $\hat{J} = 2,524 \cdot 10^{-5}$ кг·м²; при $\beta = 11$ установившиеся значения оценок близки к заданным значениям нестабильных параметров и составляют $\hat{R}_a = 5,925$ Ом; $\hat{L}_a = 0,01136$ Гн; $\hat{J} = 2,899 \cdot 10^{-5}$ кг·м².

Относительные погрешности вычисления оценок контролируемых параметров составили, соответственно: при $\beta = 5$ $\delta_{R_a} = 6,6\%$; $\delta_{L_a} = 2,95\%$; $\delta_J = 15,92\%$; при $\beta = 11$ $\delta_{R_a} = 1,36\%$; $\delta_{L_a} = 1,21\%$; $\delta_J = 3,43\%$. Результаты проведенного исследования показали, что с уменьшением шага $\Delta\chi_i$ и увеличением коэффициента β точность оценки нестабильных параметров в заданном диапазоне изменения возрастает вследствие увеличения строк Q-таблицы и количества точек χ -зависимостей. В двух рассмотренных случаях уменьшение шага $\Delta\chi_i$ в 2,5 (при $\beta = 11$) раза не привело к существенному увеличению вычислительных мощностей и ресурсов оперативной памяти, что позволяет отдать предпочтение вычислению оценок параметров с большей точностью.

Выводы

В настоящей статье проведены разработка и исследование цифрового алгоритма контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока на основе процедуры автоматизированной оценки нестабильных параметров. Алгоритм реализован с применением градиентного метода вычисления обобщенного интегрального критерия с использованием эталонной модели объекта исследования и моделей чувствительности по контролируемым нестабильным параметрам: активному сопротивлению, индуктивности якорной цепи и моменту инерции. Рассчитанные эталонная

модель, модели чувствительности по контролируемым параметрам и результаты вычисления обобщённого интегрального критерия реализованы в дискретной форме на основе метода непосредственного программирования с применением билинейного преобразования. Получены точечные χ -зависимости с различной степенью точности, отражающие влияние вариаций компонентов вектора нестабильных параметров χ в заданном диапазоне на величину обобщённого интегрального критерия Q , который, в свою очередь, позволяет оценить значения изменившихся в процессе эксплуатации нестабильных параметров электромеханического преобразователя. Приведены различные формы представления зависимостей $f\{Q[\epsilon^*(\chi)]\}$ с возможностью замены контролируемых параметров эквивалентными величинами на примере использования электромагнитной постоянной времени, отражающей изменения значений активного сопротивления и индуктивности якорной цепи машины постоянного тока. Показаны преимущества использования точечных χ -зависимостей на плоскости и соответствующих двумерных массивов данных по сравнению с пространственными $(r+1)$ -гиперпараллелепипедами и $(r+1)$ -мерными Q -таблицами. Приведенный в работе цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока может быть реализован средствами микропроцессорной техники с применением соответствующего программного кода, что позволит оценить значения параметров объектов исследования в процессе эксплуатации и на этапе послеремонтных испытаний.

Литература

1. Saushev A., Antonenko S., Lakhmenev A., Monahov A. Parametric identification of electric drives based on performance limits // *Advances in intelligent systems and computing*. 2020. Т. 982. С. 448-458.
2. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., et al. Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models. *International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)*. V. 124.
3. Саушев А.В., Бова Е.В., Гаспарян К.К. Метод контроля состояния электротехнических систем по измеряемым характеристикам в режиме тестового диагностирования // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2016. № 6 (40). С. 169-184.
4. Хиен Ву Ань, Ягодкина Т.В. Синтез инвариантной системы адаптивного модального управления на базе следящей системы // *Фундаментальные исследования*. 2016. № 6-1. С. 52-57.
5. Малёв Н.А., Погодицкий О.В. Статистический анализ динамических характеристик асинхронного электромеханического преобразователя с изменяющимися параметрами. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019. № 21(1-2). С. 120-130.
6. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // *Вестник КГЭУ*. 2019. №1. С. 60-67.
7. Guzman J. L., Hagglund T., Veronesi M., et al. Performance indices for feed-forward control // *Journal of Process Control*. 2015. № 26. P. 26-34.
8. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.
9. Cao C. and Ren W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach // *IEEE Trans. Automatic Control*. 2012. № 57(1). P. 33-38.
10. Полюга Н.Л., Ростов Н.В. Анализ динамики адаптивных следящих приводов манипуляционного робота: сб. науч. труд. // *Материалы студ. науч. конференции «Информатика и Кибернетика» (ComCon-2016)*. СПб.: Изд-во политехнического ун-та., 2016. С. 123-126.
11. Утешев А.Ю., Тамасян Г.Ш. К задаче полиномиального интерполирования с кратными узлами // *Вестник Санкт-Петербург. ун-та. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2010. №3. С. 76-85.
12. Тараник В.А. Применение «интерполяционного многочлена Лагранжа» для функций со многими переменными // *Science Rise*. 2015. № 8. С. 69-76.
13. Егоршин А.О. Об отслеживании параметров экстремума в вариационной задаче идентификации // *Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика*. 2011. Т. 11, вып. 3. С. 95-114.

14. Forni F., Galeani S., and Zaccarian L. Model recovery anti-windup for continuous-time rate and magnitude saturated linear plants. *IEEE Trans. Automatic Control*. 2012. № 48(8). pp.1502–1513.
15. Pigg S. and Bodson M. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances acting on unknown plants // *Control Systems Technology*, IEEE Transaction. 2010. № 18(4). pp.822-836.
16. Черный С. Г. Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях // *Автоматизация процессов управления*. 2016. № 1 (43). С. 37-46.
17. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Малацон А.С. Метод формирования Q-таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. № 22(2). С. 86-97.
18. Крейнделин В.Б., Григорьева Е.Д. Развитие метода билинейного преобразования для синтеза цифровых фильтров. Материалы МНТК «INTERMATIC-2017» Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 20–24 ноября 2017 г. Москва. В сборнике: Информационные технологии и телекоммуникации. С. 1183–1185.
19. Зиятдинов С. И., Аграновский А. В., Осипов Л. А. Синтез комплексного фильтра с заданной передаточной функцией // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 7. С. 542–546.
20. Afanasiev A.P., Sokolov A.V., Voloshinov V.V. Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: Collection of Scientific Papers of the XIX International Conference DAMDID / RCDL'2017 (October 10–13, 2017, Moscow, Russia). Eds. L. A. Kalinichenko, etc. Moscow: FRC CSC RAS, с. 132-140, (2017).
21. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 31, No. 2, pp. 942–948, March 2016.
22. Larsson C.A., Annergren M., Hjalmarsson H., et al. Model predictive control with integrated experiment design for output error systems, in: *Proceedings of European Control Conference*, Zurich, Switzerland, 2013, pp. 3790-3795.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Козелков Олег Владимирович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Малацон Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, начальник отдела автоматизации ООО «Стэк Мастер»

References

1. Saushev A, Antonenko S, Lakhmenev A, et al. Parametric identification of electric drives based on performance limits. *Advances in intelligent systems and computing*. 2020;982:448-458.
2. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. *Method of analysis and monitoring of the electromechanical converters parameters based on a linear integral criterion using sensitivity models*. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), V. 124.: Available at <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912402005>.
3. Saushev AV, Bova EV, Gasparyan KK. Method of monitoring the state of electrical systems by the measured characteristics in the test diagnostics model. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after admiral S.O. Makarov*. 2016;6 (40):169-184.
4. Hien Wu An, Yagodka T.V. Synthesis of an invariant system of adaptive modal control on the basis of a tracking system. *Fundamental research*. 2016;6-1:52-57.
5. Malev NA, Pogoditsky OV. *Statistical analysis of dynamic characteristics asynchronous electric motor with changing load parameters*. Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2019;21(1-2): 120-130.

6. Malev NA, Pogoditsky OV, Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU*. 2019;1:60-67.
7. Guzman JL, Hagglund T, Veronesi M, et al. Performance indices for feed-forward control. *Journal of Process Control*. 2015;26:26-34.
8. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education*. 2015;1(1):88.
9. Cao C. and Ren W. *Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach*. IEEE Trans. Automatic Control. 2012;57(1):33–38.
10. Polyuga NL, Rostov NV. *Analysis of the dynamics of adaptive servo drives of manipulation robot: collection of scientific papers*. Materials conference «Informatics and Cybernetics» (ComCon-2016). SPb.: Publishing house of the Polytechnic University. 2016. P. 123-126.
11. Uteshev AYU, Tamasyan GSh. On the problem of polynomial interpolation with multiple nodes. *Bulletin St. Petersburg university. Applied Mathematics. Computer science. Management processes*. 2010;3:76-85.
12. Taranik VA. Application of Lagrange interpolation polynomial for functions with many variables. *Science Rise*. 2015;8:69-76.
13. Egorshin AO. On tracking the parameters of an extremum in a variational identification problem. *Bulletin NSU. Series: Mathematics, Mechanics, Informatics*. 2011;11(3):95-114.
14. Forni F, Galeani S, and Zaccarian L. *Model recovery anti-windup for continuous-time rate and magnitude saturated linear plants*. IEEE Trans. Automatic Control. 2012;48(8):1502–1513.
15. Pigg S and Bodson M. Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances acting on unknown plants. *Control Systems Technology*. IEEE Transaction. 2010;18(4):822-836.
16. Cherny SG. Modeling of process control in complex systems with non-deterministic disturbing influences. *Automation of control processes*. 2016;1 (43):37-46.
17. Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q-tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):86-97.
18. Kreindelin VB, Grigoryeva ED. *Development of the bilinear conversion method for the synthesis of digital filters*. Materials of ISTC «INTERMATIC-2017». Fundamental Problems of Radioelectronic Instrument Making. November 20–24, 2017 Moscow. In the collection: Information Technologies and Telecommunications. P. 1183–1185.
19. Ziatdinov SI, Agranovsky AV, Osipov LA. Synthesis of a complex filter with specified transfer function. *Instrumentation*. 2016;59(7):542–546.
20. Afanasiev AP, Sokolov AV, Voloshinov VV. Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: Collection of Scientific Papers of the XIX International Conference DAMDID / RCDL'2017 (October 10–13, 2017, Moscow, Russia). Eds. L. A. Kalinichenko, etc. Moscow: FRC CSC RAS, c. 132-140, (2017).
21. Kim, S., Overbye, TJ. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst*. 2016;31(2):942–948.
22. Larsson CA, Annergren M, Hjalmarsson H. *Model predictive control with integrated experiment design for output error systems* in: Proceedings of European Control Conference, Zurich, Switzerland. 2013. pp. 3790-3795.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Kozelkov – Kazan State Power Engineering University

Malacion S. Alexey – Head of Automation Department «Stack Master» LLC.

Получено

14.02.2022г.

Отредактировано

28.02.2022г.

Принята

10.03.2022г.



ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПЛАВНОГО ПУСКА ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Ш.Т. Дадабаев¹, Е.И. Грачева²

¹Худжандский политехнический институт таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан

²Казанский государственный энергетический Университет, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка методики по проведению технико-экономического обоснования при применении системы плавного пуска на основе инвертора тока для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов оросительных насосных станций первого подъема. *МЕТОДЫ.* Исследования и расчеты проведены в соответствии с алгоритмом составления энергетического баланса насосных установок, а также с применением анализа статистических данных. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Представлено технико-экономическое обоснование целесообразности внедрения систем плавного пуска для оросительных насосных станций первого подъема, где, как правило, устанавливаются мощные синхронные электродвигатели. Предложена методика определения экономической эффективности систем или устройств плавного пуска для электроприводов насосных станций. Обосновано рациональное применение альтернативного устройства плавного пуска на основе инвертора тока. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определение экономической эффективности внедрения устройств плавного пуска остается сложной задачей, так как условия эксплуатации объектов требуют учета различных воздействующих факторов, не всегда поддающихся точной оценке. Это является проблемой разработки универсальной методики оценки экономической эффективности внедрения устройств плавного пуска. Предложенная методика для определения экономической эффективности таких систем, основанная на известных методах, дополняет и упрощает процесс расчетов и вычислительных алгоритмов.

Ключевые слова: насосная станция; инвертор тока; устройства плавного пуска; синхронный двигатель; технический ресурс; экономический эффект.

Для цитирования: Дадабаев Ш.Т., Грачева Е.И. Техничко-экономическое обоснование применения системы плавного пуска для высоковольтных электродвигателей насосных агрегатов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 141-150. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-141-150.

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR APPLICATION OF A SOFT START SYSTEM FOR HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS OF PUMPING UNITS

ST. Dadabaev¹, EI. Gracheva²

¹Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan

²Kazan State Power Engineering University, Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-2573-759X>, shahbozdadoboev@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of a methodology for conducting a feasibility study when using a soft start system based on a current inverter for high-voltage electric motors of pumping units of irrigation pumping stations of the first lift. *METHODS.* Research and calculations were carried out in accordance with the algorithm for compiling the energy balance of pumping units, as well as using the analysis of statistical data. *RESULTS.* A feasibility study is presented for the feasibility of introducing soft start systems for irrigation

pumping stations of the first lift, where, as a rule, powerful synchronous electric motors are installed. A method for determining the economic efficiency of systems or soft starters for electric drives of pumping stations is proposed. The rational use of an alternative soft starter based on a current inverter is substantiated. **CONCLUSION.** Determining the economic efficiency of introducing soft starters remains a difficult task, since the operating conditions of facilities require taking into account various influencing factors that are not always amenable to accurate assessment. This is the problem of developing a universal methodology for assessing the economic efficiency of introducing soft starters. The proposed methodology for determining the economic efficiency of such systems, based on known methods, complements and simplifies the process of calculations and computational algorithms.

Keywords: pumping station; current inverter; soft starters; synchronous motor; technical resource; economic effect.

For citation: Dadabaev ST, Gracheva EI. Technical and economic justification for application of a soft start system for high-voltage electric motors of pumping units. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(1): 141-150. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-141-150.

Введение

В настоящее время на рынке электротехнической продукции наблюдается большое разнообразие высоковольтных пусковых устройств. Наиболее известными фирмами, выпускающими высоковольтные системы плавного пуска (СПП), являются: *Siemens, ABB, General Electric*, ИК «Технорос», АОЗТ «Элетекс», ООО НПП «ЭКРА», ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПИР», компания АБС «Электро» и др. В соответствии с техническими особенностями и ценами на эту продукцию, можно сделать вывод о возможности применения той или иной схемы преобразователей для электроприводов (ЭП) различных мощностей. Так, например, для регулируемого электропривода мощностью до 630 кВт, целесообразно применение низковольтных преобразователей частоты (ПЧ) с понижающим трансформатором. Если мощность регулируемого электропривода достигает 630 – 1000 кВт, то целесообразно применить ПЧ с активными выпрямителями на ГТО или многоуровневых схем на IGBT транзисторах. При мощностях более 1 МВт рекомендуется многоуровневые преобразователи с многообмоточными трансформаторами. Сегодня средняя стоимость низковольтных ПЧ составляет от 1500 руб/кВт, однако с учетом трансформатора на входе преобразователя цена увеличится, и будет составлять от 2500 руб/кВт. Цены на высоковольтные преобразователи у разных производителей могут отличаться и определяются только после заказа продукции [1-4]. Тем не менее, средняя стоимость высоковольтных ПЧ на сегодня составляет, примерно, от 2000 до 12000 руб/кВт, а цены на высоковольтные устройства плавного пуска (УПП) составляют от 1200-2500 руб/кВт. Из многочисленных видов оборудования следует выделить преобразователь производства компании ООО НПП «ЭКРА», который основан на работе инвертора тока. Данное устройство - «ШПТУ-ВИ» - представляет собой тиристорный ПЧ с управляемым выпрямителем и зависимым инвертором тока [5-9]. Такой преобразователь является наиболее простым и экономически выгодным схемотехническим решением для пуска мощных электродвигателей [10-14].

Объект исследования

Согдийская область расположена на севере Республики Таджикистан и имеет общую площадь 25,2 тысяч кв. км [2]. Население области составляет более 2,7 млн. человек и средняя плотность населения на 1 кв. км., при этом, 102 человека. Область делится на 10 районов и имеет в своем составе 8 городов. Территорию области, в основном, занимают горные массивы. Главной водной артерией Согдийской области является река Сырдарья. По данным областного комитета по землеустройству, в 2020 году общая площадь орошаемых земель Согдийской области составила 253,4 тысячи гектаров. По данным Управления мелиорации и ирригации (УМИ) Согдийской области в том же году земледельцам области было поставлено 1,5 млрд. м³ воды. Во всех районах области оборудование оросительных насосных станций (ОНС) имеет значительный износ, срок его эксплуатации давно истек и требуют значительных финансовых капиталовложений для модернизации [15-17]. Каждый год в ОНС области фиксируются многочисленные аварии, вызванные отклонениями напряжения в сети и т.д. Анализ проблемы показывает, что отклонения напряжения в энергосистеме Согдийской области возникают при переходных режимах высоковольтных

электродвигателей насосных агрегатов. Мощные агрегаты, в основном, установлены на первом подъеме ОНС Аштского, Зафарабадского и Б. Гафуровского районов. Каждый пуск агрегатов на этих объектах вызывает отклонение напряжения, провалы напряжения, перенапряжение, мигание и т.п. По статистическим данным УМИ в Согдийской области в сезоны орошения 2018 – 2019 г, только в ОНС Б. Гафуровского и Аштского района по причине низкой надежности питающей сети были зафиксированы 27 отключений насосных агрегатов (см. рис. 1).

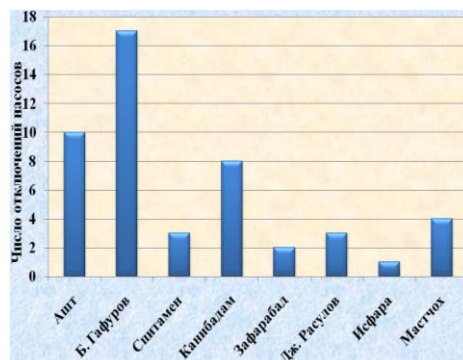


Рис. 1. График отключения насосных агрегатов в НС районов Согдийской области за период 2018 г.

Fig. 1. Schedule of shutdown of pumping units in the NS districts of Sughd region for the period of 2018.

В настоящее время для устранения причин таких негативных явлений предпринимается недостаточно мер и, в результате этого, происходят многочисленные отключения и срабатывания защиты как в системе электроснабжения (СЭС), так и в ЭП ОНС. Самыми неустойчивыми СЭС являются СЭС Б. Гафуровского и Аштского районов Согдийской области, в которых наблюдается 65% отключений из всех зарегистрированных в области за указанный период.

В развитых странах для повышения надежности СЭС насосных станций, применяют СПП для ВЭД [18-20]. Эти системы ограничивают пусковые токи и знакопеременные электромагнитные моменты двигателей, а также минимизируют при пуске отклонения напряжения питающей сети [5, 6, 8]. Примерами СПП для ВЭД являются пуск при помощи УПП или пуск с помощью ПЧ. Стоимость ПЧ, в среднем, в 2-3 раза дороже, чем УПП, поэтому при выборе СПП необходимо учесть и финансовую стоимость оборудования [21-23].

Альтернативным и перспективным способом плавного пуска, предлагаемым в данной работе, является пуск высоковольтных электродвигателей с инвертором тока. Этот тип преобразователя недостаточно изучен в настоящее время и поэтому требует дальнейших исследований [9, 11]. По данным некоторых производителей такой продукции и лабораторным испытаниям в процессе проектирования известно, что пуск с помощью данных преобразователей уменьшает пусковые токи до $1,3 I_{ном}$ и имеет наилучшие показатели отклонения напряжения при пуске. Кроме того, цены на такие устройства ниже, чем на традиционные ПЧ, что дает, кроме технических преимуществ, еще и экономическую эффективность [12, 14]. Для принятия технического решения, как правило, необходимо проводить детальное технико-экономическое обоснование проекта для исследуемого объекта.

В качестве объекта исследования рассматривается ОНС первого подъема АНС-1 Аштского района. Технические данные АНС-1 представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Номинальные данные насосных установок АНС-1

№	Установка	Назначение	H , м	Q , м ³ /час	$n_{ном}$, об/мин	η , %	$P_{ном}$, кВт
1	1200В-6,3/100-А (52В11)	Резерв	88	22680	375	88	8000
2	1200В-6,3/100-А (52В11)	Перекачивание воды	88	22680	375	88	8000
3	1200В-6,3/100-А (52В11)	Перекачивание воды	88	22680	375	88	8000

4	1200В-6,3/100-А (52В11)	Резерв	88	22680	375	88	8000
---	----------------------------	--------	----	-------	-----	----	------

Таблица 2

Номинальные данные электродвигателей насосных агрегатов АНС-1

№	Наименование	Обозначение	Значение
1	Тип электродвигателя	ВДС2-325/69-16 УХЛ4	
2	Количество электродвигателей		4
3	Мощность электродвигателя, МВт	$P_{ном}$	8
4	Ток статора, А	I_1	540
5	Напряжение статора, кВ	U_1	10
6	Ток ротора, А	I_2	400
7	Напряжение ротора, кВ	U_2	0,16
8	Частота вращения, об/мин	$n_{ном}$	375
9	КПД, %	H	95,9
10	Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,9
11	Тип возбудителя	ТВУ-8	
12	Год ввода в эксплуатацию		1979

Методика проведения технико-экономического обоснования

Представим последовательность алгоритма технико-экономического обоснования принятия технического решения.

Суммарная мощность, которая необходима для транспортировки продукта без потерь по трубопроводу [24, 25]:

$$\Delta P_{тр} = \gamma \cdot (H_1 - H_C) \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{тр} = \gamma \cdot (H_1 - H_C) \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}$ кВт; H_C – статический напор магистрали, м; γ – удельный вес продукта, кг/м³; Q – подача воды, м³/с; H_1 – выбирается по H - Q характеристике насоса для рабочей точки мощности электродвигателя.

Потери напора на задвижке определяются по формуле

$$\Delta H_3 = H_{вх.3} - H_2 \text{ м}, \quad (2)$$

где $H_{вх.3}$ – манометрический напор на входе задвижки; H_2 – манометрический напор на выходе задвижки.

Гидравлическое сопротивление на задвижке равно

$$S_3 = \frac{\Delta H_3}{Q^2} \text{ с}^2/\text{м}^5, \quad (3)$$

где ΔH_3 – потери напора на задвижке.

Потери мощности на задвижке агрегата

$$\Delta P_{з.дв} = \gamma \cdot \Delta H_3 \cdot Q \cdot 9,81 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}. \quad (4)$$

Напор, создаваемый насосным агрегатом, определяется

$$H_{н1} = H_{вых1} - H_{вх} \text{ м}, \quad (5)$$

где $H_{вых1}$ – напор на выходе работающего насосного агрегата, м; $H_{вх}$ – напор на входе насосного агрегата, м.

Мощность на валу ЭД, определяемая по характеристике агрегатов с учетом КПД

$$P_{с1} = \frac{P_{н1}}{\eta_{дв}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{н1} \cdot 9,81 \cdot 10^{-3}}{\eta_{н1} \cdot \eta_{дв}} \text{ кВт}, \quad (6)$$

где $\eta_{н1}$ – коэффициент полезного действия насоса;

$\eta_{дв}$ – коэффициент полезного действия электродвигателя.

Потери мощности при работе насосных агрегатов определяется по следующей формуле

$$\Delta P_{\text{НА1}} = \gamma \cdot Q \cdot H_{\text{Н}} \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{1 - \eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}}{\eta_{\text{Н}} \cdot \eta_{\text{ДВ}}} \right) \text{ кВт.} \quad (7)$$

Общий баланс мощности при работе насосного агрегата [24, 25]:

$$P_{\text{С}} = P_{\text{Т}} + \Delta P_{\text{НА}} + \Delta P_{\text{ЗАДВ}} \text{ кВт,} \quad (8)$$

где $P_{\text{Т}}$ – мощность транспортировки воды без учета потерь, кВт;

$\Delta P_{\text{НА}}$ – мощность потерь в НА, кВт;

$\Delta P_{\text{ЗАДВ}}$ – потери мощности на регулирующих задвижках на входе водовода, кВт.

Электроэнергия на транспортировку продуктов за год, включая расход на регулирование, составит

$$W = P_{\text{С}} \cdot \tau \text{ кВт·ч,} \quad (9)$$

где τ – годовой бюджет времени работы, ч.

Дополнительные потери мощности определяются по формуле

$$\Delta P = P_{\text{С}} - P_{\text{Т}} \text{ кВт.} \quad (10)$$

Дополнительные потери электроэнергии за год

$$\Delta W = \Delta P \cdot \tau \text{ кВт·ч.} \quad (11)$$

Суммарная суточная экономия электроэнергии при использовании ПЧ определяется

$$\Delta W_{\text{СУТ}} = \sum_i^k \Delta P_i \cdot t_i, \quad (12)$$

где $\Delta W_{\text{СУТ}}$ – суточная экономия электроэнергии при применении ПЧ, кВт·ч;

ΔP_i – экономия мощности за i -й период, кВт;

t_i – время, в течение которого привод работает с постоянной нагрузкой, час.

Годовая экономия электроэнергии определяется

$$\Delta W_{\text{ГОД}} = 365 \cdot \Delta W_{\text{СУТ}}. \quad (13)$$

Стоимость сэкономленной электроэнергии по действующему тарифу

$$CT_{\text{ЭЭ}} = T_{\text{Э}} \cdot \Delta W_{\text{ГОД}}, \quad (14)$$

где $CT_{\text{ЭЭ}}$ – стоимость сэкономленной электроэнергии и ресурсов, руб;

$T_{\text{Э}}$ – тариф на электроэнергию в энергосистеме, руб./кВт·ч.

Срок окупаемости ПЧ можно определить по формуле

$$T_{\text{ОК}} = \frac{CT_{\text{ПЧ}}}{CT_{\text{ЭЭ}}}, \quad (15)$$

где $T_{\text{ОК}}$ – срок окупаемости ПЧ, год;

$CT_{\text{ПЧ}}$ – стоимость ПЧ, руб.

Результаты расчетов

В настоящее время в ОНС АНС-1 используется дискретный способ регулирования производительности насосных агрегатов, который не требует использования регулируемого электропривода. Поэтому при расчете экономии электроэнергии с ПЧ по формуле (12) для АНС-1, значение экономии энергии будет равно нулю или будет иметь очень малое значение. Следовательно, срок окупаемости ПЧ, определяемый по формуле (15), для АНС-1 будет очень большим, а внедрение экономически нецелесообразным. Цель использования УПП в насосных станциях обычно является не экономия потребляемой энергии, а увеличение технического ресурса электрооборудования, что в итоге приведет к положительному экономическому эффекту. В таблице 3 приведены экономические и технические параметры различных СПП для плавного пуска мощных двигателей.

Данные таблицы 3 показывают большую эффективность использования инвертора тока, чем УПП и ПЧ. Технические характеристики инвертора тока и УПП близки, но параметр ограничения пускового тока лучше у инвертора тока. Для электродвигателя

мощностью 8 МВт стоимость ПЧ, ориентировочно, в 2-4 раза выше, чем УПП и инвертора тока. Также КПД инвертора тока выше на 2-5%, чем КПД ПЧ. С учетом цены (16 млн. рублей) на инверторы тока мощностью 8 МВт, и затраты на ежегодные плановые и внеплановые ремонты в АНС-1, которые за последние пять лет составили более 33 млн. рублей, предложенный вариант модернизации НС является целесообразным.

Таблица 3.

Экономические и технические показатели систем для плавного пуска

№	Наименование параметра	Системы для плавного пуска		
		ПЧ	УПП	Инвертор тока
1	Мощность двигателя, кВт	8000	8000	8000
2	Стоимость устройства, млн. рублей.	30 - 50	15 - 16	15 - 16
3	Возможность пуска группы двигателей с одним устройством	нет	да	да
4	Ограничения пускового тока	до $3I_{ном}$	до $3I_{ном}$	до $1,3I_{ном}$
5	Возможность регулирования скорости двигателей	да	нет	нет
6	Экономия электроэнергии (для станции АНС-1)	0	0	0
7	КПД устройства, %	95 - 98	99,5 - 99,9	99,5 - 99,9

Согласно статистическим данным, в 2018 и 2019 годах в АНС-1 было зафиксировано более 8 аварий. Крупная авария 2020 года повлекла за собой двухнедельную остановку водоснабжения аграрной отрасли всего района и ее последствия негативно сказались на качестве и количестве сельхозпродукции района. В результате произошедшей аварии, в Аштском районе в 2020 году было собрано хлопка на 2,1 тысяч тонн меньше, чем в 2019 году. Кроме того, из-за остановки подачи воды качество фруктов оказалось на низком уровне, в результате чего, экспортная цена было существенно занижена и земледельцы района понесли значительные финансовые убытки. В таблице 4 приведены данные о затратах на ремонтные работы в ОНС района, и объем сбора сельхозпродукции за последние 5 лет.

Приведенные в таблице 4 данные получены из докладов и отчетов Управления мелиорации и ирригации Согдийской области. Данные таблицы 4 показывают, что в период за 2017-2022 годы, для насосных станций Аштского района были затрачены на ремонт оборудования и другие профилактические работы значительные средства, однако технический ресурс оборудования НС района так и остался на критическом уровне. Для решения данной проблемы требуется комплексный подход и, в первую очередь, модернизация электропривода ОНС. Крупная авария 2020 года показала, что технический ресурс электрооборудования имеет важное значение для функционирования таких объектов, а недостаточный технический ресурс приводит к значительным финансовым издержкам.

Таблица 4

Затраты на ремонтные работы в насосных станциях Аштского района

Год	Затраты на ремонт ОНС и др. проф. работ, млн. рублей	Площадь орошаемых земель, га	Объем сбора сельхозпродукции, тысяч тонн
2022	9,67		
2021	4	17134	19,2 (хлопок)
2020	6,69	16750	20 (фрукты), 13,8 (хлопок)
2019	2		20 (фрукты) 15,9 (хлопок)
2018	4	16743	14,5 (хлопок)
2017	7,12	16740	14,9 (хлопок)

Согласно предложенной методики для проведения технико-экономического обоснования СПП (формулы 1-15) и данным таблиц 1-4, для ОНС АНС-1 выполним расчеты для определения экономической эффективности внедрения СПП.

Общий баланс мощности при работе одного насоса в АНС-1

$$P_C = P_T + \Delta P_{з\Delta ДВ} + \Delta P_{НА} = 4506 + 462,25 + 887 = 5855 \approx 5860 \text{ кВт.}$$

Расход электроэнергии на транспортировку воды за сезон орошения (с апреля по сентябрь, 6 месяцев, $\tau = 4400$ часов) составит:

$$W = P_c \cdot \tau = 5860 \cdot 4400 = 25784000 \text{ кВт.ч.}$$

Тариф на электроэнергию в энергосистеме, согласно данным Министерства энергетики и промышленности Республики Таджикистан, на 2021 год для сферы мелиорации составляет 7,87 дирамов (с апреля по сентябрь), что эквивалентно 0,5264 рублям РФ (по курсу ЦБ РФ, 1 рубль - 0,1495 сомони на 8.02.2022 г) [26, 27].

Тогда, стоимость электроэнергии по действующему тарифу составит

$$CT_{\tau} = 0,5264 \cdot 25784000 = 13572697,6 \text{ рублей.}$$

В соответствии с типовыми методиками, средняя экономия при применении СПП достигает 15-20 %, тогда стоимость сэкономленной электроэнергии по действующему тарифу составит

$$CT_{\tau\tau} = 0,2 \cdot 13572698 = 2714540 \text{ рублей.}$$

Срок окупаемости СПП с инвертором тока необходимо определить для двух насосных агрегатов АНС-1 (обычный режим работы станции АНС-1), так как данная система может поочередно запускать до четырех агрегатов.

Тогда, с учетом цены СПП, срок окупаемости составит

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{16000000}{2 \times 2714539,5} \approx 2,95 \text{ год.}$$

Срок окупаемости СПП с учетом затрат на монтаж системы (15% от общей цены СПП)

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{1,15 \times 16000000}{2 \times 2714539,5} \approx 3,39 \text{ год.}$$

При проведении вычислений с учетом затрат на ремонты и профилактические работы, которые за последние три года составили 20,4 млн. рублей, (согласно данным таблицы 4), получим

$$T_{ок} = \frac{CT_{СПП}}{CT_{\tau\tau}} = \frac{16000000}{6800000} = 2,35 \text{ год,}$$

где $CT_{\tau\tau}$ – средняя стоимость затрат на ремонты, обслуживание и др. работы (за последние 3 года), $20,4/3=6,8$ млн. рублей.

Срок окупаемости СПП по проведенным расчетам и с учетом основных определяющих факторов составил от 2,35 до 3,39 года, что является показателем эффективного внедрения СПП. Для СПП больших мощностей, в нашем случае 8 МВт, рекомендуемый срок окупаемости составляет от 2 до 4 лет. Ожидаемая экономия финансовых средств от внедрения инвертора тока в АНС-1 по проведенным расчетам, может составлять от 1 до 3 млн. рублей в год.

Выводы

Результаты расчетов показали, что при использовании СПП на основе инвертора тока в ОНС достигается оптимальный режим работы объекта, как в технических, так и экономических аспектах. На конкретном примере показана рациональность применения СПП, при этом увеличивается технический ресурс оборудования и срок его службы в ОНС. Каждый прямой пуск электродвигателя приводит к износу и старению частей всего оборудования ОНС. При этом техническое обслуживание и ремонты могут обеспечить только устранение результатов аварий, но не устраняют причины их возникновения. Поэтому при отсутствии принятия технических решений, для оборудования ОНС, будут нужны частые профилактические ремонты, а также значительно возрастут затраты для стационарного функционирования объекта. Проведенные исследования аналогичных объектов в России и других странах доказывают эффективность применения СПП, однако, экономическая составляющая использования СПП является предметом обсуждения. Спор и недооценка СПП обычно возникает в случае неверного анализа ее применения. Например, на объектах, где необходимо использовать регулируемый электропривод, - применение УПП, как правило, неэффективно. В случае же ЭП с постоянными нагрузками – целесообразность применения СПП очевидна. Поэтому для каждого объекта необходимо проводить детальную процедуру обоснования применения СПП. Предложенная методика с

учетом других известных алгоритмов будет способствовать уточнению результатов технико-экономического обоснования СПП в ЭП насосных станций и подобных системах в целом.

Литература

1. Крысанов В.Н., Гамбург К.С., Руцков А.Л. Оценка экономического эффекта от применения устройств плавного пуска с использованием принципов нейросетевого управления. Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. № 5 (53) 2013. С. 21-25.
2. Статистический ежегодник Согдийской области. Таджикистан: 30 лет государственной независимости. Главное управление Агентства по статистике при Президенте Республики Таджикистан в Согдийской области, 2021 г.
3. Инвестиционная программа «Развитие систем водоснабжения и водоотведения города Альметьевск на 2012-2014 годы» (с изменениями на 2013-2014 годы).
4. Krause, P. C. et al., Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 3rd edition, 2013.
5. Дадабаев Ш.Т. Моделирование режимов пуска высоковольтного синхронного электропривода с устройством плавного пуска. В сборнике: САПР и моделирование в современной электронике. Сборник научных трудов 1 Международной научно-практической конференции. Под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина. 2017. С. 91-94.
6. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование нагрева синхронных электроприводов насосных агрегатов при различных способах пуска. В сборнике: Перспективные информационные технологии (ПИТ 2017). Труды Международной научно-технической конференции. 2017. С. 76-80.
7. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллаев Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ 2018. № 4 (40). С. 53-65.
8. Дадабаев Ш.Т. Обзор и оценка способов управления насосными установками. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 12. С. 28-30.
9. Khasanov S.R., Gracheva E.I., Toshkhodzhaeva M.I., et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. E3S Web Conf., 178 (2020) 01051. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801051>.
10. Sen P.C. Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.
11. Tolibjonovich D.S., Islomovna T.M., Saidulloevna M.D. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network. European Journal of Electrical Engineering, V. 22, No. 1, pp. 23-28. <https://doi.org/10.18280/ejee.220103>
12. Дадабаев Ш.Т. Особенности механических характеристик электроприводов с вентиляторным характером нагрузки. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 11. С. 29-34.
13. Дадабаев Ш.Т. Компьютерное моделирование инвертора тока используемое для пуска высоковольтных электродвигателей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 370-375.
14. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах / Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. 172 с.
15. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац; пер. с нем. М. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 735 с.
16. Gracheva E.I., Naumov O.V. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), (2019). P. 6.
17. Дадабаев Ш.Т. Исследование эффективности пуска высоковольтных синхронных электродвигателей при помощи инвертора тока. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 618-621.
18. Bruce F.M., Graefe R.J., Lutz A. & Panlener M.D. Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, V. IA- 20, No. 1, pp. 46-55, January/February 1984.
19. Nevelsteen J. & Aragon H., Starting of Large Motors -Methods and Economics, IEEE Transactions on Industry Applications, V. 25, No. 6, pp. 1012-1018, November/December 1989.
20. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Математическая модель влияния природных и эксплуатационных факторов на надёжность влэп-110 кв в условиях резко континентального климата. Вестник КГЭУ 2020. № 1 (45). С. 71-81.

21. Гизатуллин Р.М., Павлова Э.И., Мухаммадиев А.А. Помехоустойчивость вычислительной техники при воздействии электромагнитных помех по сети электропитания. Вестник КГЭУ 2019. № 3 (43). С. 87-98.

23. Wu B. and Narimani M. High-Power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2017.

23. Chapman S. Electric Machinery Fundamentals, Mcgraw Hill Higher Education; 5th Edition, 2011.

24. Калинин А.Г. Исследование и разработка энергоэффективных режимов электроприводов в системах электроснабжения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Чебоксары 2011.

25. Ларионов В.Н., Калинин А.Г. Энергоэффективность и энергосбережение в электроприводах с вентиляторной нагрузкой. Чебоксары: Изд-во. Чуваш. Ун-та, 2012. 146 с.

26. Электронный ресурс. Доклад управлению мелиорации и ирригации Республики Таджикистан. <https://sadoimardum.tj/nishast-oi-matbuot/agentii-be-doshti-zamin-va-obyor-az-bar-i-to-ik-321-9-million-somon-arzdor-ast/>. Ссылка активна на : 8.02.2022 г.

27. Электронный ресурс. Тарифы электричество в Таджикистане. https://halva.tj/news/v_tadzhikistane_povysyat_tarify_na_elektrichestvo. Ссылка активна на: 8.02.2022 г.

Авторы публикации

Дадабаев Шахбоз Толибджонович – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение и Автоматика» Худжандского политехнического института таджикского технического Университета имени академика М.С. Осими, г. Худжанд, Таджикистан.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Krysanov VN, Gamburg KS, Rutskov AL. Otsenka ekonomicheskogo effekta ot primeneniya ustroystv plavnogo pushka s ispol'zovaniyem printsipov neyrosetevogo upravleniya. *Energoresursosberezheniye i energoeffektivnost'*. 2013;5 (53):21-25.

2. Statisticheskiy yezhegodnik Sogdiyskoy oblasti. Tadjhikistan: 30 let gosudarstvennoy nezavisimosti. Glavnoye upravleniye Agenstva po statistike pri Prezidente Respubliki Tadjhikistan v Sogdiyskoy oblasti, 2021.

3. Investitsionnaya programma «Razvitiye sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya goroda Al'met'yevsk na 2012-2014 gody» (s izmeneniyami na 2013-2014.).

4. Krause PC, et al. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press, 3rd edition, 2013.

5. Dadabaev ST. Modelirovaniye rezhimov pushka vysokovol'tnogo sinkhronnogo elektroprivoda s ustroystvom plavnogo pushka. V sbornike: SAPR i modelirovaniye v sovremennoy elektronike. *Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Pod red. Potapova LA., Drakina AYU. 2017. pp. 91-94.

6. Dadabaev ST. Komp'yuternoye modelirovaniye nagreva sinkhronnykh elektroprivodov nasosnykh agregatov pri razlichnykh sposobakh pushka. *Perspektivnyye informatsionnyye tekhnologii* (PIT 2017). Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. 2017. pp. 76-80.

7. Gracheva EI, Alimova AN, Abdullazyanov RE. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoy moshchnosti i elektroenergii v nizkovol'tnykh tsekhovykh setyakh. *Vestnik KGEU*. 2018;4 (40):53-65.

8. Dadabaev ST. Obzor i otsenka sposobov upravleniya nasosnymi ustanovkami. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont*. 2013;12:28-30.

9. Khasanov SR, Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI, et al. Reliability modeling of high-voltage power lines in a sharply continental climate. E3S Web Conf., 178 (2020) 01051. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801051>.

10. Sen PC. Principle of Electric Machines and Power Electronics, 3rd Edition, Wiley, 2013.

11. Tolibjonovich DS, Islomovna TM, Saidulloevna MD. (2020). Modeling of starting transition processes of asynchronous motors with reduced voltage of the supply network.

European Journal of Electrical Engineering. 2020;22(1):23-28.
<https://doi.org/10.18280/ejee.220103>.

12. Dadabaev S.T. Osobennosti mekhanicheskikh kharakteristik elektroprivodov s ventilyatornym kharakterom nagruzki. Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont. 2013. № 11. S. 29-34.

13. Dadabaev ST. Komp'yuternoye modelirovaniye invertora toka ispol'zuyemoye dlya puska vysokovol'tnykh elektrodvigately. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.* 2019;2:370-375.

14. Pozdeyev AD. *Elektromagnitnyye i elektromekhanicheskiye protsessy v chastotno-reguliruyemykh asinkhronnykh elektroprivodakh.* Cheboksary: Izd-vo Chuvash. un-ta, 1998. 172 p.

15. Kovach KP, Rats I. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka.* M. L.: Gosenergoizdat. 1963. 735 p.

16. Gracheva EI, Naumov OV. Estimation of Power Losses in Electric Devices of the Electrotechnical Complex. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM),* (2019). P. 6.

17. Dadabaev ST. Issledovaniye effektivnosti puska vysokovol'tnykh sinkhronnykh elektrodvigately pri pomoshchi invertora toka. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki.* 2018;10:618-621.

18. Bruce FM, Graefe RJ, Lutz A. & Panlener MD. Reduced-Voltage Starting of Squirrel-Cage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 1984;IA-20:1:46-55, January/February 1984.

19. Nevelsteen J. & Aragon H, Starting of Large Motors - Methods and Economics. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 1989;25(6):1012-1018, November/December.

20. Toshkhodzhaeva MI, Khodzhiyev AA. Matematicheskaya model' vliyaniya prirodnykh i ekspluatatsionnykh faktorov na nadozhnost' vlep-110 kv v usloviyakh rezko kontinental'nogo klimata. *Vestnik KGEU.* 2020;1 (45):71-81.

21. Gizatullin RM, Pavlova EI, Mukhammadiyev AA. Pomekhoustoychivost' vychislitel'noy tekhniki pri vozdeystvii elektromagnitnykh pomekh po seti elektropitaniya. *Vestnik KGEU.* 2019;3 (43):87-98.

22. Wu B. and Narimani M. *High-Power converters and AC drives.* Wiley-IEEE Press, 2nd edition, 2017.

23. Chapman S. *Electric Machinery Fundamentals.* Mcgraw Hill Higher Education; 5th Edition, 2011.

24. Larionov VN, Kalinin AG. *Energoeffektivnost' i energosberezheniye v elektroprivodakh s ventilyatornoy nagruzkoy.* Cheboksary: Izd-vo. Chuvash. Un-ta, 2012. 146 p.

26. Electronic resource. *Report of the Department of Melioration and Irrigation of the Republic of Tajikistan.* <https://sadoimardum.tj/nishast-oi-matbuot/agentii-be-doshti-zamin-va-obyor-az-bar-i-to-ik-321-9-million-somon-arzdor-ast/> Accessed to: 02/08/2022.

27. Electronic resource. Electricity tariffs in Tajikistan. https://halva.tj/news/v_tadzhikistane_povysyat_tarify_na_elektrichestvo/ Accessed to: 02/08/2022.

Authors of the publication

Shakhboz T. Dadabaev – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Automation of the Khujand Polytechnic Institute of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Khujand, Tajikistan.

Elena I. Gracheva – Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Kazan State Power Engineering University, Doctor of Technical Sciences.

Получено 09.03.2022г.

Отредактировано 18.03.2022г.

Принято 22.03.2022г.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.315.17

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА СВЕРХБОЛЬШИХ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

Д.А. Иванов

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>, ivanov.da@kgeu.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ описанного исследования является изучение влияния частичных разрядов на физическое состояние обнаруженных ранее дефектов в высоковольтных изоляторах. В статье описаны результаты, полученные комплексом бесконтактных методов для проведения дистанционной диагностики высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением в процессе эксплуатации с использованием двухканального устройства дистанционной диагностики. МЕТОД измерения основан на регистрации частичных разрядов электромагнитным и акустическим датчиками. С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были изучены характеристики частичных разрядов в высоковольтных полимерных и фарфоровых изоляторах в лабораторных и полевых условиях. Разработанная система мониторинга во многом основана на обнаруженном эффекте сверхбольших ЧР, создающих накопление индуцированных электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, которые образуют электрические поля с напряженностью, превосходящей напряженность приложенных полей к высоковольтным изоляторам. РЕЗУЛЬТАТЫ проведенных исследований позволяют судить о возможности промышленной применимости предложенного способа бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов под рабочим напряжением. Использование акустической регистрации частичных разрядов при контроле дефектов позволяет более точно определять общее количество ЧР и их фазовое распределение. Электромагнитное детектирование частичных разрядов позволяет успешно оценивать интенсивность и количество сверхбольших ЧР, вид и размеры больших дефектов.

Ключевые слова: дистанционная диагностика; частичные разряды; неразрушающий контроль; высоковольтные изоляторы; дефекты изоляции; система мониторинга.

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания на выполнение НИР по теме «Распределенные автоматизированные системы мониторинга и диагностики технического состояния воздушных линий электропередачи и подстанций на основе технологии широкополосной передачи данных через линии электропередач и промышленного интернета вещей» (соглашение №075-03-2022-151 от 14.01.2022).

Для цитирования: Иванов Д.А. Особенности мониторинга сверхбольших частичных разрядов в высоковольтных // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 151-163. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163.

FEATURES OF MONITORING EXTRA LARGE PARTIAL DISCHARGE IN HIGH VOLTAGE INSULATORS

DA. Ivanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>, ivanov.da@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE* of the described study is to study the effect of partial discharges on the physical state of previously detected defects in high-voltage insulators. The article describes the results obtained by a complex of non-contact methods for remote diagnostics of high-voltage insulators under operating voltage during operation using a two-channel remote diagnostic device. *METHOD* is based on the registration of partial discharges by electromagnetic and acoustic sensors. With the help of electromagnetic and acoustic sensors, the characteristics of partial discharges in high-voltage polymer and porcelain insulators were studied without contact in laboratory and field conditions. The developed monitoring system is largely based on the discovered effect of extra large PDs, which create an accumulation of induced electric charges on the dielectric surfaces of defects, which form electric fields with a strength exceeding the strength of the applied fields to high-voltage insulators. *THE RESULTS* of experimental studies confirm the possibility of industrial applicability of the proposed method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators under operating voltage. The use of acoustic registration of partial discharges in the control of defects makes it possible to more accurately determine the total number of PDs and their phase distribution.

Keywords: remote diagnostics; partial discharges; non-destructive testing; high-voltage insulators; insulation defects; monitoring system.

Acknowledgments: The research work was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education within the scope of the state Research and Development task no. 075-03-2022-151 of 14.01.2022 «Distributed automated systems of monitoring and diagnostics for technical condition of overhead power lines and substations based on broadband data transmission technology through power lines and the industrial Internet of Things».

For citation: Ivanov DA. Features of monitoring extra large partial discharge in high voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):151-163. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-151-163.

Введение

Высоковольтное энергетическое оборудование, вследствие его сложности, использовании разнообразных материалов, и работе в условиях воздействия сильных электрических, электромагнитных полей, электродинамических и тепловых воздействий, подвержено большому риску образования дефектов, последующих затем электрических пробоев и даже полного разрушения. Поэтому в наши дни целью технического диагностирования является однозначное определение дефектов с прогнозированием их дальнейшего развития и остаточного ресурса высоковольтного оборудования. В последние десятилетия начался переход от системы планово-предупредительного обследования и ремонта высоковольтного оборудования к периодическому обследованию по техническому состоянию, в том числе даже с помощью неразрушающего контроля технического состояния оборудования. Главное отличие последнего от ранее разработанных и использующихся методов диагностики состоит в возможности обследовать оборудование без прекращения процесса передачи электроэнергии. Быстрому и успешному переходу к методу диагностики «под рабочим напряжением» мешает ряд насущных задач, требующих предварительного решения:

- отсутствие нормативных документов, включающих в себя предельные диагностические параметры, на основании которых можно принимать решение о техническом состоянии;
- отсутствие согласования параметров, получаемых с отключением оборудования, с диагностическими параметрами при использовании метода «под рабочим напряжением»;

- отсутствие методов многократного диагностирования с определенной периодичностью, т.е. мониторинга диагностических параметров. На наш взгляд периодичность должна определяться скоростью возможного образования и развития дефекта в любом контролируемом элементе оборудования;

- отсутствие оптимального набора измерительных комплексов и компьютерных программ для дистанционного мониторинга технического состояния высоковольтного оборудования в автоматизированном режиме. [1-11].

По нашим представлениям, основанным на ранее полученных результатах, современная система мониторинга должна быть способна оценивать текущее техническое состояние объекта, определять характеристики наиболее опасных дефектов, выделять наиболее быстро развивающиеся дефекты, определять периодичность процессов диагностики и прогнозировать остаточный ресурс.

Начиная со второй половины XX века большое внимание в научных статьях, международных и отечественных стандартах стало уделяться частичным разрядам (ЧР) как первичным электрофизическим процессам, определяющим техническое состояние ВИ (высоковольтные изоляторы). Более того, в последнее десятилетие было сделано предположение, что сами ЧР на серьезном дефекте способны создавать сверхбольшие напряженности электрических полей, значительно превышающих напряженность полей в высоковольтной электрической сети [12-14].

В ВИ различают три основных вида ЧР: микроразряды в малых кавернах, существующих как на поверхностях электродов, так и в объеме диэлектриков; частичные разряды вдоль границ раздела двух диэлектриков; частичные (незавершенные) пробои на границе «твердый диэлектрик – газ». Им соответствуют дефекты, чаще всего в виде воздушных полостей сферической формы внутри диэлектриков или плоскопараллельных воздушных слоев внутри диэлектрика и на границе «диэлектрик – электрод» (дисковые каверны).

Изучение физических процессов, сопровождающих ЧР, началось ещё в конце XX века [15, 16] с создания общих моделей разрядов через газовые полости между электродами [17-19]. Например, модели замкнутой полости [20] на основе использования закона Пашена, устанавливающего связь между напряжением зажигания заряда U_s , давлением газа p в промежутке между электродами и размером d промежутка

$$U_s = p \cdot d \quad (1)$$

Позднее общая модель разрядов в газах была уточнена именно для ЧР в объеме или на поверхности для диэлектрических материалов [20, 21]. В ходе расчетных экспериментов и модельных экспериментов были установлены виды разрядов в зависимости от значения U_s в формуле Пашена. Для малых значений $p \cdot d$ электронно-лавиная стадия пробоя может переходить в стримерную, а затем в искровую стадию с увеличением напряженности приложенного поля. Однако было предположено, что в определенных условиях может возникать переход от стримерного разряда к разряду Таунсенда [22], что подтверждается с большой степенью вероятности в модельных экспериментах на сформированных полостных дефектах в полимерах при относительно малой напряженности приложенных полей [23]. Однако с повышением и напряженности полей и размеров дефектов в подобных модельных экспериментах последних лет стали проявляться более сильные эффекты, связанные с возникновением и последующим накоплением большого количества зарядов от предыдущих ЧР, которые создают индуцированные напряженности полей, значительно превосходящих приложенное поле [24]. Поэтому в наиболее значительных публикациях последних пяти лет, имеющих обзорный характер [13, 25, 26], делается вывод о многопараметричности процессов и механизмов генерации, распространения и погасания ЧР в газовых полостях диэлектриков. Основное внимание обращено именно на изменение проводимости диэлектрических полостей дефекта, его размеров и давления газа в полости дефекта. Причем изменение проводимости во время ЧР может изменять (увеличивать) интенсивность ЧР на порядок, так же, как и изменение размеров полости или давления приводит к росту интенсивности ЧР.

В наших экспериментах практически невозможно следить за изменением параметров газа в полости дефекта в процессах ЧР. Более того, выполненное ранее изучение зависимости изменения заряда в ЧР действительно указало на зависимость $q_{\text{чр}}$ от параметров газовой смеси в полости дефекта [27]. Однако в более поздних подобных экспериментах была установлена более сильная зависимость $q_{\text{чр}}$ от параметров самого дефекта для мощных ЧР.

Таким образом, можно констатировать, что до настоящего времени даже в модельных экспериментах, выполненных в Англии, США, Японии, Китае, России (Новосибирск), не удалось, как утверждают сами авторы, получить непротиворечивую картину комплекса физических процессов во время частичного разряда. Следует подчеркнуть, что большинство предыдущих исследований физических процессов, сопровождающих ЧР, выполнялось на модельных образцах полимеров на одном из двух видов смоделированных дефектов.

Главной целью нашей работы была разработка методологии диагностирования рабочего состояния различных видов высоковольтных изоляторов, способной предупреждать возникновение больших дефектов, которые могли бы нарушить функционирование системы изоляторов подстанций и линий электропередачи. Разработанная система мониторинга во многом основана на обнаруженном эффекте сверхбольших ЧР, создающих накопление индуцированных электрических зарядов на диэлектрических поверхностях дефектов, которые образуют электрические поля с напряженностью, превосходящей напряженность приложенных полей к ВИ. Ранее этот эффект наблюдался и изучался только в модельных экспериментах. Следует подчеркнуть, что индуцированные предыдущими сверхбольшими ЧР напряженности полей на границах больших дефектов значительно превосходят, как это уже установлено модельными экспериментами и нашими результатами на реальных ВИ [28], возможные изменения напряженности полей первичных ЧР в том числе и при переходах потока заряженных частиц при ЧР от стримерного к Таунсендскому механизму в диэлектрических полостях [18, 20]. Поэтому его влиянием можно пренебречь при условии $E_a < E_U$, где E_a – напряженность приложенного поля, E_U – напряженность индуцированного предыдущими ЧР поля на дефекте. Здесь и далее под сверхбольшими частичными разрядами понимаются ЧР с интенсивностью $q > 2$ нКл.

К настоящему времени уже появились работы, в которых были предложены и рассмотрены несколько физических моделей формирования СБЧР и их влияния на деградацию диэлектрических элементов высоковольтного энергетического оборудования. Основное внимание было обращено на новое поколение полимерных диэлектриков, нашедших широкое применение в конденсаторах, трансформаторах, кабелях и других высоковольтных устройствах [4]. Гораздо меньше внимания было обращено на экспериментальное изучение возникновения СБЧР и их влияния на развитие дефектов в реальных высоковольтных диэлектрических элементах. В экспериментальных работах, судя по имеющимся результатам в доступных нам публикациях, основное внимание было обращено на дефекты в виде плоских полостей или заполненных газом сфер [29-35]. Практически отсутствуют работы по изучению СБЧР в современных высоковольтных изоляторах.

Эти обстоятельства стали главной причиной проведения нами уже во втором десятилетии этого века цикла экспериментальных исследований СБЧР на реальных ВИ в процессе эксплуатации. Главными задачами было изучение зависимостей параметров СБЧР от характеристик вызывающих их дефектов, а также разработка методик одновременного бесконтактного детектирования СБЧР электромагнитным [36-38], акустическим и другими методами. Особая сложность подобной разработки физических моделей процессов излучения СБЧР состояла в том факте, что в реальных ВИ дефекты в отличие от модельных образцов имеют более сложную конструкционную форму. Поэтому основное внимание было обращено на наиболее опасные при эксплуатации дефекты в виде протяженных треков или полостей в диэлектрическом стержне и плоских полостей на границе раздела «стержень-оконцеватель». Именно такие дефекты, как было установлено в процессе наших экспериментов [3, 36, 38], являются главными причинами возникновения СБЧР.

Первоначально для дистанционного исследования процессов взаимодействия приложенного поля E_k с дефектом были визуально отобраны полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации при плановом обследовании и имевшие дефекты вида «контакт стержень-оконцеватель» и «стержень». Для полевых исследований были выбраны фарфоровые ВИ ИОС 110/400, находящиеся под рабочим напряжением 110 кВ. Поскольку до настоящего времени на электрических подстанциях по-прежнему эксплуатируется большое количество фарфоровых изоляторов, то мы выполнили сравнительное изучение особенностей СБЧР в обоих видах ВИ [39, 40].

Материалы и методы

Для изучения характеристик ЧР от дефектов на стержне и дефектов «стержень-оконцеватель» впервые нами была разработана комплексная двухэтапная методика, включающая измерения характеристик ЧР контактно и дистанционно электромагнитным и акустическим датчиками.

С помощью электромагнитного и акустического датчиков бесконтактно были

изучены характеристики ЧР, в том числе СБЧР, на стенде кафедры ПЭС КГЭУ и на ряде подстанций ОАО «Сетевая компания» в полимерных (ЛК70/35) и фарфоровых (ИОС110/400) изоляторах, получены распределения Сигналы ЧР, синхронизованные с фазой высокого напряжения, накапливаются с привязкой к узким фазовым интервалам их возникновения в блоке памяти персонального компьютера. Это фазовое распределение количества импульсов и интенсивности сравнивается с ранее записанным распределением аналогичных сигналов для эталонных изоляторов. Выделяются по специально разработанной программе сигналы, превышающие безопасный для нормального функционирования ВИ уровень, и по ним выявляют изоляторы различной степени дефектности и определяют возможность их дальнейшего функционирования.

На основе измерений было установлено, что необычные свойства ЧР начинают проявляться уже начиная с интенсивностей $q \geq 1,5-2$ нКл, а их максимальная интенсивность может достигать 5-7 нКл. Причем до интенсивностей ЧР $q \leq 3$ нКл большинство параметров характеристик ЧР, измеренных электромагнитным и акустическим датчиками, совпадают с точностью до 70-90 %, за исключением абсолютных значений интенсивности q и количества N .

С учетом приведенных выше обсуждений мы разделили наборы параметров ЧР в исследованных образцах на три группы (табл. 1), различающиеся по интенсивности 1,5 нКл, 1,5 – 2,5 нКл и выше 3 нКл. Подобное разделение вполне очевидно, поскольку только начиная со второй группы возникает влияние индуцированных зарядов предыдущих ЧР на формирование СБЧР и начинается проявление различий в детектируемых сигналах ЧР электромагнитным и акустическим датчиками.

К наиболее существенным различиям наборов параметров ЧР и СБЧР, приведенных в таблице 1, которые могли бы на наш взгляд служить основой для разработки системы диагностических параметров для оценки технического состояния ВИ в процессе эксплуатации, относятся следующие:

- Возникновение СБЧР вблизи нулевых значений приложенного высокого напряжения U_a (то есть при фазах $0^\circ-180^\circ-360^\circ$), рисунок 1.
- Увеличение количества СБЧР в отрицательных полупериодах U_a по отношению к положительным полупериодам (рис.2). Если для первых двух групп образцов это соотношение N_+/N_- близко к единице, то для третьей группы $N_-/N_+ > 1$, и оно возрастает с увеличением дефектности.
- Увеличение суммарного заряда СБЧР с возрастанием количества СБЧР (рис.3).
- Увеличение интенсивности СБЧР с ростом размеров дефектов (рис.4).

Таблица 1

Параметры ЧР, детектируемые электромагнитным и акустическим датчиками

Группы		1) $q \leq 1,5$ нКл		2) $1,5 \leq q \leq 2,5$ нКл		3) $q \geq 2,5$ нКл	
Виды дефектов		Малые		Средние		Большие	
Датчики		Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.	Эл.магн.	Акуст.
q , пКл	+	10-20	10-20	20-50	50-200	200	1000
	-	10-20	10-20	50-500	100-500	500	2000
N	+	15-25	15-25	10-30	50-100	100-150	100-200
	-	15-25	15-25	30-50	500-100	500	3000-5000
$\Delta\phi$	+	$60^\circ-100^\circ$	$60^\circ-100^\circ$	$40^\circ-100^\circ$	$210^\circ-320^\circ$	$20^\circ-100^\circ$	$200^\circ-340^\circ$
	-	$240^\circ-280^\circ$	$240^\circ-280^\circ$	$200^\circ-300^\circ$	$200^\circ-320^\circ$	$20^\circ-120^\circ$	$200^\circ-340^\circ$
$\phi_{нач}$	+	$60^\circ-40^\circ$	$60^\circ-40^\circ$	$40^\circ-30^\circ$	$40^\circ-30^\circ$	$30^\circ-20^\circ$	$30^\circ-20^\circ$
	-	$240^\circ-220^\circ$	$240^\circ-220^\circ$	$220^\circ-210^\circ$	$220^\circ-210^\circ$	$200^\circ-190^\circ$	$200^\circ-100^\circ$
$N_{общ}$		$1,9 \cdot 10^4 - 10^4$		$10^4 - 5 \cdot 10^3$		$4 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$	
N_{max}						30-150	
$N_{max} / N_{общ}$						$0,8 \cdot 10^{-2}$	
						$3,36 \cdot 10^{-2}$	

$\Delta\phi$ – фазовые интервалы излучения ЧР; ϕ – фаза начала излучения ЧР для положительных и отрицательных полупериодов; q – заряд; $N_{общ}$ – количество ЧР за период измерений; N_{max} – количество ЧР с $q > 1,8$ нКл за период измерений в 18 с.

Следует отметить, что приведенные выше особенности характеристик ЧР и СБЧР в той же или иной форме также были обнаружены и обсуждены при изучении дефектов в виде сфер или вытянутых трехмерных эллипсоидов в образцах полимерных материалов в Великобритании [41], Китае [13] и США [9]. Ниже будет приведено сравнение результатов нашего изучения ряда параметров СБЧР [28, 42] с параметрами дефектов в реальных ВИ с результатами, полученными на модельных образцах.

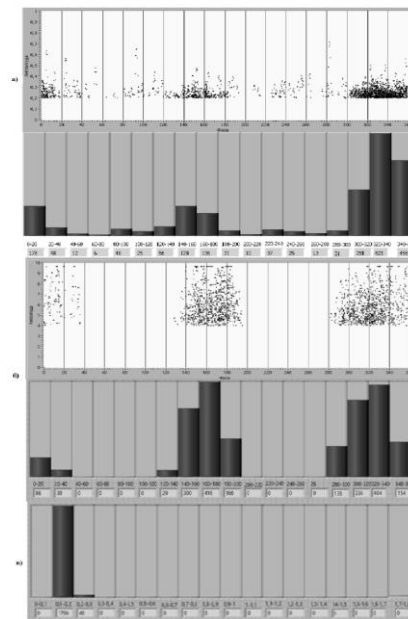


Рис. 1. Пример нетипичных амплитудно-фазовых и количественно-фазовых характеристик, полученных электромагнитным (а) и акустическим (б) способами для полимерного высоковольтного изолятора №9 (дефект «стержень - оконцеватель»), в – количество ЧР в зависимости от интенсивности

Fig. 1. An example of atypical amplitude-phase and quantitative-phase characteristics obtained by electromagnetic (a) and acoustic (b) methods for polymer high-voltage insulator No. 9 ("rod-end" defect), c - the number of CR depending on the intensity

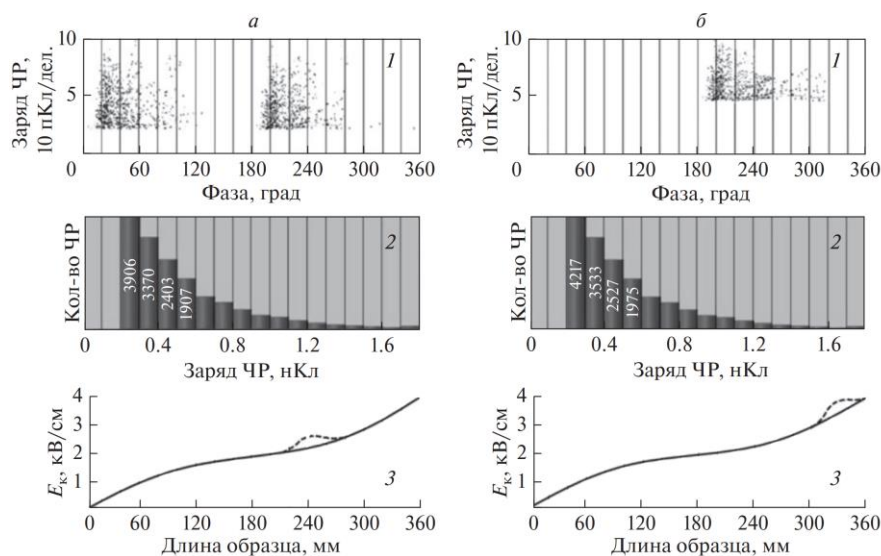


Рис. 2. Параметры ЧР, измеренные электромагнитным способом (1), для образцов ВИ с большими дефектами: а – дефект на стержне, б – дефект «стержень-оконцеватель», 2 – распределение количества ЧР в зависимости от интенсивности, 3 – пространственное распределение индуцированной напряженности поля (для дефектного изолятора показано пунктиром)

Fig. 2. Parameters of the CR measured by the electromagnetic method (1) for VI samples with large defects: a - defect on the rod, b - defect "rod-end", 2 - distribution of the number of CR depending on the intensity, 3 - spatial distribution of the induced field strength (for a defective insulator shown by dotted line)

Было обнаружено, что для малых дефектов ($d \leq 300$ мкм) в ВИ интенсивность ЧР не превышает 100 пКл (табл. 1) и мало зависит от величины d . Однако с ростом размеров дефектов выше 0,4-0,6 мм начинается резкий подъем интенсивности возникающих СБЧР. Количество СБЧР ($q \geq 2$ нКл) значительно возрастало с ростом размера дефекта (табл. 2,

рис. 3), а затем при $d \leq 2$ мм рост количества СБЧР практически прекращается (рис. 4).

Такое резкое изменение интенсивности и количества СБЧР наиболее характерно для дефектов типа «стержень-оконцеватель». Оно вполне соответствует приведенной в работах [9, 41] зависимости интенсивности СБЧР от радиуса сферической полости в диэлектрике [9]. Однако там представлены только некоторые физические процессы, относящиеся к зависимости $q(d)$ для дефектов сферической формы.

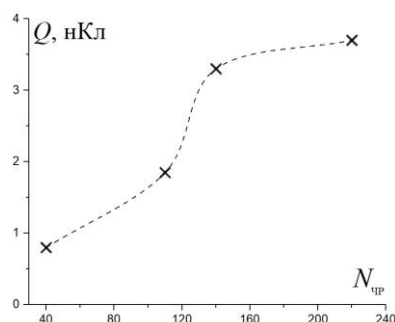


Рис.3. Зависимость суммарного заряда Q от количества СБЧР *Fig.3. The dependence of the total charge Q on the amount of SBHR*

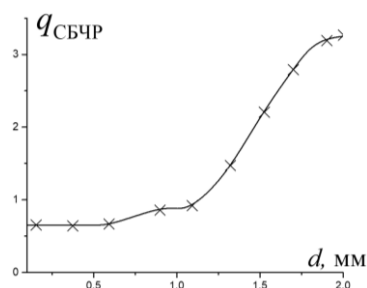


Рис.4. Зависимость усредненного заряда $q_{\text{СБЧР}}$ от размера дефекта «стержень-оконцеватель» *Fig.4. Dependence of the averaged charge $q_{\text{СБЧР}}$ on the size of the defect "rod-end"*

Таблица 2

Параметры СБЧР в образцах с ростом дефектов за период измерения в 18 сек

	№3	№4	№5	№6
ΔN_{max}	36	82	205	109
N_{max}	4380	4300	4300	3000
$\Delta N / N_{\text{max}}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
$N_{\text{общ}}$	1400	620	1400	200
N_-	1300	940	2900	2300
N_+ / N_-	1,05	0,65	0,48	0,09

Результаты и обсуждение

Поскольку в известной нам литературе не удалось найти рассмотрение особенностей излучения ЧР именно в реальных ВИ, и более того нами были обнаружены ряд особенностей и отличий в измеренных одновременно двумя методами параметров ЧР и особенно СБЧР, то была сделана попытка более подробно обсудить физические процессы генерации различных видов ЧР в ВИ.

Анализ полученных электромагнитным и акустическим датчиками характеристик сверхбольших ЧР позволяет сделать вывод, что развитые и опасные для рабочего состояния дефекты ВИ точнее детектируются с помощью акустических измерений. Это связано с физическими особенностями прохождения стримером газового промежутка дефекта и возникновением в связи с этим ударных волн.

В образцах с относительно малыми дефектами влияние индуцированных предыдущими ЧР полей E_i на диэлектрических поверхностях на общее поле в дефекте незначительно и фазовое распределение интенсивности и количества ЧР определяется напряженностью приложенного поля в области дефекта fE_a . Поэтому полученные с помощью электромагнитных и акустических измерений характеристики ЧР в таких образцах (рис. 1 и 2) близки по своим параметрам.

При увеличении размеров дефекта (третья группа образцов) возрастает влияние индуцированных полей E_i , наведенных предыдущими ЧР на диэлектрических поверхностях дефекта, а суммарное поле E_d внутри полости дефекта представляется в виде геометрической суммы напряженностей полей

$$E_d = fE_a + E_i, \quad (2)$$

где E_a – напряженность поля, приложенного к электродам ВИ, f – фактор изменения напряженности приложенного поля, зависящий от геометрии полости дефекта и соотношения диэлектрических проницаемостей газа и диэлектрического стержня.

Этот эффект наиболее сильно сказывается на дефекте между стержнем и оконцевателем изолятора. При ЧР вначале возникает разряд с распространением стримера в полости параллельно приложенному полю, а затем он сменяется разрядом вдоль диэлектрической поверхности, перпендикулярной E_a . В последнем случае нормальная компонента E_a прижимает дрейфующие заряды к поверхности диэлектрика, что приводит к повышению температуры и проводимости канала поверхностного разряда. При этом будет возрастать или уменьшаться на определенных фазах приложенного напряжения интенсивность СБЧР, а также ширина и количество импульсов СБЧР.

Заклучение

Таким образом, можно было предположить, что использование акустического детектирования ЧР при контроле дефектов позволяет более точно определять общее количество ЧР, включая СБЧР, и их фазовое распределение, а электромагнитное детектирование успешно оценивать интенсивность и количество СБЧР, а, следовательно, вид и размеры больших дефектов. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости использования обоих способов детектирования ЧР для более полного обследования работоспособности ВИ в процессе эксплуатации путем выполнения измерений и аналитического сравнения различных наборов характеристик ЧР.

Установлено, что параметры характеристик ЧР позволяют получать более обширную информацию о текущем техническом состоянии ВИ и прогнозировании его дальнейшего остаточного срока службы, в том числе о процессах зарождения и развития дефектов. Справедливость подобного подхода основана на том обстоятельстве, что большинство отказов высоковольтного оборудования вызвано дефектами, параметры которых наиболее точно регистрируются с помощью характеристик ЧР.

На временном интервале эксплуатации ВИ мониторинг на наш взгляд логично разделить на три этапа. На первом следует выполнить измерения диагностических параметров информационного типа, которые необходимы при постановке ВИ в эксплуатацию и дополнения характеристик ЧР от завода-изготовителя. В соответствии с ГОСТ Р 55191-2012 необходимо выполнить измерение интенсивности и количества ЧР в зависимости от фазы высокого напряжения контактным способом с использованием регулируемого источника напряжения. На первом этапе необходимо получить диагностические параметры информационного типа для конкретного типа изолятора, если они не были ранее получены от завода-изготовителя или после планово-профилактического ремонта. Наиболее сложным на первом этапе является получение нормированных значений такого набора характеристик ЧР, который позволил бы определять техническое состояние ВИ в изменяющихся эксплуатационных условиях. Наши предварительные исследования ВИ из полимерного и керамического (фарфор) материалов с рабочим напряжением до 110 кВ позволили сделать заключение, что для оценки их технического состояния возможно использование одного набора диагностических параметров ЧР, но с различными нормированными значениями. Однако при измерении параметров характеристик сверхбольших ЧР в ВИ на 110 кВ и выше нужно учитывать, что параметры СБЧР, измеренные электромагнитным и акустическим датчиками, начинают различаться пропорционально значениям заряда в них выше 3 - 4 нКл.

Второй этап мониторинга обеспечивает многократные измерения разработанного на первом этапе набора диагностических параметров ЧР, позволяя проводить их сравнение с нормированными значениями, в том числе определение вида и места расположения и степени опасности новых возникших в ходе эксплуатации дефектов. Одной из главных сложностей диагностического контроля ВИ является их многочисленность на воздушных линиях электропередачи и кучность расположения на подстанциях. Эти обстоятельства ограничивают общий объем информации о параметрах ЧР от диагностируемого объекта, поскольку от состояния каждого ВИ зависит работоспособность всей ПС или ВЛ. Поэтому количество диагностических параметров,

измеряемых при мониторинге, вначале следует свести к минимуму. Так в нашем случае при измерении параметров ВИ до 110 кВ в качестве главного критического диагностического параметра следует выделить ВИ, имеющие определенное относительное количество ЧР с зарядом выше 1,8-2 нКл (более 10% от общего количества ЧР за период разового диагностирования). Затем другие параметры ЧР в этих ВИ должны подвергнуться разбору с выделением ЧР, имеющих интенсивность выше 3,5-4 нКл, поскольку именно такие ЧР могут создавать дополнительную деградацию полимеров в области дефектов и способствовать их дальнейшему развитию. Конечно, в этом процессе следует также учитывать относительное количество ВИ, содержащих СБЧР. Поскольку определение таких диагностических параметров, как количество и интенсивность ЧР не обладает высокой точностью, то следует использовать в этих случаях дополнительные параметры – различное распределение числа ЧР по интенсивности для положительного и отрицательного полупериодов высокого напряжения и расширение фазовых интервалов излучения ЧР. Наличие ЧР при нулевых фазах приложенного напряжения, определение вида, места расположения и их изменения при многократном диагностировании позволяет устанавливать периодичность регистрации диагностических параметров.

Процесс мониторинга технического состояния ВИ уже в настоящее время возможно осуществлять посредством автоматизированного измерения основной части текущих диагностических параметров под рабочим напряжением современными техническими средствами с помощью современных компьютерных программ. Однако пока не полностью решенной является задача установления реального остаточного ресурса, поскольку он во многом определяется совокупностью физических процессов, определяющих старение не только полимерных и керамических материалов, но и конструкции всего ВИ в целом. В отсутствии серьезных научных исследований в этом направлении, эмпирическому решению этой задачи может помочь выполнение диагностического контроля и анализа ВИ после окончания его эксплуатации, что составляет третий заключительный этап мониторинга.

Литература

1. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Вероятностно-статистический подход к оценке ресурсов электросетевого оборудования в процессе эксплуатации // *Электричество*. 2007. № 11. С. 9-16.
2. Свидетельство П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат. 1992. 239 с.
3. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А. и др. Дистанционный контроль технического состояния фарфоровых высоковольтных изоляторов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 99-107.
4. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика в эксплуатации // *Главный энергетик*. 2010. №2. С. 15.
5. Kupershtokh A.L., Karpov D.I. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics // *Journal of physics: Conference Series*. 2016. V. 754. 102006.
6. Villa A., Barbieri L., Gondola M., et al. A PDE-based partial discharge simulator // *Journal of Computational Physics*. 345. 2017. p. 687-705. 10.1016/j.jcp.2017.05.045.
7. Khalid K., Rohani M., Ismail B., et al. Influence of PD source and AE sensor distance towards arrival time of propagation wave in power transformer // *Journal of Physics: Conference Series*. V. 1432, 2020, 012006.
8. Gao F., Wang Q., Dai D., et al. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions // *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020. V. 53, N. 34, 345202.
9. Borghei M., Ghassemi M., Rodríguez-Serna J. M., et al. Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021. V. 36. no. 4. pp. 2570-2581.
10. Ganjovi A.A., Gupta N., and Raju G.R.G. A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* V. 16. no. 6. pp. 1743-1754, Dec. 2009.
11. Johnatan M. Rodríguez-Serna, Ricardo Albarracín-Sánchez, "A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach", *Polymers*, vol. 1.
12. Pan C., Wu K., Du Y., et al. Simulation of cavity PD sequences at DC voltage by

considering surface charge decay // J. Phys. D: Appl. Phys. V. 50. no. 20. 205202. Jul. 2017.

13. Pan C., Chen G., Tang J, et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. V. 26. no. 3. 2019. pp. 981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.

14. Villa A., Barbieri L., Malgesini R., Leon-Garzon A.R. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability // Journal of Applied Physics 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

15. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. V. 2. no. 4. pp. 510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.

16. Crichton G.C., Karlsson P.W. and Pedersen A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids // IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989. V. 24. no. 2. pp. 335-342. doi: 10.1109/14.90292.

17. Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. Пер. с англ. И.И. Иванчика. М. : Атомиздат, 1980. 182с.

18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Райзер Ю.П. 3-е изд. перераб. и доп. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 736 с.

19. Месяц Г.А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах. УФН. Обзоры актуальных проблем. 2006. Т.176, №10. с.1069-1091.

20. Лагарьков А.Н., Руткевич И.М. Волны электрического пробоя в ограниченной плазме. Академия наук СССР (АН СССР), Институт высоких температур (ИВТ); под ред. А. Н. Старостина. М.: Наука, 1989. 206 с.

21. Karpov D.I. and Kupershtokh A.L. Models of streamers growth with physical time and fractal characteristics of streamer structures. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239), 1998, pp. 60.

22. Morshuis P.H.F. and Kreuger F.H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids // J. Phys. D: Appl. Phys. V. 23. no. 12. pp. 1562-1568, Dec. 1990.

23. Hikita M, Yamada K, Nakamuza A. Measurement of partial discharge by computer and analysis partial discharges distribution by the Monte Carlo method // IEEE Transactions of Electric Insulation. 1990. V. 25. P. 453-468.

24. Pan C., Tang J., and Wu K. The effect of PD process on the accumulation of surface charges // IEEE Trans. Plasma Sci. V. 44. no. 11. pp. 2545-2552, Nov. 2016.

25. Illias H.A., Chen G., and Lewin P.L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V. 24. no. 1. pp. 99-109, Feb. 2017.

26. Pan C., et al. Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review. in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. V. 27, no. 6, pp. 1951-1965, December 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008.

27. Wu K., Suzuoki Y., Dissado L.A. The contribution of discharge patterns in disc-voids. J. Phys. D: Appl. Phys. 2004.V.37. P. 1815.

28. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., et al. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55.No 8. Pp. 596-602.

29. Callender G, Golosnoy I, Rapisarda P, Lewin P. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Appl. Phys. 2018. V. 51. №12.

30. Chen H. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method // Expert systems with Application. 2012. №32. P. 3423.

31. Illias H.A., Tunio M.A., Mokhlis H., et al. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V. 22. no. 1. pp. 463-471, Feb. 2015.

32. C. Pan, K. Wu, Y. Du, Y. P. Meng, Y. H. Cheng, and J. Tang. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 23, no. 4, pp. 2241-2249, Aug. 2016.

33. Adili S., Herrmann L.G., and Franck C.M. Investigating the Inception Mechanism of Pulsed X-ray Triggered Partial Discharges by Time Resolved Measurements // IEEE Trans. Electr. Insul. V. 20. no. 5. pp. 1780-1788, Oct. 2013.

34. Pan C., Wu K., Meng Y., et al. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V. 24. no. 1. pp. 217-226, Feb. 2017.

35. Jeon. S.I., Nam S.H., Shin D.S., et al. The correlation between partial discharge

characteristics and space charge accumulation under ac voltage // IEEE Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom.(CEIDP), 2000, pp. 653-656.

36. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Д.А. Иванов. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6.

37. Зарипов Д.К., Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. №3-4. С. 57-61.

38. Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., и др. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127.

39. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A., et al. Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment // E3S Web Conf., 288 (2021). p. 01088. .

40. Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Kalimullin R.I., et al. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. V. 84.

41. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. No. 24. P. 245202.

42. Ivanov D.A., Sadykov M.F., Yaroslavsky D.A., et al. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation // Energies. 2021. V. 14. No 18.

43. Ramirez-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20. P. 115108.

Авторы публикации

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Sitnikov VF, Skopintsev VA Probabilistic-statistical approach to assessing the resources of electric grid equipment during operation. *Electricity*. 2007;11:9-16.

2. Swee PM. *Methods and means of diagnostics of high voltage equipment*. M.: Energoatomizdat.1992. 239 p.

3. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Remote control of the technical condition of porcelain high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(3-4):99-107.

4. Gaivoronsky AS. Damage to polymer insulators and their diagnostics in operation. *Chief Power Engineer*. 2010;2:15.

5. Kupershtokh AL, Karpov DI. Simulation of waves of partial discharges in a chain of gas inclusions located in condensed dielectrics. *Journal of physics: Conference Series*. 2016;754:102006.

6. Villa A, Barbieri L, Gondola M, et al. A PDE-based partial discharge simulator. *Journal of Computational Physics*. 2017;345:687-705. 10.1016/j.jcp.2017.05.045.

7. Khalid K, Rohani M, Ismail B, et al. Influence of PD source and AE sensor distance towards arrival time of propagation wave in power transformer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1432:012006.

8. Gao F, Wang Q, Dai D, et al. Numerical study on partial discharge in a dry air cavity with a two-dimensional fluid model considering practical reactions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020;53(34):345202.

9. Borghei M, Ghassemi M, Rodríguez-Serna J. M.A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling // IEEE Transactions on Power Delivery, 2021;36(4):2570-2581.

10. Ganjovi AA, Gupta N, and Raju G.R.G. A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. V.16. no. 6.qw pp. 1743-1754, Dec. 2009.

11. Johnatan M. Rodríguez-Serna, Ricardo Albarracín-Sánchez. A Study on the Life Estimation and Cavity Surface Degradation Due to Partial Discharges in Spherical Cavities

within Solid Polymeric Dielectrics Using a Simulation Based Approach, *Polymers*, vol. 1.

12. Pan C, Wu K, Du Y, et al. Simulation of cavity PD sequences at DC voltage by considering surface charge decay. *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 50. no. 20. 205202. Jul. 2017.

13. Pan C, Chen G, Tang J., et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019;26(3):981-1000. doi: 10.1109/TDEI.2019.007945.

14. Villa A, Barbieri L, Malgesini R, Leon-Garzon A.R. Ignition of discharges in macroscopic isolated voids and first electron availability. *Journal of Applied Physics*. 125, 043302 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5052313>.

15. Niemeyer L. A generalized approach to partial discharge modeling. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995;2(4):510-528. Aug. 1995, doi: 10.1109/94.407017.

16. Crichton GC, Karlsson PW and A. Pedersen. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1989;24(2):335-342. doi: 10.1109/14.90292.

17. Khovatson A.M. *Introduction to the theory of gas discharge*. Per. from English. I. I. Ivanchik. M.: Atomizdat, 1980. 182 p.

18. Raiser YuP. *Physics of the gas discharge*. Scientific publication. 3rd ed. revised. and additional. Dolgoprudny: Intellect Publishing House, 2009. 736 p.

19. Mesyats GA Similarity laws in pulsed gas discharges. *UFN. Reviews of topical issues* 2006;176(10):1069-1091.

20. Lagarkov AN, Rutkevich IM. Electric breakdown waves in a limited plasma. USSR Academy of Sciences, *Institute for High Temperatures*; ed. A. N. Starostina. M.: Nauka, 1989. 206 p.

21. Karpov DI. and Kupershtokh AL. *Models of streamers growth with «physical» time and fractal characteristics of streamer structures*. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239). 1998. pp. 60.

22. Morshuis P.H.F. and Kreuger F.H. Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*1990;23(12):1562-1568, Dec. 1990.

23. Hikita M, Yamada K, Nakamuza A. Measurement of partial discharge by computer and analysis partial discharges distribution by the Monte Carlo method. *IEEE Transactions of Electric Insulation*. 1990;25:453-468.

24. Pan C, Tang J, and Wu K. The effect of PD process on the accumulation of surface charges. *IEEE Trans. Plasma Sci.*2016;44(11):2545-2552.

25. Illias HA, Chen G, and Lewin P.L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*2017;4(1):99-109.

26. Pan C. Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020;27(6):1951-1965. December 2020, doi: 10.1109/TDEI.2020.008.

27. Wu K, Suzuoki Y, Dissado LA. The contribution of discharge patterns in disc-voids. *J. Phys. D: Appl. Phys.*2004;37:1815.

28. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. Integrated Noncontact Diagnostics of the Operable Condition of High-Voltage Insulators. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(8):596-602.

29. Callender G, Golosnoy I, Rapisarda P, Lewin P. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids. *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 2018;5:12.

30. Chen H. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method. *Expert systems with Application*. 2012;32:3423.

31. Illias HA, Tunio MA, Mokhlis H, et al. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2015;22(1, pp. 463-471, Feb. 2015.

32. Pan C, Wu K, Du Y, et al. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2016;23(4):2241-2249, Aug. 2016.

33. Adili S, Herrmann LG, and Franck CM. Investigating the Inception Mechanism of Pulsed X-ray Triggered Partial Discharges by Time Resolved Measurements. *IEEE Trans. Electr. Insul.*2013;20(5):1780-1788, Oct. 2013.

34. Pan C, Wu K, Meng Y, et al. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2017;24(1):217-226, Feb. 2017.

35. Jeon SI, Nam SH, Shin DS. The correlation between partial discharge characteristics and space charge accumulation under ac voltage. *IEEE Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenom.(CEIDP)*.2000. pp. 653-656.
36. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA. Complex method of remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;5-6:87-93.
37. Zaripov DK, Lopukhova TV. Method for remote diagnostics of high-voltage insulating structure. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2006;3-4:57-61.
38. Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR. Remote diagnostics of defects in high-voltage insulators. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):117-127.
39. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. *Monitoring System of High Voltage Dielectric Equipment*. E3S Web Conf., 288 (2021). C. 01088.
40. Golenishchev-Kutuzov AV, Ivanov DA, Kalimullin RI. Remotely Measured Diagnostic Parameters for Estimating the Residual Life of High Voltage Insulators. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*.2020. V. 84.
41. Illias HA, Chen G, Lewin PL. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011;44(24):245202.
42. Ivanov DA, Sadykov MF, Yaroslavsky DA. Non-contact methods for high-voltage insulation equipment diagnosis during operation. *Energies*. 2021;14(18). doi 10.3390/en14185670.
43. Ramirez-Nino J, Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers. *Meas. Sci. Technol*. 2009;20:115108

Authors of the publication

Dmitry A. Ivanov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено	01.04.2022г.
Отредактировано	20.04.2022г.
Принято	25.04.2022г.



СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С РЕГУЛЯТОРАМИ ЧАСТОТЫ

Р.Р. Гибадуллин, М.Ф. Низамиев, И.В. Ившин, А.Н. Цветков, О.В. Владимиров,
З.М. Шакурова

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
gibadullin.rr90@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Разработать стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод непосредственной оценки механической характеристики системы Источник-Преобразователь частоты-Двигатель-Нагрузка, использовались методы непосредственной оценки входных параметров с последующим вычислением показателей, методы увеличения алгоритмической избыточности, математические методы проверок, логические методы контроля и сложные методы контроля (метод контрольных испытаний, метод контрольных программ). РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведен анализ методов испытаний частотных регуляторов, произведен выбор необходимого оборудования, определены алгоритмы управления стендом, разработана конструкторская документация, изготовлен стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, осуществлена отладка программного обеспечения его системы управления, проведены испытания преобразователей частоты по разработанной методике в соответствии с требованиями ГОСТ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Одним из эффективных способов определения состояния частотного регулятора до отправки его на монтаж, является проверка на испытательном стенде для определения степени работоспособности системы управления и защиты, а также силовой части. Разработанный стенд позволяет решить широкий круг задач по исследованию работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт.

Ключевые слова: Электротехнические комплексы; системы электроприводов с регуляторами частоты; преобразователь частоты; автоматизированная система управления технологическим процессом.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по договору № 4а/2016от 01.08.2016 г., заключенному между ООО «Диагностика – ЭнергоСервис» и ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Для цитирования: Гибадуллин Р.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Цветков А.Н., Владимиров О.В., Шакурова З.М. Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 164-175. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175.

A STAND FOR THE STUDY OF THE OPERABILITY AND QUALITY OF FUNCTIONING OF ELECTRICAL COMPLEXES AND ELECTRIC DRIVE SYSTEMS WITH FREQUENCY REGULATORS

RR. Gibadullin, MF. Nizamiev, IV. Ivshin, AN. Tsvetkov, OV. Vladimirov,
ZM. Shakurova

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gibadullin.rr90@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop a stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators that have undergone major repairs. *METHODS.* When solving this problem, the method of direct evaluation of the mechanical characteristics of the system Source-Frequency Converter-Motor-Load was used, methods of direct evaluation of input parameters with subsequent calculation of indicators, methods of increasing algorithmic redundancy, mathematical methods of checks, logical control methods and complex control methods (the method of control tests, the method of control programs) were used. *RESULTS.* The analysis of test methods of frequency regulators was carried out, the necessary equipment was selected, stand control algorithms were determined, design documentation was developed, a stand was made to study the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators, the software of its control system was debugged, frequency converters were tested according to the developed methodology in accordance with GOST requirements. *CONCLUSION.* One of the most effective ways to determine the state of the frequency controller before sending it for installation is to check on a test bench to determine the degree of operability of the control and protection system, as well as the power part. The developed stand makes it possible to solve a wide range of tasks for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators that have undergone major repairs.

Keywords: *Electrical engineering complexes; electric drive systems with frequency controllers; frequency converter; automated process control system.*

Acknowledgments: *The work, based on the results of which the article was completed, was performed under contract No. 4a/2016 dated 01.08.2016, concluded between Diagnostics - Energoservice LLC and KGEU.*

For citation: Gibadullin RR, Nizamiev MF, Ivshin IV, Tsvetkov AN, Vladimirov OV, Shakurova ZM. A stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 164-175. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-164-175.

Введение

Преобразователь частоты – это статическое преобразовательное устройство, необходимое для управления скоростью вращения асинхронных электрических двигателей. Асинхронные электрические двигатели переменного тока существенно отличаются от устройств постоянного тока. Отличие приходится на простоту конструкции и удобство использования. Именно этот фактор объясняет такую популярность асинхронных электродвигателей [1-6].

Важно отметить, что регулирование скорости вращения может выполняться посредством таких устройств, как механический вариатор, гидравлическая муфта и прочие. Но все эти методы имеют значительные недостатки, к которым относят сложность использования, низкое качество работы, дороговизну и малый диапазон регулирования [7-9].

Избежать всех этих проблем позволяет частотный преобразователь для электродвигателя. В этом случае регулирование скорости вращения выполняется путем изменения напряжения питания и частоты электродвигателя. КПД такого преобразователя достигает 98%, а риск возникновения и развития аварийных ситуаций заметно снижается [10].

В настоящее время существует проблема оценки состояния частотных регуляторов, отправляемых в ремонт и возвращаемых из капитального ремонта, с целью снижения затрат на монтажно-демонтажные работы и времени простоя установок в результате применения неисправного регулятора частоты. Одним из эффективных способов определения состояния частотного регулятора до отправки его на монтаж, является проверка на испытательном стенде для определения степени работоспособности системы управления и защиты, а также силовой части. На сегодняшний день для контроля состояния частотных преобразователей применяется

большое количество методик, значительно отличающихся по своей методической сущности и аппаратной реализации. В основном они применяются производителями и осуществляются только на производственных площадках [11].

При реализации проекта первым делом был осуществлен обзор основных схем (устройство), принципа действия, управления и конструкции частотных преобразователей, произведен анализ методов испытаний регуляторов частоты.

В большинстве случаев устройство частотного преобразователя базируется на схеме двойного преобразования. Агрегаты включают: звено постоянного тока (неуправляемый выпрямитель), силовой импульсный инвертор и управляющую систему. В свою очередь, звено постоянного тока включает неуправляемый выпрямитель и фильтр. Здесь переменное напряжение сети преобразуется в напряжение постоянного тока. В силовой трехфазный импульсный инвертор входит шесть транзисторных ключей, и каждая обмотка двигателя подключается через определенный ключ к положительному/отрицательному выводам выпрямителя. Посредством инвертора выполняется преобразование выпрямленного напряжения в трехфазную переменную величину нужной частоты и амплитуды, прикладываемую к обмоткам статора электрического двигателя [12-13].

В роли ключей используются силовые IGBT-транзисторы (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Если сравнивать их с тиристорами, то первые имеют более высокую частоту переключения, что дает возможность вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы при минимальных искажениях [14].

Различают два базовых принципа управления частотными преобразователями. Основной принцип скалярного управления состоит в изменении частоты и амплитуды питающего напряжения согласно закону:

$$\frac{U}{f^n} = \text{const}$$

где $n \geq 1$.

Эта формула показывает, что оговоренный принцип является наиболее простым и доступным способом реализации частотного управления. За счет доступной стоимости преобразователей со скалярным управлением, такие агрегаты широко используются для привода механизмов, диапазон регулирования частоты вращения двигателя которых составляет 1:40. Такое ограничение удовлетворяет требованиям по управлению насосами, компрессорами, вентиляторами. Весомым преимуществом скалярного метода выступает возможность одновременного управления группой электрических двигателей.

Второй тип систем управления представляет векторный принцип, обеспечивающий параметры асинхронного электропривода, максимально приближенные к характеристикам привода постоянного тока. Такие особенности системы реализуются посредством разделения каналов регулирования потокосцепления и скорости вращения двигателя. Преобразователи, работающие по векторному принципу, характеризуются относительно высокой стоимостью и используются в механизмах, предъявляющих повышенные требования к качеству регулирования скорости – станки, лифты, краны и т.п. [15].

Материалы и методы

Существующие методы испытаний частотных преобразователей делятся на 3 вида: квалификационные, приемо-сдаточные и периодические. В ходе проведения работ было принято решение испытывать частотные преобразователи по программе периодических испытаний, методику проведения которых регламентируют ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87, ГОСТ 16962.2-90.

Анализ причин выхода из строя преобразователей частоты показал, что основными причинами поломки регуляторов являются ошибки при их выборе и нарушения правил эксплуатации.

Короткое замыкание выходных цепей преобразователя частоты – вполне вероятная на практике аварийная ситуация, несмотря на то, что для предотвращения выхода из строя регуляторе имеется встроенная защита. Но быстродействие защиты – 5-10 микросекунд – может оказаться недостаточным, так как при коротком замыкании ток мгновенно возрастает за время от долей микросекунд до десятков микросекунд до опасного значения, превышающего номинальный ток IGBT-транзисторов в несколько раз, что может привести к выходу преобразователя из строя [16].

На основании проведенного анализа было установлено, что разрабатываемый стенд для исследования работоспособности и качества функционирования

электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты должен решать следующие задачи.

Основная задача, возлагаемая на испытательный стенд, заключается в определении технического состояния основных узлов частотного регулятора после ремонта.

В первую очередь необходимо проверить систему управления преобразователем. В этой системе возможны отказы модулей связи, измерения, управления и защиты. Проверка заключается в определении работоспособности каналов связи, как правило, работающих с протоколом *ModBus*, и способности системы вести измерения и вычисления основных величин, используемых в управлении и в защитах.

Затем проверяется силовая часть преобразователя путем подключения эквивалента нагрузки к выходным клеммам при различном уровне питающего напряжения.

В данной части испытаний стенд решает задачи проверки целостности силовых преобразователей на базе транзисторов *IGBT* и выпрямителей для цепи постоянного тока.

Весь спектр испытаний проводится с помощью входящих в состав стенда сложных электронных модулей, состоящих из модулей управления и исполнительных механизмов.

Кроме этого стенд должен обеспечивать механическое воздействие и электрическую нагрузку, а также измерять параметры работы частотного регулятора в следующих диапазонах:

- мощность испытываемого частотного регулятора: 0...90 кВт;
- регулирование напряжения питания: 300...400В;
- измерение электрического тока: 0...200 А;
- измерение напряжения на нагрузке: 0...400 В;
- измерение мощности на нагрузке: 0...90 кВт;
- частота напряжения питания двигателя: 0...60 Гц.

Стенд должен обеспечивать работу испытываемого регулятора частоты в режимах перегрузки и обрыва фаз нагрузки.

Стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты должен обеспечивать контроль и управление параметрами работы частотного регулятора с целью получения его характеристик и формирования заключения о работоспособности.

Стенд должен обеспечивать контроль и управление параметрами частотного регулятора посредством программно-аппаратных средств.

Система управления лабораторным стендом должна обеспечивать управление исполнительными механизмами стенда, а также должна реализовывать алгоритмы управления частотным регулятором для получения исследуемых характеристик.

Система управления также должна обеспечивать защиту при аварийных режимах работы.

Стенд и его электронные компоненты системы управления должны соответствовать стандарту электромагнитной совместимости ГОСТ Р 50397-2011 и соответствовать нормам по электротехнической безопасности.

Конструкцией разрабатываемого испытательного стенда должна быть обеспечена безопасность при эксплуатации от поражения обслуживающего персонала электрическим током, травмирования вращающимися и подвижными частями и от получения ожогов от частей, нагретых до высокой температуры.

Испытательный стенд должен представлять собой комплексное устройство, состоящее из модулей сбора информации и управления силовыми элементами. Кроме этого стенд должен реализовывать различные методики испытаний и объемы проводимых исследований.

Все вышеизложенное, а также ряд дополнительных научно-исследовательских работ позволило нам перейти к выбору оборудования, необходимого и достаточного для реализации стенда. В ходе выполнения данного этапа была спроектирована структурная схема стенда (рис. 1), которая в дальнейшем стала основой функциональной схемы.

Изъясняясь патентной терминологией, можно вкратце описать общую концепцию функционирования стенда следующим образом.

Управляемый регулятор (1) напряжения осуществляет изменение входного напряжения при испытаниях и имитирует скачки и провалы напряжения сети для

удаленных объектов. Конструктивно он представляет собой стабилизатор напряжения с широким пределом уставок.

Блок защиты (2) и измерения предназначен для защиты сети от аварийных ситуаций, возникающих при испытаниях, подачу напряжения на объект испытания (3) и измерение электрических параметров.

Объектом испытания (3) является частотный регулятор, поступивший после ремонта или отправляемый на ремонт.

Нагрузочное устройство (4) создает электрическую нагрузку для силовых цепей объекта испытания (3).

Система управления (5) осуществляет подачу команд исполнительным устройствам, сбор и архивирование информации, связь с системой управления объекта испытаний (3).

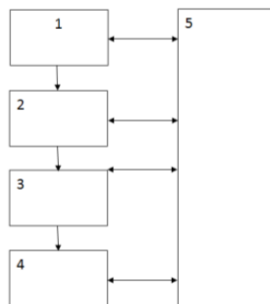


Рис.1. Структурная схема испытательного стенда: 1 – управляемый регулятор напряжения; 2 – блок защиты и измерения; 3 – объект испытания; 4 – нагрузочное устройство; 5 – система управления

Fig.1. Block diagram of the test bench: 1 - controlled voltage regulator; 2 - protection and measurement unit; 3 - test object; 4 - load device; 5 - control system

Далее была разработана конструкторская документация, подготовлен перечень оборудования, входящего в состав стенда, произведена отладка программного обеспечения. Виды и комплектность конструкторских документов на стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты были составлены с учетом требований Технического задания и ГОСТ 2.102-2013.

После того как было приобретено необходимое оборудование и созданы основные узлы стенда, стало возможно приступить к скрупулезному процессу отладки программного обеспечения системы управления. Первым шагом в данном направлении явилась программная реализация испытаний. Программа испытаний включает:

- проверку функционирования системы управления;
- проверку функционирования силовых элементов преобразователя частоты.

При этом каждый из двух пунктов включает множество отдельных испытаний (проверка функционирования преобразователя, испытание на нагрев, определение значения КПД и т.д.)

Постоянное совершенствование алгоритма управления стендом привела к реализации требуемого программного кода.

На следующем этапе работ был изготовлен испытательный стенд и разработана методика и программа испытаний, проводились испытания.

Методика и программа проведения испытаний разрабатывались на основе требований производителей преобразователей частоты и согласно регламентам, прописанным в ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87 и ГОСТ 16962.2-90. Пример схемных решений, обеспечивающих процесс проведения испытаний, рекомендуемых такими производителями преобразователей частоты как Mitsubishi Electric и Hyundai показан на рисунке 2, из которого видно, что общая структура испытательного стенда соответствует требованиям производителей.

Согласно разработанной методике испытаний, стенд выполняет проверку следующих параметров преобразователя частоты:

- передача данных по сети *ModBus*;
- измерение напряжения в цепи постоянного тока;
- проверка времени работы преобразователя;

- проверка времени включения преобразователя;
- проверка неисправностей, выявленных преобразователем при самотестировании;
- разгон привода до номинальной скорости вращения;
- остановка и реверс привода;
- проверка системы защиты от обрыва фаз;
- проверка системы защиты от перегрузки;
- испытание на нагрев;
- определение КПД;
- испытание на кратковременное воздействие повышенного напряжения;
- испытание на кратковременное воздействие пониженного напряжения;
- измерение входного напряжения;
- измерение выходного напряжения;
- измерение входного тока;
- измерение выходного тока;
- измерение входной мощности;
- измерение выходной мощности;
- измерение коэффициента входной мощности;
- измерение коэффициента выходной мощности;
- определение значений установившегося отклонения выходного переменного напряжения;
- измерение частоты выходного напряжения;
- определение отношения выходного напряжения к частоте;
- определение гармонических составляющих выходного напряжения;
- определение искажений напряжения входной электрической цепи, вносимых преобразователем;
- определение значения коэффициента мощности;
- определение значения коэффициента небаланса напряжений трехфазного тока;
- проверка правильности функционирования системы управления и состояния силовых ключей преобразователя.

Для всех проверяемых параметров установлены величины предельного отклонения и при наличии отклонения по любому параметру принимается решение о выбраковке испытываемого преобразователя частоты.

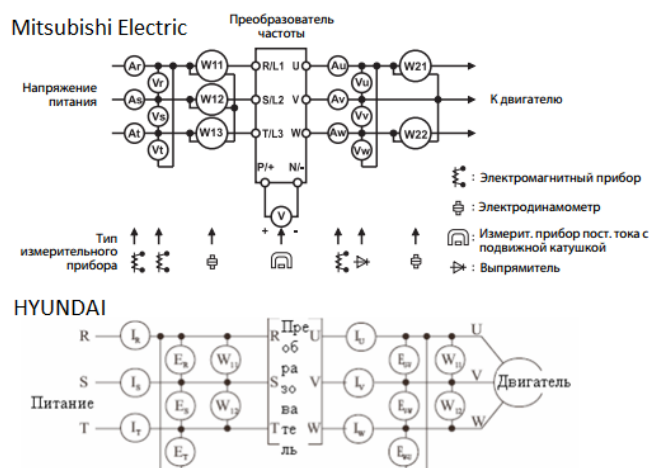


Рис. 2. Рекомендуемые схемы измерения параметров преобразователей частоты

Fig. 2. Recommended schemes for measuring the parameters of frequency converters

Результаты

Испытательный стенд изготовлен на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» из материалов, приобретенных у отечественных поставщиков. Все материалы изготовлены промышленно (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид стенда для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты

Fig. 3. General view of the stand for the study of the operability and quality of functioning of electrical complexes and electric drive systems with frequency regulators

В ходе проведения работ существенной доработке подверглись изделия, функционал которых влияет на реализацию принятой методики проведения испытаний.

Изменение величины нагрузки на двигатель осуществляется регулированием напряжения возбуждения нагрузочного генератора, которое изменяется при помощи регулируемого источника выполненного на основе ЛАТРа (Лабораторный автотрансформатор регулируемый) с встроенным в него электроприводом, выполняющим команды системы управления стенда (рис. 4). В результате применения данного устройства появилась возможность автоматического изменения величины нагрузки исследуемого преобразователя частоты на подключенном к нему электромашином преобразователе.

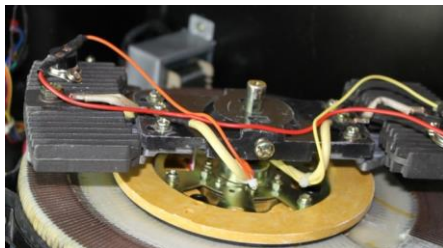


Рис. 4. ЛАТР Энергия TDGC2

Fig. 4. LATR Energy TDGC2

В качестве регулируемого источника напряжения, выбран промышленный стабилизатор напряжения, для которого были изготовлены элементы системы управления, позволяющие устанавливать требуемый уровень напряжения на выходе прибора. Устройство по командам системы управления выдает пять уровней напряжения:

- номинальное 380В
- повышенное 400В (+5%)
- высокое 420 В (+10%)
- пониженное 360В (-5%)
- низкое 340 В (-10%)

Система управления стенда собрана из элементов автоматического управления, подчиненных центральному процессору, и вспомогательных устройств.

На последнем этапе работ была осуществлена доводка испытательного стенда под технологические требования Заказчика. В ходе проведения испытаний, а также в результате экспертного обмена мнениями с представителями Заказчика было принято решение о доработке и (или) усовершенствовании отдельных механизмов, узлов и систем стенда для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты.

Подключение частотных преобразователей оказалось несколько неудобно для эксплуатации. Поэтому были использованы новые силовые разъемы марки ССИ-214(рис. 5) и 32А 3Р+N+E IP44 (рис. 6).



Рис. 5. Розетка переносная ССИ-214 на испытательном стенде *Fig. 5. Portable socket SSI-214 on the test bench*



Рис. 6. Вилка кабельная 32A 3P+N+E IP44 на ПЧ *Fig. 6. Cable plug 32A 3P+N+E IP44 on the IF*

Силовые штепсельные разъемы незаменимы при эксплуатации внутри помещений и на открытом воздухе совместно с мобильным электрооборудованием с кабельной системой питания и стационарным электрооборудованием однофазного и трехфазного исполнения. Подходят для подключения строительного электрооборудования и электроинструмента, станков и другого промышленного оборудования и т.д.

Корпуса и изолирующие детали, несущие токоведущие части силовых разъемов выполнены из термостойких и самозатухающих материалов. Крышки обеспечивают защиту от попадания внутрь разъема пыли, влаги и надежно закреплены. Пружины защищены от коррозии. Винты, применяемые для механических и электротехнических соединений, защищены от самоотвинчивания. Имеется возможность эксплуатировать во влажной среде (IP44).

Были выявлены недостатки месторасположения USB разъёма, необходимого для подключения внешнего USB-флеш-накопителя. Поскольку разъем находился внутри шкафа, оператору приходилось открывать его каждый раз, когда требовалось снятие данных о результатах испытаний. Для устранения данного недостатка USB разъем был перенесен на внешнюю стенку шкафа (рис. 7), что обеспечило быстрый и безопасный доступ к USB-флеш-накопителю.

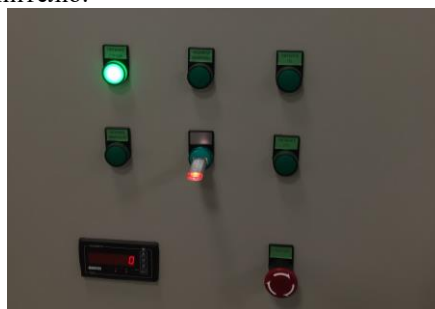


Рис. 7. USB-флеш-накопитель на испытательном стенде *Fig. 7. USB flash drive on the test bench*

Оформление отчета в формате *TXT (Plain Text File)* не соответствует требованиям по защите информации, кроме того, при обмене данными между компьютерами

различных платформ возможны конфликты кодировок и TXT не поддерживает стили текста и графику. Поэтому было принято решение поменять формат вывода отчета на PDF (*Portable Document Format*).

Файл TXT – стандартный текстовый документ Windows. Содержит текст без форматирования. Может быть открыт любой программой для работы с текстом. Самая простая и доступная – Блокнот Windows, текстовые файлы по умолчанию ассоциированы именно с ней. Текстовые файлы также открывают и большинство других программ, например, любые браузеры – Internet Explorer, Chrome или Firefox. Не является проблемой открытие текстовых файлов и на мобильных устройствах, в других операционных системах.

Portable Document Format (PDF) – межплатформенный формат электронных документов, разработанный фирмой Adobe Systems, INC (USA, California) с использованием ряда возможностей языка PostScript. В первую очередь предназначен для представления полиграфической продукции в электронном виде. Для просмотра существует множество программ, а также официальная бесплатная программа Adobe Reader. Значительное количество современного профессионального печатного оборудования имеет аппаратную поддержку формата PDF, что позволяет производить печать документов в данном формате без использования какого-либо программного обеспечения. Традиционным способом создания PDF-документов является виртуальный принтер, то есть документ как таковой готовится в своей специализированной программе – графической программе или текстовом редакторе, САПР (Система автоматизированного проектирования) и т.д., а затем экспортируется в формат PDF для распространения в электронном виде, передачи в типографию и т.п. PDF с 1 июля 2008 года является открытым стандартом ISO 32000.

Формат PDF имеет собственные технические форматы для полиграфии: PDF/X-1a, PDF/X-3. Включает механизм электронных подписей для защиты и проверки подлинности документов. В этом формате распространяется большое количество сопутствующей документации.

В результате эксплуатации компьютера с сенсорным экраном были выявлены ограничения эксплуатационных характеристик. Было принято решение о применении дополнительного персонального компьютера (нетбука), что позволило модернизировать программный продукт и существенно усовершенствовать стенд. Кроме того, это позволит удаленно (через Интернет) вносить корректировки в программу и алгоритм работы стенда.

Стандарты отдельной продукции, применяемой в энергохозяйстве, не соответствуют общепринятым промышленным стандартам. В связи с этим в меню программы стенда был добавлен пункт, позволяющий проводить измерения в ручном режиме.

В связи с нахождением электротехнического оборудования на неровной поверхности, либо на поверхности в теле которой смонтировано нагревательное оборудование, монтаж электроагрегатов к полу невозможен. Принято решение об установке рамы на дополнительную фундаментную часть.

Учитывая пожелания Заказчика, была проведена модернизация программного продукта (рис. 8).

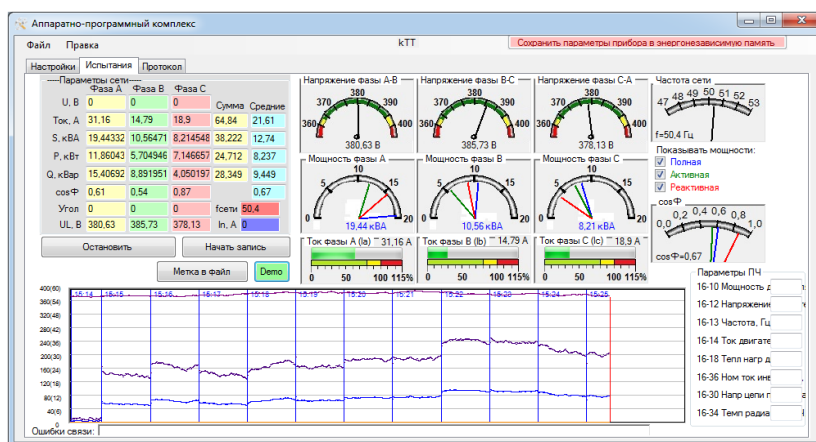


Рис. 8. Работа программы при испытании

Fig. 8. Operation of the program during testing

В ходе проведения различных этапов работ нами был проведен анализ методов испытаний частотных регуляторов, определены задачи исследования и методы их решения, выбрано оборудование и определены алгоритмы управления стендом. Была разработана конструкторская документация, произведена отладка программного обеспечения, разработаны программа и методики испытаний частотных преобразователей. Разработан стенд для исследования работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем электроприводов с регуляторами частоты, прошедших капитальный ремонт.

Дальнейший опыт эксплуатации показал, что разработанный и изготовленный стенд полностью решает поставленные перед ним задачи.

Выводы

В результате проделанной работы установлено:

1. Частотные регуляторы, прошедшие капитальный ремонт, необходимо проверять на предмет работоспособности и соответствия характеристикам до монтажа на месте эксплуатации. Лучше всего для этого подходят тестирования на испытательном стенде, установленном на ремонтной базе. Это в свою очередь позволяет снизить затраты на монтажно-демонтажные работы и сократить расходы, связанные с простоем оборудования.

2. Из основных причин выхода из строя преобразователей, можно отметить ошибки проектирования, ошибки монтажа, ненормальные параметры питающего напряжения и нарушение условий эксплуатации, что в свою очередь влечет за собой отказы силовой части (*IGBT*-модули, входные выпрямители, конденсаторы звенья постоянного тока и др.); отказы в цепях управления (платы управления силовыми модулями, плата контроллера, платы интерфейсов и др.); «отказы» программного обеспечения (сбои вследствие выхода из строя микросхем памяти); отказы в системе охлаждения (выход из строя подшипников вентиляторов, трансформаторов и преобразователей питания вентиляторов, загрязнение вентиляционных каналов).

3. Установлено, что испытания преобразователей необходимо проводить по разработанной методике в соответствии с требованиями ГОСТ 26567-85, ГОСТ 17441-84, ГОСТ 27.410-87, ГОСТ 16962.2-90.

4. Основой испытательного стенда является отечественное оборудование производства компании «ОВЕН» и «Энергия», работающие на основе алгоритмов, написанных в среде программирования *CoDeSys* и использующих для обмена данными между отдельными элементами протокол связи *ModBus*.

5. Разработанный стенд представляет собой отдельное устройство с силовой частью, реализующей функции подачи питания и защиты, и системой управления, включающую в себя сенсорный дисплей управления, осуществляющую управление всеми узлами стенда.

Литература

1. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., и др. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 364-375.

2. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., и др. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 4. С. 88-98.

3. Ившин И.В., Сафин А.Р., Петров Т.И., и др. Разработка и реализация испытательного стенда для исследования характеристик синхронного электродвигателя // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. № 3 (39). С. 45-55.

4. Мустафа Г.М., Гусев С.И., Кузиков С.В., и др. Комбинированный преобразователь частоты для плавного разгона асинхронных электроприводов с тяжёлыми условиями пуска // Электротехника. 2018. № 4. С. 70-75.

5. Макаров В.Г., Цвенгер И.Г., Толмачева А.В., и др. Моделирование системы преобразователь частоты - асинхронный двигатель (пч-ад) в программном пакете *LTSPICE* // Вестник Технологического университета. 2019. № 7. С. 133-138.

6. Дунаев А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 9 (140). С. 82-90.

7. Новаков А.В. Система управления нагрузочным устройством для исследования электроприводов с преобразователем частоты // Известия Тульского государственного

университета. Технические науки. 2021. № 3. С. 79-85.

8. Омельченко Е.Я., Белый А.В., Енин С.С., и др. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 12-19.

9. Lillo A.V., Skakun A.D. Development of the three-phase active voltage rectifier // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus. 2021. С. 1000-1003.

10 Novotnak J., Oravec M., Hijj J. Slip control by identifying the magnetic field of the elements of an asynchronous motor // SAMI 2021 - IEEE 19th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings. 19. 2021. С. 273-277.

11. Al-Mahturi F.S., Samokhvalov D.V., Jaber A.I. Sensorless load torque control of BLDC machine // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021. 2021. С. 782-785.

12. Kozhanov R.V., Mirgorodskaya E.E. Methods of frequency control as an indicator electricity quality control system // Current Trends in History, Culture, Science and Technology. Саратов, 2021. С. 54-56.

13. Klimash V.S., Petuhov A.V. Electric drive with common rectifier and individual inverters for asynchronous electric motors of woodworking line // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. С. 8934051.

14. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 5. С. 253-258.

15. Al-Mashakbeh A.S., Mamchur D., Kalinov A. A diagnostic of induction motors supplied using frequency converter basing on current and power signal analysis // Przegląd Elektrotechniczny. 2016. Т. 92. № 12. С. 5-8.

16. Udovichenko A.V., Kovetskaya A.D. AC voltage regulators review // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM. 22. Сеп. "2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials, EDM 2021 - Proceedings" 2021. С. 324-330.

Авторы публикации

Гибадуллин Рамил Рифатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденантович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Ившин Игорь Владимирович – д-р. техн. наук, профессор, проректор по науке и коммерциализации, Казанский государственный энергетический университет.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. Development of a stand for the study of electric drives of rocking machines. *Vestnik MSTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University*. 2020;4:364-375.

2. Tsvetkov AN, Kornilov VYu, Safin AR, et al. The control measuring and information system of the experimental stand. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020;4:88-98.

3. Ivshin IV, Safin AR, Petrov TI, et al. Development and implementation of a test bench to study the characteristics of a synchronous electric motor. *Bulletin of KSPEU*. 2018;3 (39):45-55.
4. Mustafa GM, Gusev SI, Kuzikov SV, et al. Combined frequency converter for smooth acceleration of asynchronous electric drives with severe start-up conditions. *Electrical engineering*. 2018;4:70-75.
5. Makarov VG, Tsvenger IG, Tolmacheva AV, et al. Simulation of the frequency converter - asynchronous motor (if-ad) system in the LTSPICE software package. *Bulletin of the Technological University*. 2019;7:133-138.
6. Dunaev AM. Procedure for constructing an optimal logical algorithm for diagnosis. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2018;9 (140):82-90.
7. Novakov AV. Load device control system for the study of electric drives with a frequency converter. *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2021;3:79-85.
8. Omelchenko EYa, Bely AV, Enin SS, et al. Energy-efficient test benches for electric motors. *Electrotechnical systems and complexes*. 2018;3 (40):12-19.
9. Lillo AV, Skakun AD. *Development of a three-phase active voltage rectifier*. Proceedings of the IEEE 2021 Conference of Young Researchers in the Field of Electrical Engineering and Electronics, ElConRus. 2021. pp. 1000-1003.
10. Novotnak J, Oravets M, Hijj J. *Slip control by identifying the magnetic field of asynchronous motor elements*. SAMI 2021. 19th IEEE World Symposium on Applied Machine Intelligence and Computer Science, Materials. 19. 2021;19:273-277.
11. Al-Mahturi FS, Samokhvalov DV, Jaber AI. *Load torque control without BLDC machine sensors*. Proceedings of the IEEE 2021 Conference of Young Researchers in the field of electrical engineering and electronics, ElConRus 2021. 2021;782-785.
12. Kozhanov RV, Mirgorodskaya EE. Methods of frequency regulation as an indicator of an electric power quality control system. *Modern trends in history, culture, science and technology*. Saratov, 2021. pp. 54-56.
13. Klimash VS, Petukhov AV. *Electric drive with a common rectifier and individual inverters for asynchronous electric motors of a woodworking line*. International Multi-conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Fareastcon 2019. 2019. pp. 8934051.
14. Senkov AP, Dmitriev BF, Kalmykov AN, Tokarev LN. Ship unified electric power systems. *Russian Electrical Engineering*. 2017;88(5):253-258.
15. Al-Mashakbe AS, Mamchur D, Kalinov A. Diagnostics of asynchronous motors powered by a frequency converter based on the analysis of current and power signals. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2016;92(12):5-8.
16. Udovichenko AV, Kovetskaya AD. *Overview of AC voltage regulators*. International Conference of Young Specialists in Micro/Nanotechnology and Electronic Devices, EDM. 22. Ser. "2021 IEEE 22nd International Conference of Young Specialists in the Field of Electronic Devices and Materials, EDM 2021 - Materials" 2021. pp. 324-330.

Authors of the publication

Ramil R. Gibadullin – Kazan State Power Engineering University.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University.

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University.

Zumeira M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University.

Получено 31.02.2022г.

Отредактировано 14.03.2022г.

Принято 21.03.2022г.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 504.06

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185

7

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ЕЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

А.В. Дмитриев¹, Г.Р. Бадретдинова¹, С.Д. Борисова¹, А.Н. Николаев²

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru

svetlana-zag@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>, andr_nik_nik@rambler.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Определить режим работы теплообменного аппарата, предназначенного для передачи тепла от парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Получить зависимость для расчета времени, через которое необходимо восстанавливать поверхность путем смывания ее водой. Провести оценочные расчеты режима работы теплообменного аппарата установленного на предприятии «ПАЛП Инвест». Повысить устойчивость работы теплообменного аппарата и снизить загрязнение окружающей среды частицами целлюлозы. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи использовались законы сохранения тепла и массы, балансовые соотношения при расчете экономических затрат. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности работы теплообменного аппарата, в котором происходит передача тепла от конденсирующейся парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Сделано предположение о механизме осаждения этих частиц на поверхность теплообмена. Получена зависимость, позволяющая определить время, через которое нужно восстанавливать поверхность с учетом стоимости воды и электричества. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Исследования позволили предположить механизм формирования осадка на поверхности теплообмена. Выбор рационального режима эксплуатации теплообменного аппарата позволит значительно сэкономить расход воды на восстановление поверхности, а также извлечь наибольшее количество тепла из парогазовой смеси. Выброс частиц в воздушную среду может быть снижен.

Ключевые слова: загрязнения окружающей среды; устойчивая работа объектов; снижение экологической опасности; совершенствование методов технического обслуживания; теплообменные аппараты.

Для цитирования: Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д., Николаев А.Н. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 176-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

RESTORATION OF THE HEAT EXCHANGE SURFACE UNDER CONDITIONS OF ITS CONTAMINATION DURING CONDENSATION OF A VAPOR-GAS MIXTURE

AV. Dmitriev¹, GR. Badretdinova¹, SD. Borisova¹, AN. Nikolaev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru²

svetlana-zag@bk.ru³

andr_nik_nik@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>, andr_nik_nik@rambler.ru⁴

Abstract: *THE PURPOSE.* Determine the operating mode of a heat exchanger designed to transfer heat from a vapor-gas mixture containing solid particles. Get a dependency for calculating the time after which it is necessary to restore the surface by washing it with water. To carry out estimated calculations of the operating mode of the heat exchanger installed at the PULP Invest enterprise. To increase the stability of the heat exchanger and reduce environmental pollution by cellulose particles. *METHODS.* In solving this problem, the laws of heat and mass conservation, balance ratios in the calculation of economic costs were used. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, discusses the features of the operation of a heat exchanger in which heat is transferred from a condensing vapor-gas mixture containing solid particles. An assumption is made about the mechanism of deposition of these particles on the heat exchange surface. A dependence is obtained that allows us to determine the time after which the surface needs to be restored, taking into account the cost of water and electricity. *CONCLUSION.* Studies have suggested the mechanism of sediment formation on the heat exchange surface. Choosing a rational mode of operation of the heat exchanger will significantly save water consumption for surface restoration, as well as extract the greatest amount of heat from the steam-gas mixture. The release of particles into the air can be reduced.

Keywords: *environmental pollution; stable operation of objects; reducing environmental hazards; improvement of maintenance methods; heat exchangers.*

For citation: Dmitriev AV, Badretdinova GR, Borisova SD, Nikolaev AN. Restoration of the heat exchange surface under conditions of its contamination during condensation of a vapor-gas mixture *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(1): 176-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

Введение

В начале 20 века произошло стремительное развитие технологий, а также появление крупномасштабных промышленных производств. При реализации технологических процессов возникла необходимость в управлении температурным режимом, следовательно, это стало толчком для создания и совершенствования теплообменного оборудования.

Применение теплообменных аппаратов в промышленности для нагрева и охлаждения технологических потоков становится экономически выгодным, так как они эффективно решают задачи в использовании энергоносителей. Однако при эксплуатации теплообменников производство сталкивается с проблемой загрязнения твердыми частицами поверхностей теплообмена. Наиболее распространёнными отраслями, сталкивающимися с частым загрязнением не только теплообменников, но и большинства элементов технологических установок являются пищевая промышленность, водоподготовка, целлюлозно-бумажное производство, производство волокна, традиционные и атомные электростанции, нефте- и газоперерабатывающие заводы [1, 2]. Загрязнение твердыми частицами способствует изменению тепловых характеристик теплообменников, что в конечном итоге приводит к увеличению капитальных затрат и затрат на их техническое обслуживание, а также к крупным производственным и энергетическим потерям.

На образование загрязнений влияет довольно большое количество параметров, в том числе механизмы осаждения частиц, температура и геометрия поверхности теплообмена. Основываясь на результатах современных исследований [3], загрязнения классифицируются на загрязнение осадками или твердыми частицами, загрязнение в результате химической реакции, коррозионное и биологическое загрязнение, замерзание и кристаллизация. Как правило, наиболее проблемные отложения образуются при переработке твердых или жидких отходов и сжигании топлива [4-6]. При сжигании твердых бытовых отходов утилизация отработанного тепла является эффективным

способом использования ресурсов, но низкотемпературная коррозия и отложение золы серьезно ограничивают использование отходящего тепла дымовых газов. Например, с помощью экспериментов в работе [7] были изучены характеристики строения и осаждения твердых частиц при сжигании твердых отходов, влияющие на процессы теплопередачи и образования низкотемпературной коррозии на оборудовании.

За последние десятилетия наблюдается растущий интерес к загрязнению теплообменников различных конструкций со стороны воздуха. Из многочисленных проведенных экспериментальных исследований становится ясным, что загрязнение оказывает значительное влияние на гидравлическое сопротивление и теплопередачу поверхности теплообмена [8-10]. Следовательно, изменение данных параметров свидетельствует об образовании загрязнений твердыми частицами на поверхностях теплообменника.

Очистка теплообменного оборудования в любой сфере промышленности является энергозатратным процессом. Поэтому достижение качественной очистки и снижение при этом количества потребляемой энергии на сегодняшний день является актуальной задачей. Для этого исследователи в данной области предлагают различные методы прогнозирования обрастания твердыми частицами поверхностей теплообменного оборудования с помощью моделирования [11-13] и способы по снижению количества загрязнений теплообменных элементов [14-16]. Так, в работе [17] авторами была предложена модель ромбической поверхности теплообменного аппарата, способствующая уменьшению зольных отложений на цементном заводе. Поскольку отработавшие газы содержат большое количество частиц золы, то загрязнение труб с течением времени является обычным явлением для котлов-утилизаторов. В приведенной статье было проведено исследование по определению влияния расположения пучков труб в выровненном шахматном порядке и в ромбическом положении соответственно на степень осаждения частиц золы, изменения теплопередачи и гидравлического сопротивления. В результате численного моделирования и промышленного эксперимента обнаружено, что ромбическая поверхность теплообменного аппарата может улучшить теплопередачу и уменьшить накопление золы за счет увеличения гидравлического сопротивления потоку дымовых газов. Аналогичное исследование в работе [18] было выполнено с целью изучения теплообмена, гидравлического сопротивления и скоростей загрязнения дымовыми газами с взвешенными частицами золы, в которой авторы подтвердили, что по сравнению со стандартной компоновкой пучки труб с неравными цилиндрами значительно снижает коэффициент и скорость осаждения частиц, приводит к увеличению теплоотдачи при небольшом изменении гидравлического сопротивления.

Исследование характеристик теплопередачи теплообменных аппаратов в состоянии загрязнения имеет важное значение, поэтому влияние загрязнения твердыми частицами должно быть полностью учтено в процессе проектирования теплообменников [19, 20].

Таким образом, на многих промышленных объектах передача и использование отводимого тепла от дымовых газов для дальнейшей реализации технологических и хозяйственных нужд является актуальной задачей [21-23]. Однако загрязнение поверхностей теплообменников является серьезной проблемой для некоторых технологических установок. Поэтому устранение или, по крайней мере, уменьшение загрязнения относятся к наиболее важным видам деятельности в этой области.

В данной работе была рассмотрена проблема загрязнения частицами целлюлозы теплообменного аппарата, установленного на предприятии «ПАЛП Инвест», занимающегося производством бумаги санитарно-гигиенического назначения и изделий тисью в России. На рисунке 1 показан загрязненный промышленный теплообменник в результате его эксплуатации. Загрязнение теплообменника твердыми частицами повлияло на эффективность работы оборудования, а именно привело к снижению теплопередачи от парогазовой смеси, в которой содержатся твердые частицы, и увеличению гидравлического сопротивления. Следовательно, появилась необходимость в очистке поверхности теплообменника, а также в выявлении режима работы аппарата и получении зависимости для расчета времени, по истечению которого необходимо восстанавливать поверхность теплообмена путем смывания ее водой для дальнейшей ее эксплуатации.

Материалы и методы

Для построения методики расчета режима восстановления поверхности зададимся распределением потока тепла во времени.

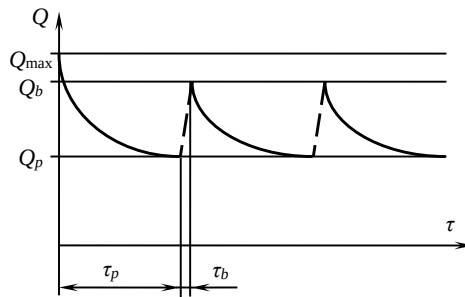


Рис. 2. К расчету теплового потока на оребренных трубах подверженных интенсивному загрязнению внешней поверхности

Fig. 2. To calculate the heat flow on finned pipes exposed to intense contamination of the external surface

Очевидно, что максимальный поток $Q_{\max}$ при $\tau = 0$ (рис. 2). При уменьшении значения теплового потока до Q_p , которое происходит за время τ_p , начинается восстановление поверхности. Полное восстановление поверхности невозможно, поэтому она восстанавливается до значения Q_b . На восстановление поверхности затрачивается время τ_b .

Тепловой поток за один цикл можно определить по формуле:

$$Q_1 = \int_0^{\tau_p} Q(\tau) d\tau \quad (1)$$

где τ_p – время работы между процессами восстановления поверхности, с; $Q(\tau)$ – зависимость теплового потока от времени, Вт.

На основе исследований, проведенных ранее, эту зависимость можно описать уравнением:

$$Q(\tau) = A \exp(-B\tau) + C \quad (2)$$

При значении интервала времени стремящимся к бесконечности тепловой поток стремиться к нулю, следовательно, $C = 0$. С другой стороны, в начальный момент времени, тепловой поток имеет максимальное значение, таким образом, $A = Q_{\max}$. Тогда зависимость преобразуется к виду:

$$Q(\tau) = Q_{\max} \exp(-B\tau) \quad (3)$$

или, при условии большого количества циклов

$$Q(\tau) = Q_b \exp(-B\tau) \quad (4)$$

Здесь параметр B зависит от технологических параметров потока парогазовой смеси, конструктивных размеров оребренной трубы, имеет размерность $1/\text{с}$ и определяется для каждого случая отдельно.

Следует отметить, что общее время эксплуатации поверхности теплообмена складывается из времени работы и времени восстановления поверхности. Однако, если восстановление поверхности происходит высоконапорным потоком воды, то время на восстановление поверхности на несколько порядков меньше поэтому в оценочных расчетах им пренебрегаем.

После интегрирования можно записать:

$$Q_1 = \frac{Q_b}{B} (1 - \exp(-B\tau_p)) \quad (5)$$

Экономия электроэнергии благодаря работе теплообменного аппарата определится:

$$P_Q = Q_1 n_\tau P_1 \quad (6)$$

где n_τ – количество циклов работы за год; P_1 – стоимость единицы энергии, руб./Дж.

С другой стороны, увеличение количества циклов работы приведет к росту объема потребляемой воды на восстановление поверхности теплообмена. Эти расходы можно определить по уравнению:

$$P_V = V_1 n_\tau P_{V1} \quad (7)$$

где V_1 – объем воды, затрачиваемый на одно восстановление поверхности, м^3 ; P_{V1} – стоимость использования воды руб./ м^3 .

Следует отметить, что стоимость использования воды складывается из стоимости воды по тарифу и платы за сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод, которые, как правило, значительно больше.

Таким образом, расходы на электричество, с учетом их снижения затрат на подогрев воды теплом парогазовой смеси и увеличении затрат на подачу воды для восстановления поверхности, определяются:

$$P_{\Sigma} = P_e + P_v - P_Q \quad (8)$$

Минимум этой функции определится по соотношению:

$$\frac{dP_{\Sigma}}{dn_{\tau}} = V_1 P_{V1} - Q_1 P_1 = 0 \quad (9)$$

После преобразования можно получить:

$$V_1 P_{V1} = Q_1 P_1 \quad (10)$$

Окончательное выражение связывающие параметры для нахождения минимальных затрат запишется:

$$\frac{Q_b}{V_1 B} (1 - \exp(-B \tau_p)) = \frac{P_{V1}}{P_1} \quad (11)$$

Следовательно, время работы между процессом восстановления поверхности определяется:

$$\tau_p = -\frac{1}{B} \ln \left(1 - \frac{P_{V1} V_1 B}{P_1 Q_b} \right) \quad (12)$$

Для удобства представления времени загрязнения поверхности введем понятие снижение теплового потока в два раза. Тогда параметр B можно определить по формуле:

$$B = -\frac{1}{\tau_{1/2}} \ln \left(\frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

Наблюдения за работой теплообменных аппаратов в качестве утилизаторов тепла парогазовой смеси на предприятии по производству бумаги санитарно-гигиенического назначения показали, что этот период примерно равен 1 месяц. Таким образом, параметр B равен:

$$B = -\frac{1}{30 \cdot 24 \cdot 3600} \ln \left(\frac{1}{2} \right) = 2,7 \cdot 10^{-7} \quad (14)$$

Результаты

При формировании осадка за счет инерционного механизма осаждения частиц его толщина существенно отличается по поверхности, о чем написано в представленном литературном обзоре. Однако, при изучении осадка на установленном на предприятии «ПАЛП Инвест» теплообменном аппарате было замечено, что осадок имеет практически симметричный профиль относительно оси труб. Исходя из этого, можно предположить механизм образования осадка, а именно частицы целлюлозы перемещаются к поверхности теплопередачи вместе с каплями конденсирующегося пара. Поэтому поток массы частиц к поверхности одинаковый по всем направлениям.

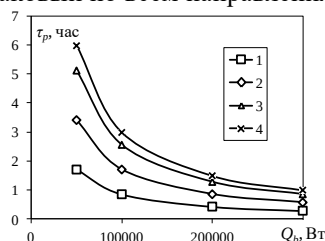


Рис. 3. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности. $P_{V1} = 750$ руб./ м^3 ; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $V_1, \text{м}^3$: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75

Fig. 3. The dependence of the operating time between the recovery process on the heat flow and the volume of water spent on one surface restoration. $P_{V1} = 750$ руб./ м^3 ; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $V_1, \text{м}^3$: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75

Из рисунке 3 видно, что период восстановления поверхности заметно снижается с увеличением значения восстановленного теплового потока. Это объясняется

необходимостью снижения термического сопротивления создаваемого слоем осадка. Например, если для поддержания теплового потока 50 кВт необходимо смывать осадок каждые 6 часов, то для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут. Также прослеживается сильная зависимость от объема подаваемой воды на одну промывку. Подавая 0,5 м³ воды необходимо повторять процедуру восстановления каждые 1,7 часов, а при 1,75 м³ это значение составит 6 часов.

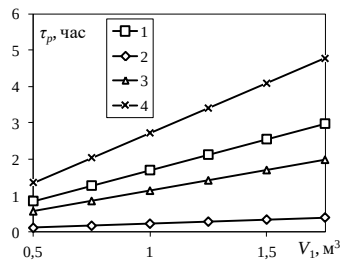


Рис. 4. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. P_{v1} , руб./м³: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Fig. 4. The dependence of the operating time between the recovery process on the volume of water spent on one surface restoration and the cost of using water. $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. P_{v1} , руб./м³: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Ожидаемая зависимость получилась от стоимости воды (рис. 4). Если подавать на одну промывку 1,75 м³ воды при ее стоимости 100 руб./м³ то время работы составит 0,44 часа, а если стоимость увеличится в 12 раз то и время, соответственно, должно быть увеличено примерно в 12 раз.

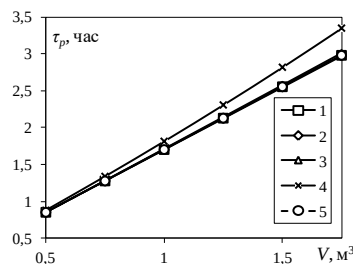


Рис. 5. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. $P_{v1} = 750$ руб./м³; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. B , 1/с: 1 – $2,7 \cdot 10^{-7}$; 2 – $2 \cdot 10^{-8}$; 3 – $2 \cdot 10^{-6}$; 4 – $2 \cdot 10^{-5}$; 5 – линия полученная по формуле $\tau_p = \frac{P_{v1} V_1}{P_1 Q_b}$

Fig. 5. The dependence of the operating time between the recovery process on the volume of water spent on one surface restoration and the cost of using water. $P_{v1} = 750$ руб./м³; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. B , 1/с: 1 – $2,7 \cdot 10^{-7}$; 2 – $2 \cdot 10^{-8}$; 3 – $2 \cdot 10^{-6}$; 4 – $2 \cdot 10^{-5}$; 5 – the line obtained by the formula $\tau_p = \frac{P_{v1} V_1}{P_1 Q_b}$

Достаточно интересная зависимость получилась при выявлении влияния параметра B на режим восстановления поверхности (рис. 5). Исследования демонстрируют очень слабую зависимость от параметра B . Также исследования показали, что с достаточной для инженерных расчетов точностью можно использовать упрощенную формулу для определения время работы между процессом восстановления поверхности:

$$\tau_p = \frac{P_{v1} V_1}{P_1 Q_b} \quad (15)$$

Эта формула позволяет упростить понимание рационального режима работы теплообменника, работающего в условиях интенсивного загрязнения поверхности.

Обсуждение

Следует отметить, что возможна организация замкнутого цикла использования воды при восстановлении поверхности. В этом случае необходимо подбирать объем емкости для сбора воды таким образом, чтобы частицы успевали оседать на дно. В емкость возможно добавления порошкообразного коагулянта «полиакриламид серии АК 631, марки А930», так как он уже используется в системе очистки воды от частиц

целлюлозы, или его аналога, что позволит укрупнять частицы для их более простого отделения. Обычно используется техническая вода которая имеется на предприятии. Ее использование не приведет к коррозии, так как все элементы проточной части аппаратов и трубопроводы изготовлены из нержавеющей стали способной работать при температуре до 250 °С. Брикет, из уловленных частиц целлюлозы, уже изготавливается на предприятии, поэтому предлагаемый способ очистки поверхности не потребует установки дополнительного оборудования. Теплота сгорания получаемых брикетов ниже теплоты сгорания топлив, которое наиболее часто используется в настоящее время. Поэтому их можно использовать только в бытовых условиях.

Заключение

В заключение можно отметить, что выбор рационального режима эксплуатации теплообменного аппарата позволит значительно сэкономить расход воды на восстановление поверхности, а также извлечь наибольшее количество тепла из парогазовой смеси. Кроме того, решается еще и экологическая проблема, связанная с выбросами частиц в атмосферу вместе с парогазовой смесью. Уловленные частицы целлюлозы можно спрессовать и высушить, а полученные брикеты использовать, например, в качестве топлива.

Литература

1. Bansal B., Chen X.D. A critical review of milk fouling in heat exchangers // Comprehensive reviews in food science and food safety. 2006. V. 5. N2. pp. 27–33.
2. Young A., Venditti S., Berrueto C., et al. Characterization of crude oils and their fouling deposits using a batch stirred cell system // Heat Transfer Engineering. 2011. V. 32, N3-4. pp. 216–227.
3. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., et al. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies—I. Energy recovery from flue gas // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 64, N1-2. pp. 213–223.
4. Khazhidinova A., Stepanova O., Yermolenko M., et al. Influence of contamination of low-temperature heating surfaces of boiler on the intensity of convective heat exchange during the burning of non-design fuel // Heat Transfer Research. 2022. V. 53, N1. pp.83–96.
5. Bujak J.W. Heat recovery from thermal treatment of medical waste // Energy. 2015. V. 90. pp. 1721–1732.
6. Syrodoj S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., et al. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels // Journal of the Energy Institute. 2018. V. 91, N6. pp. 1091–1101.
7. Zhang Y., Du X., Yue M., et al. Heat transfer and ash deposition performance of heat exchange surface in waste incineration flue gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 155. pp. 119691.
8. Bell I.H., Groll E.A. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31, N5. pp. 742–749.
9. Wallhäußer E., Hussein M.A., Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry // Food Control. 2012. V. 27, N1. pp. 1–10.
10. Karlovich T.B. Heat Transfer of Circular Finned Tubes with Nonuniform Operational Fouling of the Interfin Space // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. V. 91, N5. pp. 1211–1219.
11. Davoudi E., Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers // Chemical Engineering Research and Design. 2018. Vol. 130. pp. 138–153.
12. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 115. pp. 406–417.
13. Kapustenko P.O., Klemeš, J.J., Matsegora O.I., et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger // Energy. 2019. V. 174. pp. 1049–1059.
14. Schnöing L., Augustin W., Scholl S. Fouling mitigation in food processes by modification of heat transfer surfaces: A review // Food and Bioprocess Processing. 2020. V. 121. pp. 1–19.
15. Siebeneck K., Lüken J., Lu Y., et al. Aging and thermal conditioning of modified heat exchanger surfaces—impact on crystallization fouling // Heat Transfer Engineering. 2017.

V. 38, N7-8. pp. 818–828.

16. Liu D.Z., Jindal S., Amamcharla J., et al. Evaluation of a sol-gel-based stainless steel surface modification to reduce fouling and biofilm formation during pasteurization of milk // *Journal of dairy science*. 2017. V. 100. N4. pp. 2577–2581.

17. Li J., Du W., Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 113. pp. 1033–1046.

18. Mavridou S.G., Bouris D.G. Numerical evaluation of a heat exchanger with inline tubes of different size for reduced fouling rates // *International journal of heat and mass transfer*. 2012. V. 55. N.19-20. pp. 5185–5195.

19. Tang S.Z., Li M.J., Wang F.L., et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers // *Fuel*. 2019. V. 251. pp. 316–327.

20. Li M.J., Tang S.Z., Wang F.L., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 126. pp. 737–761.

21. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Шарипов И.И., Галимова А.Р. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 60–74.

22. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Гумерова Г.Х. Оценочный расчет процесса теплообмена в камере сгорания при сжигании природного газа // *Вестник технологического университета*. 2018. № 2(21). С. 99–103.

23. Зинуров В. Э., Галимова А. Р., Бадретдинова Г. Р., Санников И. В. Исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность // *Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом; 2-4 июня 2021 г., Иваново*. С. 241–243.

Авторы публикации

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р.техн.наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Бадретдинова Гузель Рамилевна – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Борисова Светлана Дмитриевна – канд. тех. наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура», Казанский государственный энергетический университет.

Николаев Андрей Николаевич – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

References

1. Bansal B, Chen XD. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2006;5(2):27-3. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00080.x>

2. Young A, Venditti S, Berruoco C, et al. Characterization of crude oils and their fouling deposits using a batch stirred cell system. *Heat Transfer Engineering*. 2011;32(3-4):216-7. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.495603>

3. Kilkovsky B, Stehlik P, Jegla Z, et al. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies–I. Energy recovery from flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 64(1-2):213-3. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.041>

4. Khazhidinova A, Stepanova O, Yermolenko M, et al. Influence of contamination of low-temperature heating surfaces of boiler on the intensity of convective heat exchange during the burning of non-design fuel. *Heat Transfer Research*. 2022;53(1):83-6. doi:

10.1615/HeatTransRes.2021040471

5. Bujak JW. Heat recovery from thermal treatment of medical waste. *Energy*. 2015;90:1721–1732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.124>
6. Syrodoy SV, Kuznetsov GV, Gutareva NY, et al. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):1091-1. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.06.014>
7. Zhang Y, Du X, Yue M, et al. Heat transfer and ash deposition performance of heat exchange surface in waste incineration flue gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;155:119691. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119691>
8. Bell IH, Groll EA. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(5):742-9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.019>
9. Wallhäußer E, Hussein MA, Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. *Food Control*. 2012;27(1):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.033>
10. Karlovich TB. Heat Transfer of Circular Finned Tubes with Nonuniform Operational Fouling of the Interfin Space. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(5):1211-9. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1850-8>
11. Davoudi E, Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;130:138-3. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.017>
12. Hosseini SB, Khoshkhoo RH, Malabad SMJ. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2017;115:406-7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.110>
13. Kapustenko PO, Klemeš, JJ, Matsegora OI, et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger. *Energy*. 2019;174:1049-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.026>
14. Schnöing L, Augustin W, Scholl S. Fouling mitigation in food processes by modification of heat transfer surfaces: A review. *Food and Bioprocess Processing*. 2020;121:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.013>
15. Siebeneck K, Lüken J, Lu Y, et al. Aging and thermal conditioning of modified heat exchanger surfaces—impact on crystallization fouling. *Heat Transfer Engineering*. 2017;38(7-8):818-8. <https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1206431>
16. Liu DZ, Jindal S, Amamcharla J, et al. Evaluation of a sol-gel-based stainless steel surface modification to reduce fouling and biofilm formation during pasteurization of milk. *Journal of dairy science*. 2017;100(4):2577-1. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12141>
17. Li J, Du W, Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface. *Applied Thermal Engineering*. 2017;113:1033-6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.198>
18. Mavridou SG, Bouris DG. Numerical evaluation of a heat exchanger with inline tubes of different size for reduced fouling rates. *International journal of heat and mass transfer*. 2012;55(19-20):5185-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.020>
19. Tang SZ, Li MJ, Wang FL, et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers. *Fuel*. 2019;251:316-7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.045>
20. Li MJ, Tang SZ, Wang FL, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:737-1. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
21. Zinurov VE, Dmitriev AV, Sharipov II, Galimova AR. Experimental study of heat exchange from a steam-gas mixture during heat transfer through a ribbed surface. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2021; 7(2(26)):60-74. (In Russ). doi: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-60-74
22. Dmitriev AV, Zinurov VE, Gumerova GH. Otsenochnyi raschet protsessa teploobmena v kamere sgoraniya pri szhiganiy prirodnogo gaza. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018; 21(2): 99-103. (In Russ).
23. Zinurov VE, Galimova AR. Issledovanie teploobmena ot parogazovoi smesi pri peredache tepla cherez rebristuyu poverkhnost'. In: Badretdinova GR, Sannikov IV, et al. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXI Benardosovskie chteniya), posvyashchennoi 140-letiyu*

izobreteniya elektrosvarki N.N. Benardosom; 2-4 Juny 2021; Ivanovo, Russia. pp. 241-243. (In Russ.).

Authors of the publication

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Guzel R. Badretdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Svetlana D. Borisovna – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey N. Nikolaev – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Получено **14.03.2022г.**

Отредактировано **21.03.2022г.**

Принято **22.03.2022г.**

К ОБСУЖДЕНИЮ

УДК 621.311

К ВОПРОСУ О СОВРЕМЕННОЙ ТРАКТОВКЕ СМЫСЛА ПОНЯТИЯ «ЭНЕРГИЯ» И ЕЕ СВОЙСТВ

О.С. Сироткин, Р.О. Сироткин

Казанский государственный энергетический университет
rsir@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* В рамках четвертого интегрально-дифференциального этапа развития научного знания, современной трактовки материи как совокупности массовой и энергетической составляющих, парадигмы ее многоуровневой организации (поля, вещества, материальные тела и мегамириальные системы), особенностей «корпускулярно-волнового дуализма», поставлена задача конкретизировать материальную сущность понятия «энергия». *МЕТОДЫ.* Метод решения поставленной задачи заключается в установлении причинно-следственной связи между характеристическими свойствами «энергии» и их носителем в виде конкретной разновидности материи. Проведен литературный обзор эволюции понятия «энергия». *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Определены отличительные характеристики «энергии» от дискретных форм материи: наличие у нее волновых свойств, разница в силе и протяженности энергетических континуумов гравитационной, электрической, химической, ядерной, тепловой и других видов энергии и способности осуществлять различные по силе («энергии») воздействия на дискретные материальные объекты и работу. Энергия обеспечивает способность к обменному взаимодействию и связыванию различными типами связи атомов, химических веществ, клеток, материальных тел и т.д. Энергия в совокупности с дискретными разновидностями материальных объектов определяет формы движения (физическая, химическая, биологическая, механическая и т.д.), взаимодействия и превращения материи, включая переход от одних ее разновидностей в другие. Уточнен смысл химической, электрической, тепловой и других видов энергии. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Показано, что энергия – это не просто свойство материи, а объективная реальность существования непрерывных пространственных форм её структурной организации (энергетический материальный континуум) в виде открытых и закрытых (внутри дискретных разновидностей материи) полей.

Ключевые слова: материя; энергия; масса; поле; вещество; материальное тело; энергетический континуум.

Для цитирования: Сироткин О.С., Сироткин Р.О. К вопросу о современной трактовке смысла понятия «энергия» и ее свойств // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 186-202.

ON THE ISSUE OF THE MODERN INTERPRETATION OF THE MEANING OF THE CONCEPT OF «ENERGY» AND ITS PROPERTIES

OS. Sirotkin, RO. Sirotkin

Kazan State Power Engineering University
rsir@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Within the framework of the fourth integral-differential stage of scientific knowledge development, the modern interpretation of matter as a set of mass and energy components, the paradigm of its multilevel organization (fields, substances, material bodies and megamaterial systems) and the features of «particle-wave dualism», an attempt was made to concretize the material essence of energy. *METHODS.* The method of solving the problem was to establish a causal relationship between the characteristic properties of «energy» and their carrier

in the form of a specific kind of matter. A review of literature data on the evolution of understanding the concept of «energy» was carried out. **RESULTS.** The distinctive characteristics of energy from discrete forms of matter were determined. These are wave properties, the difference in the strength and extent of the energy continuums of gravitational, electrical, electromagnetic, chemical, nuclear, thermal and other types of energy, and the ability to have various in strength («energy») effects on discrete material objects and work in general. This provides the ability to bind the latter (by various types of bonds) as elements of objects in the form of individual atoms, chemicals (including molecular ones), cells, material bodies, etc. It was also shown that energy in combination with discrete varieties of material objects determines the forms of motion (physical, chemical, biological, mechanical, etc.), interactions and transformations of matter, including the transition from one of its varieties to the others (for example, chemical to thermal). The meaning of chemical, electrical, thermal and other types of energy was clarified. **CONCLUSION.** Thus, it was shown that energy is not just a property of matter, but an objective reality of the existence of continuous spatial forms of matter structural organization (energy material continuum) in the form of open and closed (within discrete varieties of matter) fields.

Keywords: matter; energy; mass; field; substance; material body; energy continuum.

For citation: Sirotkin OS, Sirotkin RO. On the issue of the modern interpretation of the meaning of the concept of «energy» and its properties. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24 (1): 186-202.

«Прежде чем начать обсуждение,
нужно договориться о понятиях»

Аристотель

«Хорошо поставить вопрос,
значит наполовину решить его»

Д.И. Менделеев

«Есть мнение, что мы отстали от прошлого»

Академик РАН А.М. Матвиенко

Введение

Кризис в эволюции научного знания XXI века сегодня становится все более очевидным. Это связано с наличием сегодня двух основных глобальных проблем в развитии научного знания. *Первая:* особую остроту в науке, образовании и естествознании в целом приобрели проблемы раздробленности научного знания и выработки единого универсального взгляда на устройство Мироздания, а также выяснения фундаментальных причин многообразия явлений и объектов окружающего нас мира Земли и Мироздания в целом. При этом все больше в ущерб развитию фундаментальных основ научного знания преобладают тенденции перекоса в сторону решения прикладных эмпирических задач. Следствием этого является *вторая проблема:* все более назревающее противоречие между накапливающейся отдельной эмпирической информацией («разбросанной» в около 17000 различных научных дисциплинах) и значительной частью традиционных, но устаревающих научных парадигм [1-4]. То есть знание сегодня раздроблено, как дерево на отдельные веточки, а вот корней и единого объединяющего их ствола не видно. Затормозился прогресс и в развитии современных научных подходов к изучению материи, ее разновидностей, строения Мироздания в целом, в том числе и ввиду бесполезных попыток уравнивать научно-материалистические подходы с мифологией и религией (например, в теологии) [3-5]. В результате, уровень естественнонаучного образования сегодня настолько деградировал, что наши студенты и преподаватели не могут грамотно с современных позиций дать определения даже основным базовым фундаментальным научным понятиям. Они уже не помнят и вряд ли смогут раскрыть современный смысл таких понятий как «материя», «вещество» (и его разновидностей), «поле», «атом», «молекула», «энергия» и т. д. Поэтому сегодня пора не только разобраться в сути давно устаревших догм и парадигм, но и в сути современного смысла этих базовых научных понятий. Это и должно стать основой современного воспитания наших школьников и студентов в противовес «современным идеалистам» и агностикам, по сути, обслуживающих определенную часть олигархов, в их попытках превратить нашу молодежь в грамотных производителей услуг и навыков или «квалифицированных потребителей». То есть, в роботоподобного «человека» -

ремесленника, владеющего лишь необходимыми для конкретной работы узкими профессиональными компетенциями, а не в «человека - творца», опирающегося на системное фундаментальное образование, к чему стремились в Советской школе [3, 4]. Поэтому наступила пора восстанавливать и далее совершенствовать основы естественнонаучных знаний, в том числе, базовых научных понятий.

Литературный обзор

«Энергия» является важнейшим естественным и фундаментальным понятием, раскрывающим, совместно с «массой», смысл и особенности характеристик главной объективной научной реальности – *материи*. Для вузов энергетического профиля понятие «энергия» имеет особое значение, так как определяет специфику объекта изучения, применения и управления электрической и тепловой энергетики в жизнеобеспечении человечества. Однако смысл ее традиционных определений тоже уже нуждается в уточнении и в эволюционном материалистическом развитии. Термин «энергия» происходит от греческого слова *ἐνέργεια*, которое впервые появилось в работах древних материалистов, включая Аристотеля, и обозначало *действие* или *действительность*. Термин «*действительность*» уже тогда подчеркивал объективность реального существования энергии. Исторически [2-9] вначале вместо термина «энергия» употреблялся термин «живая сила», введенный по разным источникам И. Ньютоном или Г. Лейбницем. В 1667 году И. Бехером был введен термин флогистон (горючий, воспламеняемый) как гипотетическая «сверхтонкая материя», якобы наполняющая все горючие вещества и высвобождающаяся при горении. В 1783 году А. Лавуазье ввел понятие «теплород», под которым понимали невесомый флюид, объективно присутствующий в каждом материальном объекте. Фактически эти два ученых впервые, вслед за Аристотелем, попытались «материализовать» энергию, как объективную реальность. Однако М.В. Ломоносов, Р. Бэкон и др. опровергли этот взгляд, а природу возникновения «теплоты» (без определения носителя энергии) связали с движением внутренних частей (элементов) тел, которые Михайло Васильевич назвал корпускулами (молекулами). При этом не был дан ответ на вопрос, а как связана величина этой «теплоты» с разницей в природе материальных тел и что же такое все-таки «теплота»? В 1798 году Б.Томсон обнаружил, что при сверлении каналов орудийных стволов выделяется большое количество теплоты, что после дополнительных опытов Г.Дэви подтвердило вывод о том, что *причина появления «теплоты»* (но не энергии в целом) заключается в движении. То есть был показан один из вариантов получения теплоты (трением), но не был дан ответ на вопрос какова ее материальная сущность или природа этого явления и формы проявления в различных материальных объектах. Сегодня этот эффект объяснен в рамках «механохимии», через выделение тепловой энергии при разрыве химических связей под действием механического воздействия. То есть, по сути, речь шла только о тепловой энергии и горении. Причем реально были вскрыты лишь причины выделения теплоты (при повышении движения элементов тел, например, вследствие трения), без признания наличия в них «внутренней энергии» Г. Гельмгольца (или энергии связи элементов в спокойном состоянии), который ввел этот термин вместо понятия «теплород», развивая идеи И. Бехера и А. Лавуазье. Сам же термин «энергия» вместо понятия «живая сила» был введен в 1807 году английским физиком Томасом Юнгом. В науку термин «энергия» в современном его смысле ввел Уильям Томсон в 1860 году. Особенности свойств этого явления, как «закона сохранения и превращения энергии», было введено в научное обращение Ф. Энгельсом, что позволило все виды энергии измерять в одних единицах. В качестве такой единицы принят джоуль ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$). В своих лекциях по физике, прочитанных в 1961-1963 годах в Калифорнийском технологическом университете, известный американский физик Р. Фейнман отмечал [1], что в рамках закона сохранения энергии «существует определенная величина, называемая *энергией*, которая не меняется ни при каких превращениях, происходящих в природе». А точнее, по нашему мнению, «не теряется и не исчезает». И «само это утверждение весьма и весьма отвлеченно; это по существу математический принцип...» «Важно понимать, что *физике сегодняшнего дня неизвестно, что такое энергия*». В 2001 году И.В. Плачков и др. (Украина) отвечая на вопрос, что представляет собой понятие «энергия», отмечал, что «по большому счету понятие *энергии*, *идея энергии искусственны* и созданы специально для того, чтобы быть результатом наших размышлений об окружающем мире». Далее они утверждают, «что в отличие от *материи*, о которой мы можем сказать, что она существует, *энергия – это плод мысли человека*, его «изобретение», построенное так, чтобы была возможность описать различные изменения в окружающем мире ...». Вряд ли с этим можно согласиться, так как это противоречит не только материалистическим идеям Аристотеля, И.

Бехера, А. Лавуазье Г. Гельмгольца и др. Ведь *энергия*, по мнению авторов настоящей статьи, это объективная материальная реальность, так как она давно и широко используется человечеством для решения проблем своего жизнеобеспечения (тепло, электричество, производство материалов и т.д.). Поэтому пора, наконец, попытаться разобраться, что такое энергия, по сути, и в какой материальной форме она существует в Мироздании. Ведь отсутствие материалистического понимания энергии как объективной реальности, объективно затрудняет возможности создания и развития новых эффективных технологий ее получения и применения на практике в рамках решения проблем энергетики в целом [1-33].

Цель настоящей работы – рассмотрение и уточнение современного материалистического смысла понятия «энергия», ее характеристик и свойств в рамках современных эволюционных взглядов на организацию материи как важнейшего естественнонаучного понятия и объекта исследования в энергетике и естествознании в целом.

Материалы и методы

Решение поставленной задачи опирается на использование универсальной *методологической системы* следующих логически и строго связанных, вытекающих друг из друга базовых естественнонаучных понятий, определяющих возможность изучения фундаментальных особенностей любых дискретных разновидностей *материальных объектов* (веществ и материальных тел): *состав и разновидность энергии связи элементов* их составляющих – *структура (строение)* – *свойство*. Метод решения поставленной задачи заключается в установлении причинно-следственной связи между характеристическими свойствами «энергии» и их носителем в виде конкретной разновидности материи. При этом в рамках современной парадигмы многоуровневой организации материи [4] для более точного понимания различий в объектах, составляющих Мироздание, сегодня необходимо различать четыре основных структурных уровня организации материи, составляющих систему Мироздания [2-5]. К ним относят *поля, вещества* (атомные и элементарные физические, молекулярные и немоллекулярные химические, биологические и т.д.), *материальные тела* как совокупность различных веществ и полей (тела животных и геобразований, планет и т.д.) и *мегаматериальные системы* (звездные системы, галактики и т.д.). Это предполагает использование в решении поставленной задачи комплексного интегрально-дифференциального подхода, соответствующего современному – четвертому – этапу развития естествознания [2-4].

Результаты и обсуждение

Проведем анализ недостатков традиционного понимания смысла понятия «энергия». Помимо учета признаний в непонимании материального смысла понятия «энергии» американского физика Р. Фейнмана [1] или вообще отрицания ее объективного существования в принципе (смотри введение), рассмотрим недостатки традиционных ее определений. Понятие «энергия» трактуется сегодня по-разному, в том числе и с использованием традиционных, но уже недостаточно точных для XXI века определений [6]. Например, *энергия* (E) — это физическая величина, показывающая, какую работу может совершить тело (или несколько тел) или энергия тела. В другом варианте *энергия* (греч. *ἐνέργεια* – действие, деятельность, сила, мощь) — это скалярная физическая величина, являющаяся единой мерой различных форм движения и взаимодействия материи, мерой перехода движения материи из одних форм в другие.

Во-первых, в рамках четвертого (интегрально-дифференциального) этапа развития научного знания и парадигмы многоуровневой организации вещества и материи [2-4] вызывает сомнение правильность называть любую энергию «физической величиной» (ведь есть химическая и другие виды энергий). Правильней использовать более точное и универсальное научное понятие «*материальная величина*». Во-вторых, энергия (так как мы ею пользуемся на практике) все-таки—это не просто абстрактная величина, характеризующая способность материи (правда пока непонятно какой?) к работе или меру различных форм движения и взаимодействия материи, а объективная реальность, существующая независимо от сознания людей. *Ведь если есть свойство, то обязательно есть и его материальный носитель. Трудно опровергнуть это абсолютно логически точное утверждение!* Особо следует отметить путаницу в классификации различных видов энергий и, по сути, непонимание разницы между разновидностями энергий и их свойством определять различные формы движения материи. Например, традиционно говорят, что «механическая энергия» проявляется в непосредственно наблюдаемом движении материальных тел. Но при этом не раскрывается материальная суть «механической» разновидности энергии, заставляющей двигаться различные тела (гравитационная,

химическая в двигателе внутреннего сгорания и т.д.). То есть, ее опять ассоциируют со свойством или силой, неизвестно какой разновидности материи, определяющим механическую форму движения тел или даже с самим понятием энергии. Например, насколько правильно говорить *«механическая энергия»* или все-таки следует говорить *«механическая форма движения материи в виде материальных тел, под действием гравитационной, химической или ядерной разновидностей энергий»*? Ведь движение материального тела в виде камня, человека, автомобиля и т.д. под гору является следствием, прежде всего, гравитации (гравитационной энергии), движение автомобиля по ровной площадке или в гору – следствием химической энергии, выделяемой в процессе химического превращения топлива в двигателе, с преодолением гравитационной энергии. В свою очередь, при механическом движении автомобиля с горы, его скорость будет определяться суммарной величиной гравитационной и химической энергий. Поэтому, движущиеся силы для различных материальных объектов могут быть разными или даже суммарными, а *форма движения материи* определяется разновидностью движущихся материальных объектов и их превращениями. Например: движение материальных тел – *механическая*, атомы и элементарные частицы – *физическая*, молекулярные и немолекулярные химические соединения элементов и их превращения – *химическая*, клетки – *биологическая* и т.д. При этом, величину различных видов энергий, определяющих взаимодействие элементов, составляющих различные дискретные материальные объекты (материальные тела и виды веществ) или формы их движения, можно связать с типами полей их связывающих. Например, разница в свойствах полей (волновых, протяженности, силах ее воздействия или глубине их проникновения в вещества и материалы), позволяет различать *гравитационную, электрическую, магнитную, химическую, ядерную и другие виды энергий*. Однако, далее необходимо ответить на главный вопрос настоящего исследования: в чем же заключается единство природы различных видов энергий и в какой материальной форме они существуют? Ведь сегодня традиционный подход к энергии и массе, просто как к характеристикам материи, а не к объективной реальности, приводит к формально правильным, но фактически ошибочным попыткам новой трактовки ряда традиционных фундаментальных материалистических положений [7, 8]. Например, таких формулировок, как «энергия не возникает из ничего, и не исчезает бесследно, а только переходит из одной формы в другую» или «масса превращается в энергию». Ведь, по мнению авторов статьи [7], так как «эти размерные физические величины являются лишь количественными мерами определенных свойств материи, то, безусловно, никаких превращений массы в энергию при этом не происходит!» «Превращение массы в энергию, то есть, условно говоря, «килограмма» в «джоули»! Это, очевидно, абсурд» [8]. То есть для них энергия – это просто количественная мера, а не специфическая реальная субстанция [8, с.181]. Но, как же тогда явление «дефекта массы», проявление корпускулярно-волнового дуализма или тепло в наших домах? Это, что не материальная реальность, а просто условные виртуальные явления? Мало того, на этой основе делается вывод об устаревшей трактовке специальной теории относительности (СТО) и уравнения Эйнштейна, связывающего массу и энергию [8]. Хотя понятно, что эти выводы основаны, прежде всего, на формальном понимании энергии, просто как условной характеристики материи и на отрицании ее существования как объективной материальной реальности. И здесь, по нашему мнению, очевидно нарушение логики в этих рассуждениях: энергия вроде как есть, так как она характеризуется конкретными свойствами, а реально не существует материальной субстанции ее несущей? Ведь свойство всегда является следствием чего-то или какой-то субстанции, то есть у любого свойства есть свой материальный носитель. И, следовательно, отрицание объективного материалистического существования энергии, противоречит выше сформулированному методу решения поставленной в настоящей работе крайне непростой задачи, греша нарушением логики в рамках идеологии агностиков.

Поэтому вышерассмотренные традиционные определения энергии, по мнению авторов настоящей статьи, уже устарели, по сути, ввиду того, что *«энергия» представляется просто как «свойство» материи* (в вышеприведенной методологической цепочке понятий) совершать работу или характеристика меры различных форм движения и взаимодействия материи *без раскрытия ее материальной сущности или принадлежности к конкретной разновидности материи*. Ведь именно *свойством энергии* как раз и является *возможность взаимодействовать и связывать* (связи физические, химические и т.д.) *дискретные разновидности материи* в качестве «элементов» в различные вещества (атомы, молекулы, клетки) и материальные тела, *производит работу* и т.д. Непонятно, однако, какая же, все-таки, форма существования материи реально обладает этими свойствами или характеристиками? Поищем ответ на этот вопрос, начиная с истории развития взглядов на строение материи древних материалистов.

Древние материалисты Греции заложили два различных взгляда, или гипотезы, на строение материи [9, с. 108]. В первой (Аристотель 384-322 до н.э.) вещество делится на мелкие частицы и нет предела его делимости, то есть вещество непрерывно в своем делении на составляющие элементы. Эта гипотеза заложила *начала концепции непрерывности, или континуальности, структурной организации материи*. Другая гипотеза (Левкипп 5 в. до н.э., его ученик Демокрит и далее философ-материалист Эпикур) предполагала, что вещество состоит из мельчайших *частиц*, называемых «атомами». Она вылилась в *концепцию атомизма, или дискретного строения материи*: «атомы» плюс «пустота» [9]. Фактически, это два противоположных взгляда на строение, или структурной организации материи, соответственно, *интегральный и дифференциальный*. То есть, материя существует в виде двух основных структурных форм, или разновидностей: *прерывной* (дискретной, или массовой, реальности) и *непрерывной* (континуальной реальности). Выбирая из этих двух базовых структурных разновидностей существования материи (дискретной – частица и непрерывной – поле) для последовательного материалиста, очевидно, что вышеотмеченными свойствами материи (совершать работу, связывать дискретные формы материи и т.д.) обладает, прежде всего, непрерывная–полевая форма материи. Это связано с ее *большой* (по сравнению с дискретной материей) *способностью быстрого перемещения в пространстве, лабильностью и свойством к трансформации, реакционной способностью и возможностью более разнообразного воздействия на дискретные разновидности материи*, включая универсальное обменное взаимодействие. При этом прерывные – дискретные формы материи более низких уровней структурной организации выступают в качестве элементов других более крупных материальных систем (элементарные частицы для атомов, атомы для молекул, планеты для звездных систем и т.д.).

В результате, можно предложить следующую дефиницию понятия энергии. *Энергия – это объективная реальность существования материи в виде непрерывных пространственных форм - полей или – это энергетический материальный континуум*. Поле представляет собой объективную реальность в виде пространственного (континуум) распределения материи, характеризуемого свойством обменного или связующего взаимодействия между дискретными формами материи, с различными по величине энергетическими (сила связи) и другими характеристиками. К характеристикам полей традиционно относят их волновые свойства (λ), протяженность в пространстве (дально- или ближкодействие), величину сил (энергию в традиционном понимании), удерживающих или оказывающих воздействие на элементы, составляющие различные материальные объекты, способность к связыванию различных дискретных разновидностей материи, трансформации различных полей друг в друга (например, химической в тепловую и т.д.) или проникиванию в другие объекты и т.д. Поэтому следует различать *открытые* (делокализованные) и *закрытые* (локализованные или замкнутые внутри дискретных разновидностей материи) *поля*. В качестве *открытых полей*, формирующих бесконечное пространство на макро- и мегауровнях организации материи и Мироздания в целом [4], можно привести, например, *гравитационный энергетический континуум*, осуществляющий обменное взаимодействие и связь, прежде всего, между *материальными телами*, а также определяющий особенности механической формы движения материи. В качестве *закрытых полей*, формирующих конечное (локализовано замкнутое) пространство *внутри дискретных вещественных форм материи*, можно привести *ядерный или химический энергетические континуумы*, осуществляющие различные по силе взаимодействия и обеспечивающие связи элементов (элементарных частиц и атомных остовов – химических элементов), составляющих, соответственно, атомы и химические соединения на их основе.

Например, в качестве демонстрации объективного существования химической энергии, существующей в виде *закрытого (замкнутого) энергетического континуума* – электрического поля (как результат обменно-электростатического взаимодействия) между химическими элементами вещества (в виде атомных остовов) можно привести рисунки распределения электронной плотности обобществленных (валентных) электронов (ОЭ) между ними в ряде веществ. Современные воззрения на структуру химического вещества представляют её как «непрерывное зарядовое распределение (пространственное распределение электронной плотности (ρ)) ОЭ, в которое вкраплены атомные ядра» [11, 12]. При этом совокупность современных расчетно-теоретических и экспериментальных методов (квантово-механические расчеты и совокупность рентгеноструктурных методов) позволяет получать данные о характере межъядерного континуального распределения электронной плотности (ρ) в ряде химических соединений.

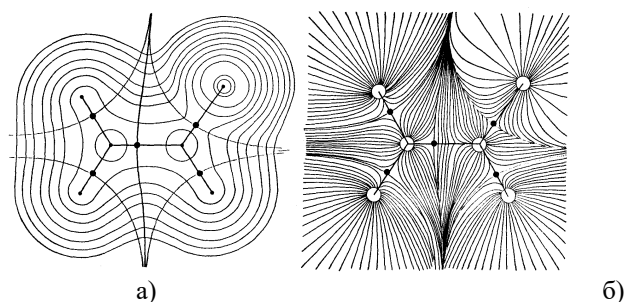


Рис. 1. Распределение электронной плотности энергетического континуума в молекуле $\text{CH}_2=\text{CHF}$

а – замкнутые изолинии соответствуют уровням функции $\rho(r)$; б – градиентные траектории. На обоих рисунках дополнительно показаны линии связи, седловые точки (крупные черные точки) и поверхности нулевого потока [11]

Fig. 1. The distribution of electron density of the energy continuum in the molecule $\text{CH}_2=\text{CHF}$;

a - closed contour lines correspond to the levels of the function $\rho(r)$; b - gradient trajectories. Both figures additionally show bond lines, saddle points (large black dots) and zero flow surfaces [11]

Сечение этой функции (рис. 1-3) напоминает карту гористой местности. Каждая из замкнутых изолиний соответствует определенному уровню электронной плотности ОЭ. Максимумы функции $\rho(r)$ приблизительно совпадают с положением ядерных структурных центров. Важно и положение так называемых седловых точек.

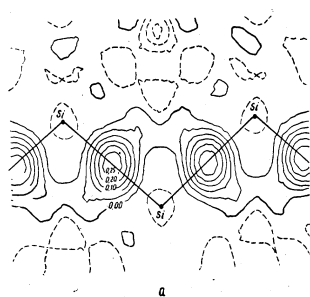


Рис.2 Сечение деформационной электронной плотности (ДЭП) энергетического континуума в кристалле кремния (а); избыточная плотность валентных электронов вдоль направления связи С-С в кристалле алмаза (б) [12]

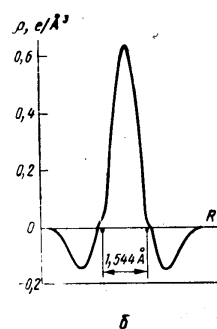


Fig. 2. Cross-section of the deformation electron density (DED) of the energy continuum in a silicon crystal (a); excess density of valence electrons along the C-C bond direction in a diamond crystal (b) [12]

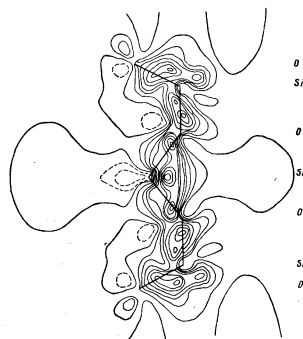


Рис. 3. Распределение электронной плотности энергетического континуума вдоль макромолекулярной цепочки связи Si-O-Si для кварца ($\square$ - SiO_2) [12, с.112]

Fig. 3. Distribution of the electron density of the energy continuum along macromolecular Si-O-Si bond chain for quartz ($\square$ - SiO_2) [12, p.112]

Для получения из этих сечений данных по характеристике взаимодействия атомов чаще всего используют так называемую *деформационную электронную плотность* $\Delta\rho(r)$ и градиентный анализ по Бейдеру. Функция $\Delta\rho(r)$ определяется как разность ($\rho - \rho_0$) наблюдаемого распределения электронной плотности и плотности сферически симметричных не взаимодействующих атомов. То есть $\Delta\rho(r)$ представляет собой перераспределение электронной плотности электрического замкнутого поля, или энергетического континуума, в результате химического связывания элементов. Из рис. 1-3 отчетливо прослеживается разница в пространственном распределении энергетического континуума закрытых полей электронного энергетического континуума между дискретной (массовой) разновидностью материи, в виде ядер или атомных остовов в различных веществах. Это и обеспечивает разницу в длине и энергии связи элементов их составляющих и далее отличия в структуре и свойствах веществ и материалов.

Эти разновидности энергий определяют также и особенности физических, химических (внутриуровневых) и физико-химических (межуровневых) форм движения и превращения этих вещественных разновидностей материи. Таким образом, мы ответили на главный вопрос настоящего исследования (*что такое энергия?*) и показали, что следует различать две разновидности *энергетического континуума* в виде *открытых и закрытых полей*.

Ответ на вопрос об отличиях в свойствах различных видов энергии следует искать на базе фундаментальных различий материальных объектов (смотри выше) в рамках парадигмы многоуровневой организации материи (поля, вещества, материальные тела и мегамириальные системы), особенностей корпускулярно-волнового дуализма и формулы (1) А. Эйнштейна, определяющей взаимосвязь энергии с массой.

В 1905 году физик А. Эйнштейн показал, что между массой (m) тела (вещества) и его энергией (E) существует следующая связь:

$$E = mc^2, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме.

При этом уравнение (1) связывают [13] не просто с энергией E любого материального тела, а с энергией связи элементов ($E_{св}$) ядра атома, то есть с *физической ядерной энергией*, в виде *закрытого энергетического континуума*, замкнутого внутри ядра атома. Причем обычно рассматривают *удельную энергию связи* (среднюю энергию связи, приходящуюся на один нуклон), зависящую от массового числа A , и чем она больше, тем устойчивей ядро. Для легких ядер (A менее 12) с увеличением A их $E_{св}$ резко возрастает до 6-7 МэВ. Например, для изотопа тяжелого элемента урана-238 она достигает 7,6 МэВ. Для сравнения отметим, что $E_{св}$ валентных электронов, обеспечивающих возникновение *химической энергии*, составляет 10 эВ, то есть в 10^6 раз меньше ядерной энергии. Отметим также, что масса ядра всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов (протонов и нейтронов) и эта разность называется *дефектом массы* Δm . Это связывают с тем, что при образовании ядра часть массы тратится на образование $E_{св}$ элементарных частиц в ядре. Данный эффект демонстрирует взаимосвязь межуровневых превращений вещества, описываемых *законом сохранения массы-энергии* при переходе одной разновидности вещества в другую (в данном случае, части вещества элементарных частиц в энергию), а также наоборот. Видимо тот же эффект, но в меньших масштабах должен наблюдаться и при химических превращениях веществ экзо- и эндотермического характера, а также биологических и т.д. Однако его уловить уже значительно труднее ввиду меньших по величине энергетических эффектов, протекающих при образовании химических связей из индивидуальных атомов или протекании химических реакций.

В начале 20-х гг. XX века физиками же было обнаружено, что волновые свойства присущи, в принципе, любым движущимся частицам вещества. Математически это выражается [10, 13] соотношением де Бройля:

$$\lambda = h / (mV), \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; V – скорость движения частицы (тела); mV – импульс частицы (p).

Соотношение (2) показывает, что для макрообъектов с большой массой и малыми скоростями движения длина их волны (λ) будет пренебрежимо малой ($\lambda \approx 10^{-28}$ - 10^{-30} см). При этом для микрочастиц, движущихся с высокими скоростями, λ может оказаться

существенной. То есть волновые свойства вещественных форм материи зависят от их массы и скорости движения. Отсюда следует, что со значительным ростом скорости движения вещества и материальные тела могут приобретать (дополнительно к внутренней или потенциальной энергии закрытых полей) волновые характеристики, то есть увеличивать их суммарную энергию, традиционно определяемую как кинетическую или «энергию движения».

В свою очередь, в рамках корпускулярно-волнового дуализма и выше рассмотренного в целом, целесообразно уточнить и понятие «масса». Под *массой* тела традиционно понимают меру инерции, определяемой как отношение силы к ускорению, которое она сообщает данному телу. Однако инерция — это тоже свойство или характеристика, но чего или какой материальной реальности? Что является ее носителем? Непрерывная или дискретная разновидность материи? Исходя из методологии, развиваемой в настоящей работе, под массой следует понимать количество или вес данного дискретного материального объекта (частицы, тела и т.д.) как совокупности масс элементов его составляющих, за минусом ее части, трансформированной в энергию связи этих элементов. При этом, учитывая, что «масса» — это не просто количество материи, характеризующее разницу в величине дискретности материальных систем, а объективная реальность, то подобно энергии, также конкретизируем это понятие. В отличие от энергии, *масса — это тоже объективная реальность, но уже в виде прерывных (локализованных) в пространстве форм (массовая материальная дискретность) существования материи* (в виде частиц вещества и материальных тел), часто называемая *массой покоя*. Причем составляющие ее элементы связаны энергетическим континуумом в виде закрытых энергетических полей (физических, химических и т.д.), которые следует называть *энергией покоя*. Последняя замкнута в закрытой равновесной материальной системе (атом, молекула, клетка и т.д.) в виде *потенциальной энергии*, которую можно извлечь в процессе внутриуровневого или межуровневого превращения веществ, например, для получения тепловой или электрической энергии.

В общем виде, закон сохранения массы и энергии при межуровневом превращении различных веществ демонстрируется [4] следующим (рис.4).

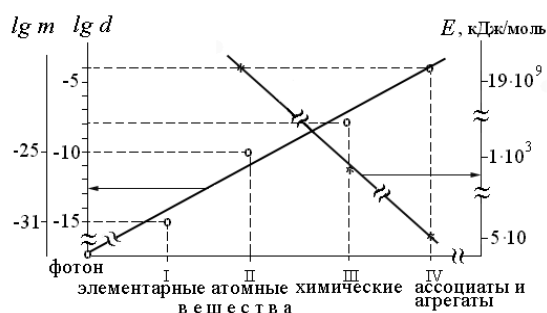


Рис. 4.Размерно-массовые и энергетические характеристики внутривещного взаимодействия элементов различных уровней организации вещества (единицы измерения массы m – кг, диаметра частиц d – м)

Fig. 4. Mass-dimensional and energy characteristics of the intrastructural interaction of elements of various levels of matter organization (units of mass, m , - kg, particle diameter, d , - m)

На основании рис. 4, в общем виде, энергия внутривещного взаимодействия элементов, составляющих различные вещества (то есть взаимодействия или связи элементов или частиц, их составляющих), отнесенная к единице их массы (удельная энергия), уменьшается по мере роста последней. Это можно представить как:

$$E / m = K, \quad (3)$$

где K – коэффициент пропорциональности, учитывающий закономерный характер обратной зависимости энергии внутривещного взаимодействия элементов соответствующего материального уровня от массы объекта, его образующего.

При этом характер изменения уровня величин энергии покоя, замкнутых в различных веществах в виде потенциальной энергии при переходе (см. рис.4) в ряду I – II – III – IV имеет вид, представленный на следующей гистограмме (рис.5).

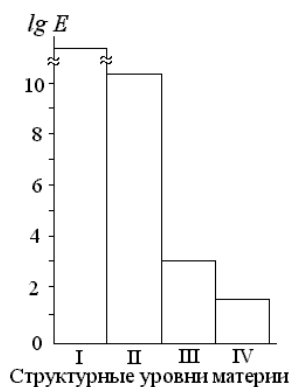


Рис. 5. Энергия замкнутых полей внутриструктурного взаимодействия частиц и уровни организации вещественной материи (единицы измерения E – кДж/моль): I – ультрамикрорфизический, II – микрорфизический, III – химический, IV – «макрорфизический» (надмолекулярный)

Fig. 5. Energy of closed fields of intrastructural interaction of particles and levels of material matter organization (units of measurement E - kJ/mol): I - ultramicrophysical, II - microphysical, III - chemical, IV - "macrophysical" (supramolecular)

То есть с ростом массы различных веществ при переходе (рис.4 и 5) от низшего к высшим уровням организации вещества (I – II – III – IV), удельная энергия связи элементов, его составляющих, уменьшается. И, наоборот, с ростом удельной энергии внутриструктурного взаимодействия веществ их масса уменьшается.

В результате, «материя» сегодня представляет собой уже не просто философское, а важнейшее естественнонаучное понятие, характеризующееся массой и энергией [4]. Материя (M) — это объективная реальность, существующая в виде различных материальных объектов (полей, веществ, материальных тел и мегамириальных систем), характеризующихся массой и энергией. Эти материальные объекты представляют собой совокупность масс (m) дискретных элементов их составляющих, связанных между собой различными энергетическими континуумами (E), которые отличаются друг от друга соотношением этих двух составляющих любой разновидности материи.

При этом, из уравнения 3 следует, что в случае, если в материальном объекте преобладает масса (m), то материя существует в виде дискретных ее форм или частичек (веществ и материальных тел), то есть характеризуется массовой структурной дискретностью (прерывностью в пространстве, наличием массы покоя, поверхности и комплексом свойств, отличных от свойств полей). В случае же, если в материальном объекте преобладает энергия (E), то материя существует в виде непрерывных ее форм (открытых и закрытых полей), то есть характеризуется непрерывностью в пространстве и представляет собой энергетический материальный континуум, с комплексом свойств, не имеющих у дискретных ее форм. Материальные тела представляют собой совокупность («смесь», или композицию) различных индивидуальных веществ (часто с границей раздела между ними) и полей в виде достаточно больших по массе материальных объектов (валун, ствол дерева, тело человека, планета Земля и т.д.).

При этом следует понимать, что даже поле (например, гравитационное), по воззрениям физической теории, подтверждающей взгляды Аристотеля, также состоит из еще более мелких частиц (кварков или гравитонов), определение массы которых пока экспериментально невозможно. Поэтому энергетический материальный континуум (поля) можно упрощенно представить, как интегральную компоненту материи (интеграл, то есть целый) в виде аналога суммы для бесконечного числа бесконечно малых слагаемых, типа кварков или гравитонов. В свою очередь, массовую материальную дискретность (вещества и материальные тела) можно представить через дифференциал (то есть через их различие в составе и типе связи, структуре и свойствах). Это и является фундаментальной основой перспективности развития современного интегрально-дифференциального материалистического подхода познания в рамках четвертого интегрально-дифференциального этапа развития научного знания в целом [2-4].

Предлагаемая система базовых понятий материи, форм существования материальных объектов и положение в ней энергии представлена на рис. 6.

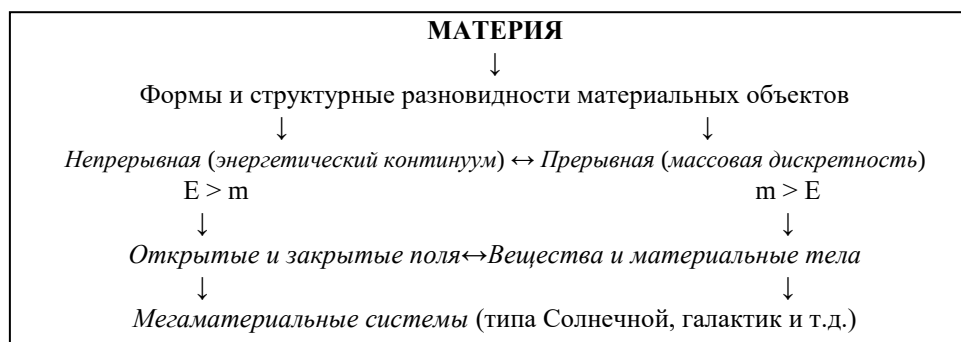


Рис. 6. Базовые разновидности материальных систем Fig. 6. Basic varieties of material system

В зависимости от особенностей *материального энергетического континуума*, обеспечивающего взаимодействие, или связь, различных материальных объектов друг с другом, следует различать следующие виды энергии. Это *замкнутая (замкнутая) физическая* (ядерная, кулоновская, электромагнитная и т.д.), *химическая* (ковалентные, металлические и ионные), *биологическая и т.д. энергии* в веществах, а также *открытая гравитационная энергия* между материальными телами в широком интервале масс и размеров и т.д. Отметим, что распространенность влияния той или иной энергии всегда ограничена и определяется видом материального объекта. Например, даже гравитационная энергия, несмотря на ее дальное действие и открытость, все равно практически не оказывает воздействие на наночастицы веществ (они не выпадают в осадок) и тем более на молекулы, атомы и элементарные частицы.

Сравнительная характеристика наиболее изученных видов энергий, определяющих формы движения материи, важнейшие разновидности связей элементов, составляющих различные виды веществ (физических, химических, биологических и т.д.) и материальных тел, а также уровень их взаимодействия между собой и глубину превращения друг в друга приведены в таблице 1. Они расположены с учетом безразмерной константы взаимодействия и его радиуса действия.

Таблица 1

Характеристика важнейших видов энергий и взаимодействий [4, 13]

Вид взаимодействия	Константа взаимодействия	Радиус действия
Гравитационное	$6 \cdot 10^{-39}$	∞
Электромагнитное	$1/137 (10^{-2})$	∞
Химическое	$\sim 20 \cdot 10^6$	$1-2 \cdot 10^{-8}$ см
Сильное	1	$(0,1-1) \cdot 10^{-13}$ см
Слабое	10^{-14}	меньше $0,1 \cdot 10^{-13}$ см (до $10^{-15}-10^{-22}$ см)

Конкретизируем современный смысл понятия *химическая энергия* как важнейшей объективной материальной реальности, заключенной в виде замкнутого энергетического континуума или связей элементов (С-Н и т.д.) в химических веществах, обеспечивающей решение подавляющего числа проблем в жизнеобеспечении человечества [10-19], как в плане производства электрической и тепловой энергии, так и всех видов материалов, питания, лекарств и т.д.

Химическая энергия – это объективная реальность в виде *энергетического континуума* *замкнутого (замкнутого) электрического поля*, *распределенного между суммарным отрицательным зарядом обобществленных электронов (ОЭ) и положительным зарядом химических элементов* (в виде ядер или атомных остовов) *вещества* [12]. Она возникает в процессе обменно-электростатического взаимодействия, обеспечивающего возникновение в нем химической связи в равновесно замкнутой и устойчивой материальной химической системе, в виде химического вещества. Этот *энергетический химический континуум* характерен для любых химических соединений элементов (химических веществ), отличаясь в них характером распределения электронной плотности ОЭ в межъядерном пространстве, длиной (протяженностью замкнутого поля) и силой (энергией, обычно в интервале от 50-1250 кДж/моль) связи элементов их

составляющих. При разрыве замкнутого энергетического континуума (ЭК) химических связей между элементами (рис.1-3) происходит его трансформация в открытый ЭК, с повышением свободы движения материи, обеспечивая возникновения условий для превращения одних разновидностей веществ в другие, с одновременным выделением свободной энергии в виде тепла в экзотермических реакциях. Фактически этот энергетический химический континуум является основной материальной реальностью мира Земли (заключенный в более чем 20 млн. индивидуальных химических веществ) [12-15], используемый для получения основной доли электрической и тепловой энергии, вырабатываемой человечеством.

В свою очередь, *электрический ток в металлах представляется сегодня химическим явлением* [12], так как заключается в направленном движении «валентных» - обобществленных электронов (или электронного газа) в междядерном пространстве структуры химических веществ с их преобладающей степенью металличности (C_M) и степени обобществления электронов (СОЭ) стремящейся к 100%, то есть проводников (металлов), под действием электрического поля, приводящего к возникновению дополнительно и магнитного поля. При этом структура проводника не меняется и химическое превращение веществ не происходит. В случае же преимущественно ионных веществ (степень ионности, C_I , преобладает), переносчиками электричества в растворах и расплавах являются уже сами химические элементы вещества в виде ионных частиц под действием электрического поля и т.д. И в случае преимущественно ковалентных (молекулярных) веществ и материалов говорить об электрическом токе не имеет смысла, так как в них ввиду преобладания степени ковалентности связи (C_K) ОЭ «жестко» локализованы в междядерном пространстве диэлектрика и поэтому их передвижение невозможно [12, 14]. Фактически это уже потенциальная химическая энергия, замкнутая в междядерном пространстве вещества. Выделение этой энергии возможно только при разрыве химических связей элементов и переходе ее в другие разновидности химической энергии при превращении веществ, а также трансформации в другие ее виды (тепловую, световую и т.д.), например, при горении газа, дерева и т.д. Отмечается также возможность перехода одних форм движения материи и, соответственно, разновидностей вещества в другие их типы. Например, механическая форма движения материальных тел (при трении спички, дерева друг о друга или ударе кремния или пляжного силикатного «голыша» друг о друга) может переходить в химическую форму (горение древесины или ваты) и далее в тепловую. При этом закрытая внутри отмеченных выше веществ потенциальная энергия при механохимическом воздействии на структуру последних и разрыве химических связей превращается в открытый энергетический континуум, обеспечивающий горение веществ и трансформацию химической энергии в тепловую. Или электрическая форма энергии и движения материи при ударе молнии в дерево переходит в химическую (горение целлюлозы) и далее тепловую. В свою очередь, тепловая форма энергии движения материи может переходить в химическую при обжиге глины и превращении ее в керамику или на тепловых электростанциях в механическую через пар, вращающий турбину, и далее в электрическую форму движения материи.

В результате, в условиях Земли *тепловая энергия* вырабатывается человечеством преимущественно [12, 14-17] при преобразовании закрытой (потенциальной) химической энергии (химического энергетического континуума), прежде всего, в химических молекулярных веществах с ковалентносвязанными элементами (углеводороды и топливо на их основе), выделяемой в процессе экзотермических реакций и используемой, например, при нагреве воды. Таким образом, тепловая энергия воды и пара представляется как *межмолекулярный энергетический континуум*, обеспечивающий хаотическое перемещение отдельных молекул оксида водорода H_2O , сопровождающееся их колебательным, вращательным и поступательным движением, трансформирующийся далее в колебательные движения молекул, составляющих воздух (O_2 , N_2 и т.д.) или других сред.

Особенностью ядерной энергии является наличие *энергетического континуума в виде закрытого (замкнутого) поля между протонами и нейтронами ядер атомов*.

Таким образом, известные виды *энергетического материального континуума* или виды энергий отличаются друг от друга:

- их носителями, то есть составом (гравитоны, кварки, электроны и т.д.);
- структурой, то есть локализацией - делокализацией открытых или закрытых (замкнутых в пространстве) полей и далее свойствами;
- волновыми характеристиками, величинами близко- и дальнего действия на другие материальные объекты и глубиной проникновения в вещества и материальные тела (смотри

разницу в характеристиках различных энергетических континуумов на примере электромагнитных волн, табл.2). Причем можно предполагать, что в ряду (табл. 2) разновидностей электромагнитных волн (полей), начиная с радиоволн и кончая γ -лучами с уменьшением длины волны с $10^4 - 10^{-3}$ до 10^{-13} м должны закономерно увеличиваться их частота и волновые свойства. Это, по-видимому, приводит к увеличению их удельной энергии (определяемой уменьшением «массы элементов» их составляющих) и возможности более глубокого проникновения в объем других материальных объектов (веществ и тел). Хотя в вакууме в космосе, как разновидности непрерывных открытых энергетических полевых форм материи, дальное действие электромагнитных волн ввиду практического отсутствия взаимодействия со средой становится соизмеримым.

Таблица 2

Шкала электромагнитных волн [13]

10^4	10^{-3}	$8 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}	10^{-11}	10^{-13}
РВ	ИК	Видимый свет	УФ	РЛ	γ
Радиоволны	Оптический диапазон			Рентгеновские лучи	γ -лучи

- способностью взаимодействовать с другими материальными объектами (включая связывание элементов различных веществ и материальных тел в целом);

- способностью определять формы движения (физическая, химическая, биологическая, механическая и т.д.), взаимодействия и превращения материальных объектов (полей, веществ, материальных тел и т.д.) или возможность перехода от одних форм движения и разновидностей материи в другие;

- возможностями совершать различные виды работ, которые измеряются следующими различными единицами: *гравитационная энергия*: $1 \text{ кгм} = 9,8 \text{ Дж}$, *химическая* - кДж/моль, *электрическая* - 1 кВт ч., *тепловая* - «калория» и т.д.

Таким образом, показано, что именно полевая форма существования материи, в виде энергетического континуума и обладает свойствами: - взаимодействия с дискретно-массовыми ее разновидностями; - связывания последних качестве элементов, составляющих различные уровни структурной организации материи (вещества физические, химические, биологические и т.д., материальные тела); - определять формы движения и превращения (внутри - и межуровневые) материальных объектов; - совершать работу.

Практическая значимость данного исследования заключается не только в попытке обоснования объективности материального существования *энергии* и наполнении ее дефиниции современным научным смыслом, но также в конкретизации и уточнении ее разновидностей, структуры и свойств, включая влияние на формы движения и превращения материи [9-19]. Данный системный подход имеет несомненные практические перспективы в совершенствовании методик оценки химической, электрической, тепловой и других видов энергий, применения и управления процессами их получения, транспортировки и применения в народном хозяйстве, включая повышение качества образования [19 - 33].

И в завершение, в рамках необходимости повышения строгости и точности научного языка, предлагается уточнение важнейшего известного (в рамках закона сохранения массы и энергии, раскрывающего единство природы двух базовых и промежуточных между ними форм материи) понятия. Оно представляет замену выражения «*корпускулярно-волновой дуализм*» на понятие «*дискретно-континуальный дуализм*», выражающее фундаментальную взаимосвязь двух предельных структурных уровней организации материи. Это связано с тем, что понятие «*корпускула*» было предложено М.В. Ломоносовым в 1741 году, для введения в науку второго, отличающегося от атома (элемента), уровня структурной организации вещества, названного в 1860 году «*молекулой*», а не для демонстрации понятия «дискретность». Кроме того, понятие «... - волновой...» в первом выражении также отражает в первую очередь, не особенности непрерывности структуры материи, а ее волновые свойства. В результате, выражение «*дискретно-континуальный дуализм*» более точно и строго характеризует структурное отличие двух предельных базовых форм существования материи, при одновременном материальном единстве природы любых разновидностей материальных объектов, в рамках постепенной их трансформации друг в друга при изменении количественного соотношения E / m , приводящего к периодическому качественному скачку в изменении структуры и свойств последних.

Заключение

Проведен обзор литературных данных об эволюции научного знания о содержании смысла понятия «энергия». В рамках четвертого интегрально-дифференциального этапа развития научного знания, современной трактовки материи как совокупности массовой и энергетической составляющих (или дифференциальной и интегральной компонент), парадигмы ее многоуровневой организации (поля, вещества, материальные тела и мегамириальные системы) и особенностей корпускулярно-волнового дуализма, сделана попытка конкретизировать материальную сущность энергии. Ведь если энергия – это свойство или характеристика, то для последовательного материалиста очевидна необходимость поиска ответа на вопрос: энергия – это свойство чего или какой разновидности материи? Что является носителем этого свойства? В результате проведенного анализа, предлагается следующая дефиниция понятия *энергии* не просто как свойства материи, а *объективной реальности существования непрерывных пространственных форм материи (энергетический материальный континуум) в виде открытых и закрытых (внутри дискретных разновидностей материи) полей, обладающих комплексом характеристических свойств, включая способность совершать работу*. В свою очередь, показано, что отличительными свойствами и характеристиками энергии от дискретных форм материи является следующее. Это наличие у нее волновых характеристик, разница в энергетических континуумах гравитационной, электрической, электромагнитной, химической, ядерной, тепловой и других видов энергий и способность осуществлять различные по силе («энергии») воздействия на дискретные материальные объекты и работу в целом. Это обеспечивает энергии такие характеристические свойства как, способность к обменному взаимодействию и связыванию последних (различными типами связи) в качестве элементов в вещества в виде индивидуальных атомов, молекул, клеток и т.д., материальных тел и т.д. Далее также энергия определяет формы движения (физическая, химическая, биологическая, механическая и т.д.), взаимодействия и превращения материи, включая переход от одних их разновидностей и форм (например, механической в тепловую и далее химическую при трении, химической в тепловую при горении и т.д.) в другие. Уточнен смысл химической, электрической, тепловой и других видов энергий. Авторы осознают сложность поднимаемых в работе вопросов и даже, несмотря на их возможную дискуссионность, считают, что в XXI веке, на современном этапе развития научного знания в 2021 году (в год науки и технологий в РФ), необходимо и дальше пытаться наполнять новым более точным научным смыслом, даже такие фундаментальные научные понятия, как «материя» и «энергия».

Литература

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.1 (1-2); [пер с англ. О.А. Хрусталева и др.]. М.: Изд-во АСТ, 2019. 448с.
2. Кузнецов В.И., Идлис Г.М., Гутина В.Н. Естествознание. М.: «Агар», 1996. 384с.
3. Сироткин О.С. Проблемы современного этапа материалистической эволюции научного знания и перспективы совершенствования классификации наук, его составляющих // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2014. № 4 (24). С. 32-55.
4. Сироткин О.С. Система Мироздания (Научные принципы современной картины Мира). М.: РУСАЙНС, 2020. 206с.
5. Кубарев Ю.Г., Дудичева С.Л. Эволюционное естествознание (Концепции современного естествознания): Казань: Изд-во КГЭУ, 2004. 148 с.
6. Физическая энциклопедия: [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия (т. 1-2); Большая Российская энциклопедия (т. 3-5), 1988-1999.
7. Баранов А.В., Родионов А.И. Формирование базовых представлений о материи, движении и энергии в контексте гносеологии и онтологии XXI в. // Вестник Томского государственного университета. 2018. № 435. С. 177–186.
8. Розман Г.А. Может ли масса превращаться в энергию // Физическое образование в вузах. 2006. Т. 12, № 2. С. 15–19.
9. Материалисты древней Греции / Под ред. М.А.Дынника. М.: Гос. изд. полит. Литературы, 1955. 240 с.
10. Кузнецов В.И. Эволюция представлений об основных законах химии. М.: Наука, 1967. 310 с.
11. Зоркий П.М. Критический взгляд на основные понятия химии. // Российский хим. Журнал. 1996. Т.40. № 3. С. 5-25.

12. Сироткин О.С. Сироткин Р.О. Химия (Основы единой химии). М.: КНОРУС, 2017. 364с.
13. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания. М: Высшая школа, 2003. 488с.
14. Сироткин Р.О. Физикохимия гомо- и гетероядерных бинарных веществ и материалов на их основе (особенности комплексного влияния элементного состава химической связи на структуру и свойства). М.: РУСАЙНС, 2018. 238с.
15. Бузник В.М. Роль химии в устойчивом развитии общества. Хабаровск: Дальнаука, 1999. 30с.
16. Степанова В.С., Степанова Т.Б., Стариковас Н.В. Системы. Методы. Технологии. В.С. Определение химической энергии и эксергии древесных топлив. // Современные технологии. 2017. № 1 (33). С. 91-96.
17. Арутюнов В.С., Лисичкин Г.В., Стрекова Л. Н. Реальная энергетика: проблемы и прогнозы // Энергия и взрыв. 2018. Т. 11. № 1. С. 4-18.
18. Кучинский Д.М., Дядик А.Н., Довыдовская Н.Н., и др. Закон сохранения и превращения энергии и возможная классификация форм и видов энергии // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1. № 4. С. 121-126.
19. Лурий В.Г., Кост Л.А. Горючие отходы и некондиционное топливо – сырьевой ресурс малой энергетики // Химия твердого топлива, 2019. № 6. С. 65–70.
20. Sirotkin R.O., Sirotkin O.S. Metallicity of Chemical Bonds and Its Role in Their Systematization and Effect on the Structure and Properties of Substances // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2020. V. 94 (6). pp. 1153-1158.
21. Павлов Д.Ю., Трубачева А.М., Сироткин О.С., и др. О возможности оценки влияния химической природы неорганических веществ на их энергетические характеристики // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 3-4. С. 54-60.
22. Sirotkin R.O., Sirotkin O.S., Physico-Chemical Foundations and Practical Significance of Unification of Metallic and Nonmetallic Substances and Materials within a Unified Model of Chemical Bond // Materials Science Forum. 2020. V. 992. pp. 952–956
23. Sirotkin O.S., Sirotkin R.O., Pavlova A.M., et al. On a new approach to assessing the energy characteristics of substances // E3S Web of Conferences. 2019. V. 124. pp. 01017-01022.
24. Jones A. Z. Energy: A Scientific Definition. Thought Co, Aug. 27, 2020, Available at: thoughtco.com/energy-definition-and-examples-2698976. Accessed: 25 Dec 2021.
25. De Castro C., Carpintero O., Frachoso F., et al. A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels // Energy. 2014. V. 64. pp. 506–512.
26. Arutyunov V. S., Lisichkin G. V. Energy resources of the 21st century: Problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels? // Russ. Chem. Rev. 2017. V. 86(8): pp. 777–804.
27. Wiener G.J., Schmeling A.M., Hopf M. Why not start with quarks? Teachers investigate a learning unit on the subatomic structure of matter with 12-year-olds // European Journal of Science and Mathematics Education. 2017. V. 5. № 2. pp. 134–157.
28. Bunge M. Energy: Between Physics and Metaphysics. Science and Education. 2000. V. 9. № 5. pp. 457–461.
29. Saha A., Choudhury P.D. What is dark energy and dark matter // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2017. V. 8. № 3. pp. 146–152.
30. Lancor R. An Analysis of Metaphors Used by Students to Describe Energy in an Interdisciplinary General Science Course // International Journal of Science Education. 2015. V. 37. № 5–6. pp. 876–902.
31. Lancor R. Using Metaphor Theory to Examine Conceptions of Energy in Biology, Chemistry, and Physics // Science & Education. 2014. V. 23. № 6. pp. 1245–1267. doi:10.1007/s11191-012-9535-8.
32. Coelho R.L. On the Concept of Energy: Eclecticism and Rationality // Science & Education. 2014. V. 23. № 6. pp. 1361–1380. doi:10.1007/s11191-013-9634-1.
33. Britannica. The Editors of Encyclopaedia. Energy. Encyclopedia Britannica, 16 Nov. 2021. Available at: <https://www.britannica.com/science/energy>. Accessed: 24 December 2021.

Авторы публикации

Сироткин Олег Семёнович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Материаловедение и технологии материалов», Казанский государственный энергетический университет.

Сироткин Ростислав Олегович – канд. хим. наук, PhD, доцент кафедры «Материаловедение и технологии материалов», Казанский государственный энергетический университет

References

1. Feynman R, Leighton R, Sands M. *The Feynman Lectures on Physics*. V.1 (1-2); [translated from English by O.A. Khrustalyov et al.]. Moscow: AST Publishing House, 2019. 448 pp. [in Russian].
2. Kuznetsov VI, Idlis GM, Gutina VN. *Natural Science*. Moscow: Agar, 1996. 384 pp. [in Russian].
3. Sirotkin OS. Problems of the modern stage of materialistic evolution of scientific knowledge and prospects for improving the classification of sciences. *Herald of Kazan State Power Engineering University*. 2014;4 (24):32-55
4. Sirotkin O.S. The system of the Universe (*Scientific principles of the modern picture of the World*). Moscow: Ruscience, 2020. 206 pp.
5. Kubarev YuG, Dudicheva SL. *Evolutionary Natural Science (Concepts of modern natural science)*. Kazan: KSPEU, 2004.148 pp.
6. Encyclopedia of Physics: [5 V.] / Ed. A. M. Prokhorov. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya (V.1-2); *Bol'shaya Rossiiskaya Entsiklopediya* (V.3-5), 1988-1999.
7. Baranov AV, Rodionov AI. Formation of basic ideas about matter, motion and energy in the context of epistemology and ontology of the XXI century. *Herald of Tomsk State University*. 2018;435:177–186.
8. Rozman GA. Can mass turn into energy // *Physical Education in Universities*. 2006;12;2:15–19.
9. The Materialists of ancient Greece. M.A. Dynnik (Ed.) Moscow: State Publishing House of Political Literature. 1955. 240 pp.
10. Kuznetsov VI. *Evolution of ideas about the basic laws of chemistry*. Moscow: Nauka, 1967. 310 pp
11. Zorkyi P.M. A critical look at the basic concepts of chemistry. *Russian Chemical Kournal*. 1996;40(3):5-25
12. Sirotkin OS, Sirotkin RO. *Chemistry (Principles of the Unified Chemistry)*. Moscow: KNORUS, 2017. 364 pp.
13. Karpenkov SKh. *Concepts of modern natural science*. Moscow: Vysshaya Shkola, 2003. 488 pp.
14. Sirotkin RO. *Physico-chemistry of homo- and heteronuclear binary substances and materials (features of the complex effect of a chemical bond elemental composition on structure and properties)*. Moscow: Ruscience, 2018. 238 pp.
15. Buznik VM. *The role of chemistry in a society's sustainable development*. Khabarovsk: Dal'nauka, 1999. 30 pp.
16. Stepanova VS, Stepanova TB, Starikovas NV. Determination of chemical energy and exergy of wood fuels. *Modern Technologies*. 2017;1(33):91-96
17. Arutyunov VS, Lisichkin GV, Strekova LN. Real energy: problems and forecasts. *Energy and explosion*. 2018;11(1):4-18.
18. Kuchinskyi DM, Dyadik AN, Dovyдовskaya NN, et al. The law of conservation and transformation of energy and possible classification of forms and types of energy. *Marine intelligent technologies*. 2017(1)4:121-126.
19. Lurii VG, Kost LA. Combustible waste and substandard fuel – a raw resource of small energy. *Chemistry of solid fuel*. 2019;6:65–70
20. Sirotkin RO, Sirotkin OS. Metallicity of Chemical Bonds and Its Role in Their Systematization and Effect on the Structure and Properties of Substances. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94 (6): 1153-1158. doi: 10.1134/S0036024420060230.
21. Pavlov DYU, Trubacheva AM, Sirotkin OS, et al. On the possibility of assessing the influence of the chemical nature of inorganic substances on their energy characteristics. *Power engineering: research, equipment*. 2013;3-4:54-60.
22. Sirotkin RO, Sirotkin OS. *Physico-Chemical Foundations and Practical Significance of Unification of Metallic and Nonmetallic Substances and Materials within a Unified Model of Chemical Bond*. Materials Science Forum. 2020;992:952–956
23. Sirotkin OS, Sirotkin RO, Pavlova AM, et al. *On a new approach to assessing the energy characteristics of substances*. *E3S Web of Conferences*. 2019;124:01017-01022.

24. Jones AZ. *Energy: A Scientific Definition*. Thought Co, Aug. 27, 2020, Available at: [thoughtco.com/energy-definition-and-examples-2698976](https://www.thoughtco.com/energy-definition-and-examples-2698976). Accessed: 25 Dec 2021.
25. De Castro C, Carpintero O, Frachoso F., et al. A top-down approach to assess physical and ecological limits of biofuels. *Energy*. 2014;64:506–512.
26. Arutyunov VS, Lisichkin GV. *Energy resources of the 21st century: Problems and forecasts. Can renewable energy sources replace fossil fuels?* Russ. Chem. Rev. 2017; 86(8): 777–804.
27. Wiener GJ, Schmeling AM, Hopf M. Why not start with quarks? Teachers investigate a learning unit on the subatomic structure of matter with 12-year-olds. *European Journal of Science and Mathematics Education*. 2017;5(2):134–157.
28. Bunge M. *Energy: Between Physics and Metaphysics*. Science and Education. 2000;9(5):457–461. doi: 10.1023/A: 008784424048.
29. Saha A, Choudhury PD. What is dark energy and dark matter. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017;8(3):146–152.
30. Lancor R. An Analysis of Metaphors Used by Students to Describe Energy in an Interdisciplinary General Science Course. *International Journal of Science Education*. 2015;37(5–6):876–902. doi:10.1080/09500693.2015.1025309.
31. Lancor R. Using Metaphor Theory to Examine Conceptions of Energy in Biology, Chemistry, and Physics. *Science & Education*. 2014;23(6):1245–1267. doi:10.1007/s11191–012–9535–8.
32. Coelho RL. On the Concept of Energy: Eclecticism and Rationality. *Science & Education*. 2014;23(6):1361–1380. doi:10.1007/s11191– 013–9634–1.
33. Britannica. *The Editors of Encyclopaedia. Energy*. Encyclopedia Britannica, 16 Nov. 2021. Available at: <https://www.britannica.com/science/energy>. Accessed: 24 December 2021.

Authors of the publication

Oleg S. Sirotkin – Dr. Techn. Sci., Professor, Head of School of Materials Science and Engineering, Kazan State Power Engineering University.

Rostislav O. Sirotkin – Cand. Chem. Sci., PhD, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University.

Получено

Отредактировано

Принято

БРОДОВ
ЮРИЙ МИРОНОВИЧ
15.04.1943-09.04.2022



Автор и титульный редактор 4-х изданий учебника для студентов вузов «Теплообменники энергетических установок», имеющего рекомендательный гриф УМО МОН РФ, автор 23 книг (в т.ч. 7 монографий и справочников, 13 учебных пособий), более 600 научных статей и докладов, автор многочисленных статей и постоянный член редакционной коллегии журнала «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», более 50 патентов и авторских свидетельств на изобретения.

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики» выражает свое соболезнование родным и близким в связи с утратой великого ученого.

ВЕЧНАЯ ПАМЯТЬ...

Номенклатура-переходник журнала «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики»

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты	2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы	
05.09.12 – Силовая электроника	
05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений)	
05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)	
05.14.01 – Энергетические системы и комплексы	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы	2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатации и вывод из эксплуатации	
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика	2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)
05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки) 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Сдано в набор 15.03. 2022 г
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати 11.05.2022 г
Усл. печ. л. 12,6
Заказ № 5252
Дата выхода в свет 30.05.2022 г

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная