

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) 3 / 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	ВАЛЕЕВА С.Н.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

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, № 3
Май-Июнь

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

ИВШИН И.В.	БРЯКИН И.В.	ЯКИМОВ Н.Д.
КАСИМОВ В.А.	СУСЛОВ К.В.	ІЛІҮА К.ІЛІЕҮ
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.	ФЕДОТОВ А.И.	ВАФИН Д.Б.
ДОВГУН В.П.	ЗВЕРЕВА Э.Р.	ІОН V ІОН
ГРАЧЕВА Е.И.	ЩИННИКОВ П.А.	НИКОЛАЕВА Л.А.
ИЛЮШИН П.В.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	КАЛАЙДА М.Л.
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	БОРИСОВ А.В.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.	АРАКЕЛЯН Э.К.	АНДРЕЕВ В.П.
STANIMIR VALTSHEV	ПАВЛОВ Г.И.	КОРНИЛОВ В.Ю.
RENTIUS RADU DUMITRU	ДМИТРИЕВ А.В.	КОЗЕЛКОВ О.В.
KOLCUN MICHAİL	БОРУШ О.В.	
БОЧКАРЕВ И.В.	ЛАПТЕВ А.Г.	

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, № 3
May-June

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:

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES
ELECTRICAL SYSTEMS
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING AND DIAGNOSING MATERIALS,
ARTICLES, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

Editorial board:

IGOR IVSHIN
VASIL KASIMOV
GOLENISHCHEV-KUTUZOV
ALEXANDER
DOVGUN VALERY
GRACHEVA ELENA
ILYUSHIN PAVEL
SAFIN ALFRED
MESHCHERYAKOV VIKTOR
STANIMIR VALTCHEV
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL
BOCHKAREV IGOR

BRIAKIN IVAN
SUSLOV KONSTANTIN
FEDOTOV ALEXANDER
ZVEREVA ELVIRA
SHCHINNIKOV PAVEL
MINGALEEVA GUZEL
VANKOV YURY
ARAKELYAN EDIK
PAVLOV GRIGORY
DMITRIEV ANDREY
BORUSH OLESYA
LAPTEV ANATOLY
YAKIMOV NIKOLAY

ILIYA K.ILIEV
VAFIN DANIL
ION V ION
NIKOLAEVA LARISA
KALAI DA MARINA
BORISOV ANDREY
ANDREEV VICTOR
KORNILOV VLADIMIR
KOZELKOV OLEG

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/>

© Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems, 2022.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ГЕРАСИМЕНКО А.С., ДОРОХОВ С.В., КРИВОРОТОВА В.В. Особенности прямых измерений для оценки объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны.	3
ФЕДЮХИН А.В., ЗВОНЧЕВСКИЙ А.Г. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств.	15
ГВОЗДЯКОВ Д.В., ЗЕНКОВ А.В., ЛАВРИНЕНКО С.В., МАТВЕЕВА А.А. Квазигорячее распыление водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости.	28
САВИНА Н.В., ЛИСОГУРСКИЙ И.А., ЛИСОГУРСКАЯ Л.Н. Выбор схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в адаптивных сетях с тягой переменного тока.	42
СОЛОВЬЕВА О.В., СОЛОВЬЕВ С.А., ВАНЬКОВ Ю.В., АХМЕТОВА И.Г., ШАКУРОВА Р.З., ТАЛИПОВА А.Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности.	55
ЧИЧИРОВ А.А., ФИЛИМОНОВА А.А., ЧИЧИРОВА Н.Д., МИНИБАЕВ А.И. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электромембранные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан.	66
ГУСЕВА Ю.В., КОСТРЮКОВ С.А., ВАСИЛЬЕВ А.Р. Лабораторная модель ротора Савониуса.	83

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

САВЕНКО А.Е., САВЕНКО П.С. Особенности работы судовых электротехнических комплексов с гребными электрическими установками.	91
---	----

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ГОРИНОВ Ю.А., АНИСИМОВ П.Н. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП.	101
ШИРИЕВ Р.Р., БОРИСОВ А.Н., ВАЛЕЕВ А.А. Об обеспечении теплового режима светодиодного источника света.	112
ЯКИМОВ Н.Д., ДМИТРИЕВ А.В., БАДРЕТДИНОВА Г.Р., БОРИСОВА С.Д. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твердые частицы на ребре. ...	121

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

БАСЕНКО В.Р., НИЗАМИЕВ М.Ф., ИВШИН И.В., ВЛАДИМИРОВ О.В. 3 d модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам.	130
ЦВЕТКОВ А.Н., ДОАН НГОК ШИ, ЯРОСЛАВСКИЙ Д.А. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля.	144

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

МАЛЁВ Н.А., ПОГОДИЦКИЙ О.В., КОЗЕЛКОВ О.В., ДЮРЯГИН А.М. Анализ динамических характеристик вентильного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределённости методами компьютерного моделирования.	158
АНДРЕЕВ В.П., ПЛЕТЕНЕВ П.Ф. Методы динамического перепрограммирования для мобильного робота с модульной архитектурой.	175
ГОРОДНОВ А.Г., КОРНИЛОВ В.Ю., ФЕДОРОВ Е.Ю. Методика определения параметров схемы замещения электромеханического модуля с повышенным электромагнитным моментом.	185

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ВАФИН Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов.	198
СЕМЕНОВА М.И., СМЕРНОВ А.В., ВЕЖЕНКОВА И.В., КУСТОВ Т.В., КОВАЛЕВСКАЯ А.С. Особенности пробоподготовки водных вытяжек компонентов солнечных панелей в целях биотестирования.	211

CONTENTS

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

GERASIMENKO AS, DOROKHOV SV, KRIVOROTOVA VV. Features of direct measurements for evaluation of the volume activity of radionuclides in the air of the working area.....	3
FEDYUKHIN AV, ZVONCHEVSKY AG. Promising directions for the use of heat from low-potential sources of chemical production.....	15
GVOZDYAKOV DV, ZENKOV AV, LAVRINENKO SV, MATVEEVA AA. Quasi-hot spraying of coal-water slurries with pyrogenetic water additives.....	28
SAVINA NV, LISOGURSKIY IA, LISOGURSKAYA LN. Selection of circuit and technical solutions for improvement the quality of electricity in adaptive networks with traction AC power.....	42
SOLOVEVA OV, SOLOVEV SA, VANKOV YUV, AKHMETOVA IG, SHAKUROVA RZ, TALIPOVA AR. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency.....	55
CHICHIROV AA, FILIMONOVA AA, CHICHIROVA ND, MINIBAEV AI. System analysis methods and resource-saving electromembrane technologies in creating a low-flow water system using of Tatarstan Republic energy facilities.....	66
GUSEVA YUV, KOSTRYUKOV SA, VASILEV AR. Laboratory model of the Savonius rotor.....	83

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

SAVENKO AE., SAVENKO PS. Features of operation of ship electrical power systems with electrical propulsion systems.....	91
---	----

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

GORINOV YUA, ANISIMOV PN. Increasing the efficiency of district heating supply systems by local heat distribution station modernation.....	101
SHIRIEV RR, BORISOV AN, VALEEVA AA. Led source of light with high light circuit.....	112
YAKIMOV ND, DMITRIEV AV, BADRETDINOVA GR, BORISOVA SD. Features of solving the problem of condensation of vapor containing solid particles on the edge.....	121

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

BASENKO VR, NIZAMIEV MF, IVSHIN IV, VLADIMIROV OV. 3 D model of a power transformer to study its technical condition by oscillation parameters.....	130
TSVETKOV AN, DOAN NGOK SHI, YAROSLAVSKY DA. Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using the analytical control system.....	144

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

MALEV NA, POGODITSKY OV, KOZELKOV OV, DYURYAGIN AM. Analysis dynamic characteristics brushless motor of the mechatronic system in conditions of parametric uncertainty by computer simulation methods.....	158
ANDREEV VP., PLETENEV PF. Dynamic reprogramming methods for a mobile robot with modular architecture.....	175
GORODNOV AG, KORNILOV VYU, FEDOROV EYU. Method for determining the parameters of a substitution scheme for an electromechanical module with an increased electromagnetic moment with increased electromagnetic torque.....	185

TECHNOSPHERE SAFETY

VAFIN DB. Thermal and aerodynamic parameters radiation chambers of the hydrocarbon pyrolysis furnace.....	198
SEMEANOVA M, SMIRNOV A, VEZHENKOVA I, KUSTOV T, KOVALEVSKAYA A. Features of water extracts sample preparation of solar panels components for biotesting.....	211

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14

ОСОБЕННОСТИ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОЗДУХЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Герасименко¹ А.С., Дорохов¹ С.В., Криворотова^{1,2} В.В.

¹Филиал «Сибирский территориальный округ» ФГУП «ФЭО», г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

<http://orcid.org/0000-0003-0801-9112>, VVKrivorotova@rosfeo.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемные вопросы, связанные с измерениями радионуклидов в воздухе рабочей зоны, выделяемых при переупаковке сыпучих твердых радиоактивных отходов при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Разработать метод прямых измерений для оперативного контроля концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочей зоны, обеспечивающий неперевышения контрольного уровня по годовой эффективной дозе персонала. *МЕТОДЫ.* Для решения поставленной задачи применялся метод расчета максимально возможного количества альфа-частиц на отобранной пробе аналитического фильтра АФА-РСП20. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Предложен метод оперативного контроля радиационной обстановки на рабочих местах персонала с помощью прямых измерений переносными приборами радиационного контроля плотности потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20. Применение данного метода позволяет обеспечить контроль в тех случаях, когда применение стандартных установок для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей недоступно или невозможно. В статье описана актуальность темы, приведен расчет контрольного уровня плотности потока альфа-частиц с поверхности фильтра АФА-РСП20. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Паспортные характеристики средств индивидуальной защиты органов дыхания не дают убедительных данных о работе фильтра с конкретным загрязнителем. Для правильного принятия решения о применении тех или иных видов средств индивидуальной защиты органов дыхания персоналом, работающим с радиоактивными отходами, содержащими трансурановые радионуклиды, необходимо контролировать объемную активность радионуклидов в воздухе. На основе расчета и прямых измерений показано, что применение оперативного метода измерения плотности потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20 позволяет обеспечить контроль за радиационной обстановкой на рабочих местах персонала при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Ключевые слова: *прямое измерение; альфа-частица; радиоактивные аэрозоли; дозиметр радиометр; контрольный уровень.*

Для цитирования: Герасименко А.С., Дорохов С.В., Криворотова В.В. Особенности прямых измерений для оценки объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРGETИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14.

FEATURES OF DIRECT MEASUREMENTS FOR EVALUATION OF THE VOLUME ACTIVITY OF RADIONUCLIDES IN THE AIR OF THE WORKING AREA

AS. Gerasimenko¹, SV. Dorokhov¹, VV. Krivorotova^{1,2}

¹Branch «Siberian Territorial District» of the Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

²Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

<http://orcid.org/0000-0003-0801-9112>, VVKrivorotova@rosfeo.ru

Abstract: *OBJECT.* To consider problematic issues related to measurements of radionuclides in the air of the working area released during repackaging of bulk solid radioactive waste during decommissioning of nuclear energy facilities. To develop a method of direct measurements for operational control of the concentration of radioactive aerosols in the air of the working area, ensuring that the control level is not exceeded by the annual effective dose of personnel. *METHODS.* To solve this problem, the method of calculating the maximum possible number of alpha particles on the selected sample of the analytical filter AFA-RSP20 was used. *RESULTS.* A method of operational control of the radiation situation in the workplaces of personnel using direct measurements by portable radiation monitoring devices of the alpha particle flux density from the exposed AFA-RSP20 filter is proposed. The use of this method makes it possible to provide control in cases where the use of standard installations for measuring the volumetric activity of radioactive aerosols is unavailable or impossible. The article describes the relevance of the topic, the calculation of the reference level of the alpha particle flux density from the surface of the AFA-RSP20 filter is given. *CONCLUSIONS.* Passport characteristics of personal respiratory protection equipment do not provide convincing data on the operation of the filter with a specific pollutant. For the correct decision-making on the use of certain types of personal respiratory protection by personnel working with radioactive waste containing transuranium radionuclides, it is necessary to control the volumetric activity of radionuclides in the air. Based on calculations and direct measurements, it is shown that the use of an operational method for measuring the alpha particle flux density from an exposed AFA-RSP20 filter makes it possible to monitor the radiation situation at personnel workplaces during decommissioning of nuclear energy facilities.

Keywords: *direct measurement; alpha particle; radioactive aerosols; dosimeter radiometer; control level.*

For citation: Gerasimenko AS, Dorokhov SV, Krivorotova VV. Features of direct measurements for evaluation of the volume activity of radionuclides in the air of the working area. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-3-14.

Введение и литературный обзор

При выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии (далее ОИАЭ) проводятся работы с твердыми радиоактивными отходами (далее РАО). При этом возможны выбросы радиоактивных веществ (далее РВ) в воздух рабочей зоны персонала. РВ могут находиться в воздухе в виде газа, пара, аэрозолей и в различных комбинациях этих состояний. Радиоактивные аэрозоли образуются под действием механизмов конденсации и диспергирования. В воздухе всегда присутствуют твердые и жидкие частицы субмикронных размеров – ядра конденсации [1]. В результате диффузного осаждения на летучих радионуклидах образуются конденсационные радиоактивные аэрозоли [2]. При подъеме радиоактивных частиц с различных поверхностей воздушными потоками, распылении радиоактивных жидкостей, резке загрязнённых радиоактивностью материалов образуются диспергированные радиоактивные аэрозоли. Аэрозоли чрезвычайно подвижны и неустойчивы. Между газовой средой и частицами происходит постоянное взаимодействие, которое приводит к изменению как дисперсного, так и фазового состава аэрозолей.

Воздействие радиоактивных аэрозолей на организм человека осуществляется в основном за счет внутреннего облучения: частицы, вдыхаемые с воздухом, осаждаются на внутренней поверхности органов дыхания, затем проникают в кровь и разносятся по организму [3]. Радионуклиды селективно концентрируются в критических органах. Для защиты органов дыхания применяют специальные средства индивидуальной защиты. При этом, необходимо обеспечить надежную фильтрацию радиоактивных аэрозолей и снижение их проникновения через область обтюрации средств индивидуальной защиты (далее СИЗОД).

Согласно [4] в интервале размеров аэрозольных частиц от 0,001 мкм до 0,1 мкм, т.е. в пределах двух порядков и вне «рабочих» зон современных средств очистки воздуха существует один из максимумов проницаемости. В ряде работ [5, 6] приводятся сведения о возможности существования в выбросах АЭС частиц, размеры которых менее 0,2 мкм. Имеются данные, что на долю частиц йода-131 менее 0,2 мкм приходится

до 42 %, хрома-51 — 33 %, цезия-137, цезия-134, марганца-54, циркония-95 — от 11 до 18 % от общего числа частиц. Частицы таких размеров могут образовываться в результате конденсации в атмосфере паров легколетучих продуктов деления, главным образом, цезия, стронция и плутония [7]. Поэтому, достаточно сложной проблемой является защита органов дыхания человека от радиоактивного газа, пара, аэрозолей и различных комбинаций этих состояний.

Значительная часть радионуклидов при попадании в организм может в нем задерживаться [8], поэтому даже при минимальном превышении предельно допустимых уровней содержание РВ в воздухе, первостепенное значение имеет качество применяемых СИЗОД [9]. Их роль и значение определяется тем, что своевременное и правильное использование СИЗОД позволяет в определенных условиях снизить поступление радионуклидов в организм до допустимых значений и сохранить тем самым здоровье людей.

В свою очередь, к средствам индивидуальной защиты органов дыхания от радиоактивных аэрозолей предъявляются весьма жесткие требования, поскольку необходимо обеспечить очень высокую степень защиты от попадания радионуклидов внутрь организма. Совершенно очевидно, что одинаковые по классу (*FFP3*) средства защиты респиратор ШБ-1 Лепесток-200 *FFP3* и фильтр ДОТ-600 с маской МАГ имеют существенно разные защитные свойства и ресурс работы. Отсюда следует, что при выборе СИЗОД, в первую очередь, должны учитываться ограничения по их использованию в зависимости от назначения и особенности среды, для которой они применяются [10].

Известны [11, 12] методы контроля концентрации радиоактивных частиц в воздухе рабочей зоны. Принцип их работы основан на регистрации альфа-, бета-излучения радионуклидов, осажденных на аэрозольный фильтр [13, 14]. В этом случае, воздух принудительно прокачивается через рабочую камеру блока детектора (рис. 1). Над рабочей зоной фильтра расположен детектор с коллиматором и преусилитель.



Рис. 1. Установка для измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей.

Fig. 1. Device for measuring the volumetric activity of radioactive aerosols.

Альфа- и бета- излучение частиц аэрозоля, осевших на фильтре, попадая на детектор, формирует электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии, регистрируемых альфа частиц (рис.2), а количество импульсов определенной амплитуды пропорционально активности частиц определенной энергии.

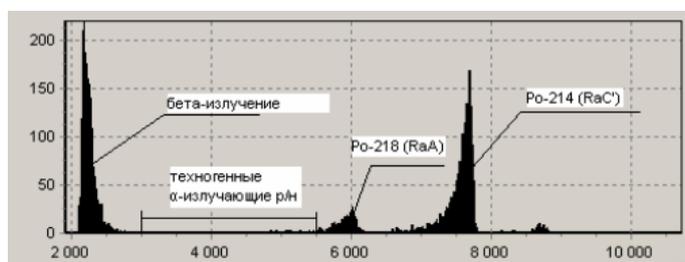


Рис. 2. Энергетический спектр излучения рабочей зоны фильтра после прокачки воздуха.

Fig. 2. The energy spectrum of the radiation of the working area of the filter after air pumping.

Установка для измерений объёмной активности радиоактивных аэрозолей имеет свои достоинства – непрерывность процесса измерения, возможность сигнализации о превышении установленного контрольного уровня, способность разделять поток альфа-излучения по энергетическому спектру и, тем самым, учитывать вклад радона и его

дочерних продуктов распада в общем потоке регистрируемого излучения [15, 16]. Однако высокая стоимость оборудования делает её не всегда доступной для применения. Вместе с тем, установка для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей не позволяет оценить защитные свойства применяемых персоналом СИЗОД при работах с пылеобразующими РАО.

В настоящей статье предлагается метод измерения концентрации альфа-частиц в воздухе рабочей зоны персонала, основанный на отборе проб воздуха на аналитический фильтр с помощью аспиратора, с последующим измерением плотности потока излучения с его поверхности переносными приборами радиационного контроля (например, дозиметром-радиометром ДКС-96 с соответствующими блоками детектирования). В отличие от существующих, предлагаемый метод является оперативным, более доступным и приемлемым в случае необходимости периодического контроля вклада радионуклидов (например, трансурановых) в ожидаемую дозу внутреннего облучения персонала и установления некоего контрольного уровня для оперативного принятия решения. Кроме того, применение специально разработанных переходников, совмещенных с аспиратором резьбовым соединением, позволяет оперативно оценить защитные свойства таких СИЗОД, как полнолицевые маски с противогазовыми фильтрами ДОТ-600, UNIX, 3М.

Материалы и методы

С точки зрения внутреннего облучения наиболее опасными являются альфа-излучающие радионуклиды [15], так как пробег альфа-частиц в веществе мал, и их энергия целиком поглощается вблизи места концентрации радионуклида [18]. При ингаляции наибольший дозовый коэффициент соответствует трансурановым элементам, например, плутонию-239 ($\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ Зв/Бк [19]), поэтому целесообразно при оперативном контроле измерять именно альфа-излучение, однако при наличии значительного компонента бета-излучателей можно добавить в мониторинг и этот компонент.

Для гарантированного непревышения допустимой годовой эффективной дозы персонала в расчетах применим наибольшие параметры, влияющие на дозу, при этом, считая, что все радионуклиды, попавшие в организм, оказывают 100% воздействие на дозу внутреннего облучения. Такое допущение упростит расчет и позволит гарантированно не превысить реальные дозы персонала по сравнению с расчетными. Учитывая основные пределы доз [20] для расчета установим контрольный уровень (КУ) по эффективной дозе персонала группы «А» 15 мЗв в год. Введем КУ по внешнему облучению - 5 мЗв, тогда допустимая доза по внутреннему облучению может быть не более 10 мЗв.

Для расчета возьмем 2022 год, где количество рабочих дней 247, из них 36 дней отпуска и 3 дня (минимум) дополнительного отпуска за работу во вредных условиях труда. Итого 208 рабочих дней - это максимально возможное количество дней работы персонала группы А во вредных условиях труда. Тогда максимальная доза внутреннего облучения за один рабочий день $E_{\text{в макс}}$:

$$E_{\text{в макс}} = \frac{10 \text{ мЗв}}{208 \text{ раб.дней}} = 0,048 \text{ мЗв} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ Зв}$$

Для дальнейших расчетов, необходимо определиться с величиной дозового коэффициента радионуклида $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$. При этом, $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}$ следует выбрать исходя из реальной смеси радионуклидов в контролируемой зоне дыхания. Для этого следует сравнить активности радионуклидов в пробе воздуха и определить дозовый коэффициент пропорционально вкладу основных загрязнителей пропорцией, затем полученный результат сместить на 20 % вверх или взять для расчетов максимальный коэффициент, если соотношение радионуклидов в смеси может меняться во времени.

Настоящий расчет ведем по трансурановым элементам, в частности по плутонию-239. Для него дозовый коэффициент составляет $\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}} = 4,7 \cdot 10^{-5}$ Зв/Бк (для соединений, имеющих промежуточную скорость всасывания - П). Тогда максимально допустимая активность $A_{\text{макс}}$ смеси радионуклидов, которая может попасть в легкие работнику за один рабочий день, составит:

$$A_{\text{макс}} = \frac{E_{\text{в макс}}}{\epsilon_{\text{перс}}^{\text{возд}}} = 1 \text{ Бк}$$

В соответствии с [21] средний объем вдыхаемого персоналом воздуха составляет

1,41 м³. Для расчета возьмем длительность смены 4 часа, тогда объем вдыхаемого воздуха за это время составит 5,64 м³. В результате, объемная активность вдыхаемого персоналом воздуха не должна превышать величину:

$$A_{\text{об.макс}} = \frac{A_{\text{макс}}}{5,64} = 0,177 \text{ Бк / м}^3.$$

Следовательно, активность, вдыхаемая персоналом с воздухом в рабочей зоне за 1 час не должна превысить величину:

$$A_{\text{ул.макс.т}} = \frac{A_{\text{макс}}}{4 \text{ ч}} = 0,25 \text{ Бк / час.}$$

Для анализа объемной активности радионуклидов в воздухе аэрозоли из контролируемого объема воздуха должны собираться на аналитический фильтр с помощью пробоотборного устройства, например ПУ-5. Так как данный фильтр состоит из волокон перхлорвинила, то все собранные аэрозоли будут концентрироваться в тонком слое мембраны этого фильтра [22]. Следует отметить, что приближение аэрозольных частиц к поверхности волокна происходит по разным механизмам: за счет диффузии, касания, инерции, электростатического притяжения. Как правило, самые мелкие частицы, размером меньше 0,3 мкм, улавливаются преимущественно за счет диффузионного эффекта, а частицы больших размеров – преимущественно под действием механизмов касания, инерции и седиментации. Электростатический эффект осаждения проявляется в значительной степени при наличии высокозаряженных частиц и/или волокон. Таким образом, весь собранный радиоактивный материал концентрируется в тонком слое на поверхности аналитического фильтра, что чрезвычайно важно для измерения альфа излучения. Это позволяет анализировать объемную активность радионуклидов в воздухе при помощи дозиметра радиометра, измеряющего плотность потока излучения с поверхности объекта (фильтра) и аспиратора, измеряющего объем прокаченного через фильтр воздуха.

Для измерения плотности потока альфа-излучения с поверхности фильтра можно использовать дозиметр-радиометр ДКС-96 (рис. 3) с блоком детектирования БДЗА-96 (при необходимости можно учесть и бета излучение, с помощью блока детектирования БДЗБ-96). Задача сводится к пересчету объемной активности, измеряемой в Бк/м³ в плотность потока излучения с поверхности фильтра, выражаемую обычно в единицах частица/(см²·мин). При этом, единицы измерения активности 1 Бк соответствует одному распаду в секунду, в данном случае одной альфа частице в секунду, попавшей на поверхность детектора.



Рис. 3. Измерение альфа-частиц дозиметром радиометром ДКС-96 (блок БДЗА-96) с экспонированного фильтра АФА-РСР20 *Fig. 3. Measurement of alpha particles by a dosimeter with a DKS-96 radiometer (BDZA-96 unit) from an exposed AFA-RSP 20 filter*

Чтобы получить искомую величину – активность радионуклидов в анализируемом объеме воздуха - следует разместить экспонированный аналитический фильтр АФА-РСР20 над рабочей поверхностью вверх на ровной и чистой горизонтальной поверхности (например, чистый лист бумаги), установить на него детектор. На рисунке 3 показано измерение альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСР20 дозиметром радиометром ДКС-96 с блоком детектирования БДЗА-96.

Дозиметр радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДЗА-96 производит прямые измерения плотности потока альфа излучения с поверхности в единицах: частица/(см²·мин.) [23]. Детектор представляет собой тонкий органический сцинтиллятор,

покрытый слоем порошка ZnS (Ag), его площадь составляет 70 см^2 . Детектор пересчитывает все зарегистрированное излучение на 1 см^2 исходя из своей площади, следовательно, надо измеренное значение умножить на площадь детектора 70 см^2 для получения полного потока альфа-излучения с фильтра.

Расстояние от поверхности детектора до фильтра минимально, но поверхность детектора не соприкоснется с фильтром, что гарантирует чистоту детектора. Диаметр детектора значительно больше диаметра фильтра, следовательно, практически все альфа-частицы, выпущенные в сторону детектора будут зарегистрированы.

Определив количество частиц на экспонированном фильтре АФА-РСП20, можем оценить допустимую объемную активность на рабочем месте, а также ввести контрольный уровень для обеспечения нормальных условий работы персонала и соблюдения норм радиационной безопасности при работах по выводу из эксплуатации ОИАЭ.

Результаты и обсуждения

Рассмотрим применение предложенного метода при оценке объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала при выполнении им работ по переупаковке твердых РАО с содержанием трансурановых элементов, где преобладающим радионуклидом является плутоний-239.

Оценим величину контрольного уровня по потоку альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА РСП20 для контроля предельной концентрации радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочей зоны при применении персоналом СИЗОД (для расчета берем полнолицевую маску с фильтром ДОТ-600). Для оценки эффективности использования фильтра ДОТ-600 можно использовать паспортные характеристики фильтра ДОТ-600 (50 ПДК) или комплекта маска+фильтр (до 200ПДК), но это не дает убедительных данных о работе фильтра с конкретным загрязнителем, так как испытания СИЗОД проводятся по стандартизированной схеме и не учитывают особенностей конкретной фильтруемой среды.

Для точного понимания эффективности фильтра, были проведены испытания фильтра ДОТ-600 в условиях конкретного загрязняющего фактора. Отбор проб производился с помощью специально разработанных и изготовленных деталей из фторопласта (рис. 4): 1 – переходник для отбора воздуха через противогазовые фильтры типа ДОТ-600, БРИЗ-3001 (или аналогичные); 2 – переходник для отбора воздуха через противогазовый фильтр типа UNIX, ЗМ (или аналогичные); 3 – прижимное кольцо для надежной фиксации аналитического фильтра АФА-РСП20. Все изготовленные детали имеют резьбовое соединение совместимое с входом расходомера-пробоотборника ПУ-5, а переходники (детали 1 и 2) – еще и резьбовое соединение с выходом противогазового фильтра.

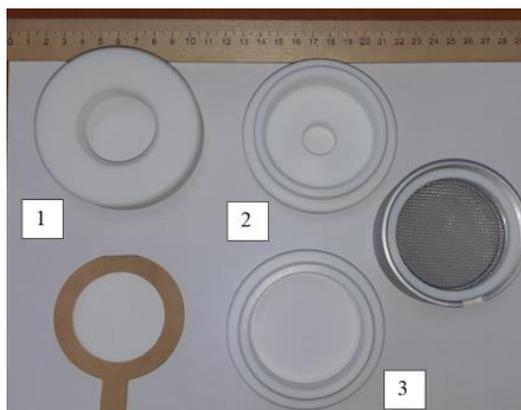


Рис. 4. Комплект фторопластовых переходников Fig. 4. Set of fluoroplastic adapters to PU-5 к ПУ-5

Отбор проб воздуха осуществляется с помощью расходомера-пробоотборника радиоактивных газоаэрозольных смесей ПУ-5 в двух вариантах с одинаковыми условиями (радионуклидный состав РАО, прокачка воздуха 500 литров):

- непосредственный отбор проб воздуха из рабочей зоны на аналитический фильтр АФА-РСП20 (рис. 5) – регистрировалось излучение альфа-частиц на уровне $167 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$;

- отбор проб воздуха на АФА-РСП20 через фильтр ДОТ-600 (рис. 6) – регистрировалось излучение альфа-частиц на уровне $1,21 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$.



Рис. 5. Отбор проб воздуха непосредственно на аналитический фильтр АФА-РСП20

Fig. 5. Air sampling directly to the AFA-RSP20 analytical filter



Рис. 6. ПУ-5 в сборе с аналитическим фильтром АФА-РСП20 и ДОТ-600.

Fig. 6. PU-5 assembled with search filters AFA-RSP20 and DOT-600.

При прокачке на ПУ-5 выбрана оптимальная скорость 50 л/мин. – это обеспечивает нормальный режим продувки фильтра. Увеличение пропускной способности (воздушной нагрузки) приводит к сокращению времени отбора пробы и, следовательно, к сокращению общего времени анализа. Однако это приводит к увеличению сопротивления фильтра и часто – к соответствующему снижению производительности аспирационного устройства, а также к возможности механического повреждения поверхности.

Далее, оценим величину коэффициента проскока частиц для фильтра ДОТ-600 в реальных условиях его применения: поток альфа излучения от частиц, собранных аналитическим фильтром АФА-РСП20 после прокачки 500 литров воздуха напрямую составил 168,67 частиц/(см²·мин), а с предварительным фильтрованием через ДОТ-600 – 1,22 частиц/(см²·мин), что соответствует коэффициенту проскока для ДОТ-600 – 0,723 %.

Тогда, допустимая объемная активность на рабочем месте при применении СИЗОД составит:

$$A_{\text{доп.макс}} = \frac{A_{\text{об.макс}} \cdot n \cdot 100\%}{0,723\%} = 24,5 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3}.$$

Поскольку измерения активности, собранной на фильтре АФА-РСП20 производится альфа детектором (БДЗА-96) радиометра ДКС-96, то необходимо учитывать, что частицы, выпущенные с фильтра в противоположную сторону от детектора, зарегистрированы им не будут. Кроме того, дозиметр-радиометр ДКС-96 измеряет поток за 1 минуту, но активность – это количество распадов в секунду (или частиц в секунду), а также необходимо полученный результат привести к нормируемому объему воздуха 1 м³.

С учетом вышесказанного, для контроля уровня допустимой активности аэрозолей определим контрольный уровень для потока альфа частиц с экспонированного фильтра АФА-РСП20 по показаниям дозиметра радиометра ДКС-96 с детектором БДЗА-96 в единицах частиц/(см²·мин):

$$\Phi_{\alpha} = \frac{A_{\text{доп.макс}} \cdot 60 \cdot 0,5}{2 \cdot 70} = 5,25 \frac{\text{част}}{\text{мин} \cdot \text{см}^2}$$

здесь объемную активность $A_{\text{доп.макс}}$ делим на 2 – детектор БДЗА-96 может зафиксировать только половину распадов (альфа частиц), поток которых направлен в его сторону (вторая

половина потока альфа частиц распространяется в противоположную от детектора сторону), умножаем на 60 секунд – измерения радиометром ДКС-96 выдаются за минуту, делим на 70 – площадь детектора 70 см², а ДКС-96 выдает результат, нормированный на 1 см², умножаем на отобранный объем воздуха, пропущенный через фильтр АФА-РСП20 в единицах кубических метров (0,5 м³).

Учитывая погрешность измерения для ДКС-96 с блоком БДЗА-96 [17]:

$$\pm(20 + 5/A_x) = \pm(20 + 5/5,25) = 20,95\% \text{ (или } 1,1 \frac{\text{част}}{\text{мин}\cdot\text{см}^2}\text{),}$$

получим контрольный уровень плотности потока альфа-частиц с экспонированного 500 литрами воздуха на любом рабочем месте персонала:

$$K\phi_\alpha = 4,15 \frac{\text{част}}{\text{мин}\cdot\text{см}^2}$$

$K\phi_\alpha$ - контрольный уровень допустимой объемной активности в воздухе на рабочих местах персонала, при применении ими СИЗОД. Здесь следует отметить, что полученный контрольный уровень подлежит согласованию в органах ФМБА России.

Наличие радона и его дочерних продуктов распада в воздухе контролируемой зоны выполнения работ, осложняет применение предлагаемого метода, так как дозиметр-радиометр ДКС-96 не может оценить вклад продуктов распада радона в измеряемом потоке альфа-излучения с фильтра. Для получения истинного результата по стабильным изотопам (например, трансурановым) необходимо повторно измерять экспонированный фильтр спустя 3-5 суток. Это снижает оперативность метода, но вполне приемлемо при оценке радиационной обстановке квазистационарных рабочих мест, где контролируемые радиационные характеристики резко не меняются. О вкладе радона в объемную активность можно судить по статистическим данным ранее произведенных измерений при регулярном периодическом отборе проб воздуха. Этого вполне достаточно для принятия решения об ограничении работы персонала по времени и необходимости изменения режимов работы оборудования и систем принудительной вентиляции, а оценку ожидаемой годовой дозы внутреннего облучения персонала можно проводить по данным повторных измерений (спустя 4-5 дней) ранее экспонированных фильтров.

Следует отметить, что согласно нормативно-технической документации («МУ2.6.5.008-2016. 2.6.5. Атомная энергетика и промышленность. Контроль радиационной обстановки. Общие требования. Методические указания», утв. ФМБА России 22.04.2016) в организациях должен быть разработан и согласован с ФМБА России порядок (программа, план, регламент) радиационного контроля (РК) в части организации контроля радиационной обстановки в местах работы персонала. В указанном документе должны быть отражены: вид контроля и контрольные уровни радиационных параметров; объекты РК; контролируемые виды и энергетические спектры излучения; используемые приборы РК; используемые методики; периодичность контроля; форму представления и регистрации результатов РК.

В таблице представлена часть такой программы. Предлагаемая периодичность контроля в таблице учитывает влияние радона и его дочерних продуктов распада в воздухе контролируемой зоны.

Таблица

Номенклатура, периодичность и объем радиационного контроля

Наименование контролируемого параметра	Плотность потока α - частиц
Объект проведения контроля/ точка контроля	Поверхность фильтр АФА-РСП20 после прокачки воздуха рабочей зоны ПУ-5 в объеме 500 литров / рабочая зона персонала
Периодичность контроля	Ежесменно; каждый час после начала работ. Измерение фильтра в 1й день, на 4й, 7й, 10й день.
Методика контроля	Руководство по эксплуатации "Дозиметры-радиометры ДКС-96". ТЕ1.415313.003РЭ, ТЕ1.415313.003-05РЭ
Аппаратура, прибор	ПУ-5, ДКС-96
Вид отчётного документа	Журнал или протокол
Структурное подразделение	Дозиметрист

Таким образом, при выполнении работ с твердыми РАО при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии, можно оперативно контролировать радиационную обстановку в месте работ измеряя переносными

приборами радиационного контроля с альфа-блоками детектирования плотность потока альфа-частиц с экспонированного фильтра АФА-РСР20 – для принятия оперативного решения о применяемых СИЗОД, времени нахождения в рабочей зоне, а также прогноза ожидаемой эффективной дозы персонала.

Заключение

При выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии возникает необходимость радиационного контроля воздуха рабочей зоны в непосредственном месте работ персонала. В настоящее время применяют стандартные установки для измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей, которые удобны в применении, позволяют непрерывно контролировать воздух рабочей зоны, имеют сигнализацию о превышении установленного контрольного уровня, имеют способность учитывать вклад радона и его дочерних продуктов распада в общем потоке регистрируемого излучения. Однако применение подобных установок часто недоступно в силу определенных причин и, что наиболее важно, при всех своих преимуществах они не позволяют оценить защитные свойства СИЗОД, применяемых персоналом при работе с открытыми источниками ионизирующего излучения и пылеобразующими РАО.

В статье предложен новый метод оперативного контроля объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны, основанный на отборе проб воздуха на аналитический фильтр с помощью аспиратора (например, ПУ-5), с последующим измерением плотности потока излучения с его поверхности переносными приборами радиационного контроля.

Результаты практического применения предложенного метода при работах с пылеобразующими твердыми радиоактивными отходами показали высокую практическую значимость – метод позволяет достаточно оперативно контролировать состояние воздуха на различных рабочих местах персонала, т.к. отбор 500 литров воздуха на фильтр АФА-РСР20 и дальнейший анализ с применением дозиметра-радиометра ДКС-96 (блок детектирования БДЗА-96) не превышает 10 минут.

В отличие от существующих способов контроля радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала, применение предлагаемого метода позволяет принять правильное решение о применении тех или иных видов средств индивидуальной защиты органов дыхания персоналом, работающего с радиоактивными отходами, содержащие трансураниевые радионуклиды (в том числе плутоний-239), а также контролировать эффективность систем вентиляции, рассчитывать ожидаемую годовую дозу персонала от внутреннего облучения групповым методом.

Разработанный и предложенный метод оперативного контроля объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны персонала на основе прямых измерений, может применяться как в виде основного метода, так и вспомогательно с другими методами, при выполнении персоналом радиационно опасных работ с открытыми источниками ионизирующего излучения и пылеобразующими РАО при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии.

Литература

1. Москаленко Н.И., Хамидуллина М.С., Сафиуллина Я.С. Моделирование радиационного теплообмена в средах, возмущенных сильными антропогенными и природными воздействиями. III. Возможные климатические последствия постядерных конфликтов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 9-10. С. 21-30.
2. Рыбин А.А., Рождественская Л.Н., Серебряков В.В., и др. Выбор и испытания поглощающих материалов для очистки газовой среды радиационно-защитных камер от летучих форм радиоактивных веществ // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». 2014. № 1. С. 46-53.
3. Senior Expert Symposium on Electricity and Environment. Helsinki, Finland, 13-17 May 1991, IAEA, 1991. 502 p.
4. Tran N.L., Locke P.A., Burke T.A. Chemical and Radiation Environmental Risk Management: Differences, Commonalities, and Challenges // Risk Analysis. 2020. Vol. 20. N2. pp. 163-172. doi: 10.1111/0272-4332.202017.
5. Гусев Н.Г., Головкой М.Ю., Шамов М.И., и др. Выброс радиоактивных газов и аэрозолей серийными атомными станциями // Атомная энергия. 1993. Т. 74. В.4. С. 360-364.
6. Chistyakova L.K., Kopytin Y.D. Spectroradiometric Inspection of Nuclear Pollution in The Atmosphere Based on Photochemical Effects // Optical Engineering. 2005. Vol. 44. N7. pp. 1-13. doi: 10.1117/1.1955204.

7. Замятин А.В. Оптимизация многослойных фильтров для измерения дисперсности радиоактивных аэрозолей в вентиляционных выбросах АЭС // Приборы. 2018. № 12(222). С.28-31.
8. Кузнецова А.Ю., Анциферова Е.Ю., Белоусов С.В., Хлебников С.В., Бочаров К.Г. Мониторинг радиационной обстановки при выводе из эксплуатации исследовательского корпуса Б АО «ВНИИИМ» // Атомная энергия. 2019. Т. 127. № 4. С 52-55.
9. Майзик А.Б., Цовьянов А.Г., Коренков И.П., и др. Защита персонала от аэрозольных выбросов при проведении дезактивационных работ при выводе из эксплуатации радиационно опасных объектов // АНРИ. 2020. № 4(103). С. 36-45.
10. Чикляев Е.Г., Танеева А.В., Коротаев О.Р., Перикова Е.С., Новиков В.Ф. Проблемы экологической безопасности промышленных предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 3-4. С. 122-130.
11. Романов А.В., Федотов А.В. Опыт внедрения радиометрической установки УДА-1АБ с целью создания системы непрерывного контроля радиационной обстановки на ОАО «Машиностроительный завод» // АНРИ. 2006. № 3(46). С .23-28.
12. Припачкин, Д. А., Демирташ У. Влияние коллиматора на качество спектра альфа-излучения // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23 апреля 2021 года. Обнинск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии». 2021. С. 215-217.
13. Припачкин Д.А., Хусейн Ю.Н., Будыка А. К., и др. Способ определения параметров дисперсного состава радиоактивных аэрозолей. Патент РФ на изобретение № RU 2676557 С1. 23.04.2018. Доступно по: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=6123EBF2-1C87-4A65-B8E1-046188F24D80> Ссылка активна на 07 апреля 2022 г.
14. Дорух И.Г., Огурцов Е.С., Скворцов О.А., и др. Способ измерения объемной активности бета-активных аэрозолей. Патент РФ на изобретение № RU 2547162 С2. 16.01.2013. Доступно по: <https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.04.10/DOC/RUNWC2/000/000/002/547/162/DOCUMENT.PDF> Ссылка активна на 07 апреля 2022 г.
15. Демидов А.В., Дыганова Р.Я. Приборы и методы регистрации радона в воздухе, воде и почве // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 5-6. С. 121-124.
16. Chalupnik S. The Analysis of Results of Radon/Thoron Measurements Performed with the Use of Nuclear Track Detectors // Journal of Radiological Protection. 2020. Vol. 40. N 4. pp. 39-45. doi: 10.1088/1361-6498/abae0e.
17. Молоканов А.А., Кухта Б.А., Максимова Е.Ю. Сравнительный анализ подходов к нормированию и контролю внутреннего облучения персонала // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 6. С.102-110. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-6-102-110.
18. Clarke R.H., Dunster J., Smith H., et al. The Environmental Safety and Health Implications of Plutonium // Journal of radiological protection. 1996. Vol. 16. N 2. pp. 91-105. doi: 10.1088/0952-4746/16/2/005.
19. Абрамов Ю. В. [и др.]; под общ. ред. Л. А. Ильина. Плутоний. Радиационная безопасность: монография. М.: ИздАТ, 2005. С. 415.
20. Гоский А.А., Перминова Г.С., Степанов В.С., и др. О нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 // АНРИ. 2009. № 4(59). С.18-20.
21. Aumalikova M., Ibrayeva D., Zhumadilov K., et al. Calculation of Radiation Burden of Personnel and Public, Working and Living in Area of the Uranium Mining and Uranium-Processing Enterprises. Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series. 2019. Vol. 2, N 127. pp. 38-47. doi: 10.32523/2616-68-36-2019-127-2-38-47.
22. Budyka A.K., Kirsch A.A., Ogorodnikov V.I. Filtration and Sampling by Fibrous Filters. Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects, Second Edition. CRC Press. 2012. pp. 439-472. doi: 10.1201/b12668.
23. Стогний В.И., Девяткин И.В., Нурлыбаев К. Дозиметр-радиометр ДКС-96: в ногу со временем // АНРИ. 2008. № 4(55). С. 60-63.

Авторы публикации

Герасименко Александр Сергеевич - заместитель директора по общим вопросам, филиал

«Сибирский территориальный округ» Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор».

Дорохов Сергей Владимирович – канд. физ.-мат. наук, начальник отдела радиационной, промышленной, экологической безопасности и охраны труда, филиал «Сибирский территориальный округ» Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор».

Криворотова Виктория Викторовна - канд. физ.-мат. наук, начальник службы радиационной безопасности-начальник лаборатории, филиал «Сибирский территориальный округ», Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор», доцент кафедры «Электроэнергетика транспорта», Иркутский государственный университет путей сообщения».

References

1. Moskalenko N.I., Khamidullina M.S., Safiullina YA.S. *Modeling of Radiative Heat Transfer in Environments Perturbed Strong Human and Natural Influence. III. Possible Climatic Consequences of Post-Nuclear Conflicts* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2014; 9-10: 21-30.
2. Rybin A.A., Rozhdestvenskaya L.N., Serebryakov V.V., Baryshnikov S.G., Amelina E.V. *Vybor i ispytaniya pogloshchayushchikh materialov dlya ochistki gazovozdushnoy sredy radiatsionno-zashchitnykh kamer ot letuchikh form radioaktivnykh veshchestv. Proceedings of JSC "GNC NIAR"*. 2014; 1: 46-53.
3. Senior Expert Symposium on Electricity and Environment. Helsinki, Finland, 13-17 May 1991, IAEA, 1991. 502 p.
4. Tran N.L., Locke P.A., Burke T.A. Chemical and Radiation Environmental Risk Management: Differences, Commonalities, and Challenges // *Risk Analysis*. 2020. 20 (2): 163-172. doi: 10.1111/0272-4332.202017
5. Gusev N.G., Golovkoy M.Yu., Shamov M.I., et al. *Vybros radioaktivnykh gazov i aerorozley seriynymi atomnymi stantsiyami* // *Atomic Energy*. 1993; 74 (4): 360-364.
6. Chistyakova L.K., Kopytin Y.D. Spectroradiometric Inspection of Nuclear Pollution in The Atmosphere Based on Photochemical Effects // *Optical Engineering*. 2005; 44(7): 1-13. doi: 10.1117/1.1955204.
7. Zamyatin A.V. *Optimizatsiya mnogoslownykh fil'trov dlya izmereniya dispersnosti radioaktivnykh aerorozley v ventilyatsionnykh vybrosakh AES* // *Pribory*. 2018; 12(222): 28-31.
8. Kuznetsova A.Yu., Antsiferova E.Yu., Belousov S.V., et al. *Monitoring of radiation situation during the decommissioning of the research building* // *Atomic Energy*. 2019; 127 (4): 52-55.
9. Mayzik A.B., Tsov'yanov A.G., Korenkov I.P., et al. *Protection of personnel from aerosol emissions during decontamination work during the decommissioning of radiation hazardous facilities* // *ANRI*. 2020; 4(103): 36-45.
10. Chiklyayev E.G., Taneeva A.V., Korotaev O.R., Perikova E.S., Novikov V.F. *Problem of Ecological Air Safety of Industrial Enterprises* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2010; 3-4: 122-130.
11. Romanov A.V., Fedotov A.V. *Opyt vnedreniya radiometricheskoy ustanovki UDA-1AB s tsel'yu sozdaniya sistemy nepreryvnogo kontrolya radiatsionnoy obstanovki na OAO «Mashinostroitel'nyy zavod»* // *ANRI*. 2006; 3(46): 23-28. (In Russ).
12. Pripachkin, D. A., Demirtash U. *The influence of a collimator on the quality of the alpha radiation spectrum* // *Radioecological consequences of radiation accidents: on the 35th anniversary of the Chernobyl accident : Collection of reports of the international scientific and practical conference, Obninsk, April 22–23, 2021 . Obninsk: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology"*. 2021: 215-217.
13. Pripachkin D.A., Khuseyn YU.N., Budyka A. K., et al. *Sposob opredeleniya parametrov dispersnogo sostava radioaktivnykh aerorozley*. Patent RUS № RU 2676557 C1. 23.04.2018. Available at: <https://fips.ru/publication-web/publications/document?type=doc&tab=IZPM&id=6123EBF2-1C87-4A65-B8E1-046188F24D80> Accessed: 07 Apr 2022.
14. Dorukh I.G., Ogurtsov Ye.S., Skvortsov O.A., et al. *Sposob izmereniya ob"yemnoy aktivnosti beta-aktivnykh aerorozley*. Patent RUS № RU 2547162 C2. 16.01.2013. Available at: <https://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.04.10/DOC/RUNWC2/000/000/002/547/162/DOCUMENT.PDF>. Accessed: 07 Apr 2022.
15. Demidov A.V., Dyganova R.Ya. *Devices and methods of registration of radon in air, water and soil* // *Izvestiya vuzov. Problemy` e`nergetiki*. 2011; 5-6: 121-124.

16. Chalupnik S. The Analysis of Results of Radon/Thoron Measurements Performed with the Use of Nuclear Track Detectors // *Journal of Radiological Protection*. 2020; 40 (4): 39-45. doi: 10.1088/1361-6498/abae0e
17. Molokanov A.A., Kukhta B.A., Maksimova E.Yu. Comparative analysis of approaches to regulation and control of personnel internal exposure // *Medical radiology and radiation safety*. 2021; 66 (6): 102-110. doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-6-102-110.
18. Clarke R.H., Dunster J., Smith H., et al. The Environmental Safety and Health Implications of Plutonium // *Journal of radiological protection*. 1996; 16 (2): 91-105. doi: 10.1088/0952-4746/16/2/005
19. Abramov Yu. V. [et al.] Ilyin L.A., editors. Plutoniyy. Radiatsionnaya bezopasnost: monograph / under total ed. a. M.: Publishing House. 2005; 415 p.
20. Gosky A.A., Perminova G.S., Stepanov V.S., et al. O normakh radiatsionnoy bezopasnosti NRB-99/2009 // ANRI. 2009; 4(59): 18-20.
21. Aumalikova M., Ibrayeva D., Zhumadilov K., et al. Calculation of Radiation Burden of Personnel and Public, Working and Living in Area of the Uranium Mining and Uranium-Processing Enterprises. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Physics. Astronomy Series*. 2019; 2 (127): 38-47. doi: 10.32523/2616-68-36-2019-127-2-38-47
22. Budyka A.K., Kirsch A.A., Ogorodnikov B.I. Filtration and Sampling by Fibrous Filters. *Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry, and Health Effects, Second Edition*. CRC Press. 2012: 439-472 doi: 10.1201/b12668. doi: 10.1201/b12668
23. Stogniy V.I., Devyatkin I.V., Nurlybaev K. Dozimetr-radiometr DKS-96: v nogu so vremenem // ANRI. 2008; 4(55): 60-63.

Authors of the publication

Alexander S. Gerasimenko – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

Sergey V. Dorokhov – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk, Russia

Victoria V. Krivorotova – Branch «Siberian Territorial District» Federal State Unitary Enterprise «Federal Environmental Operator», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Получено **21.04.2022г.**

Отредактировано **06.05.2022г.**

Принято **06.05.2022г.**

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

А.В. Федюхин, А.Г. Звончевский

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

ORCID: 0000-0002-1819-0450, ORCID: 0000-0001-5639-6364

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка перспективных направлений по совершенствованию технологии нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) на основе использования теплоты низкотемпературных источников системы первичной перегонки нефти. *МЕТОДЫ.* Анализ исследуемой поточной схемы НПЗ проводился на предмет выявления самой энергозатратной системы, при этом использовались методы аналитического и термодинамического анализа. Анализ энергоиспользования в схеме электрообессоливающей установки осуществлялся на основе данных технологического регламента существующей ЭЛОУ-АВТ-7. Оценка целесообразности предложенных направлений и разработанных решений проводилась на основе методов технико-экономического и экологического анализа. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В настоящей статье описана актуальность рассматриваемой проблематики и обоснована значимость ее развития с перспективой совершенствования теплотехнологических процессов для повышения энергетической и экологической эффективности. На примере распространенной схемы по первичной переработке сырой нефти показано, что данная технология имеет значительный потенциал энергосбережения. Предложены наиболее перспективные направления по рациональному использованию теплоты, а также представлено модернизационное решение, направленное на усовершенствование технологических элементов схемы ЭЛОУ-АВТ-7 на основе утилизации теплоты углеводородной парогазовой смеси (ПГС). *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Предложенные направления энерго- и ресурсосбережения, а также разработанные мероприятия по использованию теплоты низкопотенциальных источников в схеме НПЗ показывают свою перспективность за счет существенного снижения тепловых потерь энергии, сокращения потребляемого топлива и повышения эффективности его использования, что, в целом, положительно отразится на экономической и экологической обстановке региона.

Ключевые слова: *ректификация; электрообессоливающая установка; рекуперация; энергосбережение; экологическая эффективность.*

Для цитирования: Федюхин А.В., Звончевский А.Г. Особенности прямых измерений для оценки объемной активности радионуклидов в воздухе рабочей зоны // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 15-27. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27.

PROMISING DIRECTIONS FOR THE USE OF HEAT FROM LOW-POTENTIAL SOURCES OF CHEMICAL PRODUCTION

AV. Fedyukhin, AG. Zvonchevsky

National Research University, MPEI, Moscow, Russia

RCID: 0000-0002-1819-0450, ORCID: 0000-0001-5639-6364

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of promising directions for improving the technology of an oil refinery (refinery) based on the use of heat from low-temperature sources of the primary oil distillation system. *METHODS.* The analysis of the technological scheme of the refinery carried out, in order to identify the most energy-intensive system, while using the methods of analytical and thermodynamic analysis. The analysis of energy use in the circuit of an electric desalination plant (EDP) is carried out according on the basis of the data of the technological regulations of the existing EDP-AVT-7. The assessment of the feasibility of the proposed directions and

developed solutions was carried out on the basis of the methods of technical, economic and environmental analysis. RESULTS. This article shows the relevance of the problem and substantiates the importance of its consideration for improving energy and environmental efficiency. Based on a common scheme for the primary processing of crude oil, it is noted that this technology has significant energy saving potential. It is proposed to implement promising directions for the rational use of heat, and a modernization solution is presented aimed at improving the technological elements of the EDP-AVT-7 circuit based on the heat recovery of the hydrocarbon vapor-gas mixture. CONCLUSION. The proposed directions and developed measures for the use of heat from low-grade sources in the refinery scheme show their promise due to a significant reduction in technological energy losses, a reduction in fuel consumption and an increase in the efficiency of its use, which, in general, will positively affect the economic and environmental situation in the region.

Keywords: *rectification; electric desalination plant; recuperation; energy saving; environmental efficiency.*

For citation: Fedyukhin AV, Zvonchevsky AG. Promising directions for the use of heat from low-potential sources of chemical production. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3):15-27. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27.

Введение и литературный обзор

За последние десятилетия химическая промышленность достигла высоких результатов, и с течением времени продолжает стремительно развиваться. Ежегодно увеличиваются объемы производства различных видов продукции, в следствии возведения новых энерготехнологических комплексов (ЭТК) по добыче, обогащению и переработке органических и неорганических веществ, а также в следствии увеличения единичных мощностей производств, входящих в состав ЭТК [1].

Согласно стратегическим направлениям развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России [2], планируется ввести ряд определенных механизмов, направленных на улучшение социально-экономической обстановки России и на укрепление позиций на мировой арене. Так, например, развитие системообразующих элементов экономической системы России в области химической промышленности сопровождается ростом энергетических мощностей, из-за чего возникает необходимость в поставке дополнительных объемов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

Однако, как известно, в результате роста объема потребляемых ТЭР, улучшается не только экономические показатели за счет реализации продукции, произведенной по итогу увеличения единичных мощностей производств, но вместе тем ухудшается и экологическая обстановка в следствии увеличения выбросов вредных веществ с продуктами горения в окружающую среду. Кроме того, при возведении новых промышленных объектов, при реконструкции или модернизации, необходимо решать задачи технологической и энергетической совместимости на основе наилучших доступных технологий и энергоэффективных решений, позволяющих повысить как экономическую и энергетическую [3], так и экологическую эффективность в производственной деятельности.

В связи с вышеописанной развивающейся зависимостью ТЭК, тесно коррелирующей с проблематикой экологического характера, на основе существующих задач в сфере нефтеперерабатывающей промышленности [4] формировалась актуальность настоящей работы, заключающаяся в разработке и анализе наиболее значимых направлений, которые позволяют охватить несколько смежных областей существующей проблематики. Ведь поставленные задачи по повышению энергетической и экономической эффективности должны решаться совместно с экологическими критериями результативности, поскольку игнорирование экологических угроз незамедлительно приведет к неоправданным рискам и потерям в условиях развития обратно пропорциональной зависимости эколого-экономических показателей. Поэтому, совершенствование энерготехнологических систем энергоемких производств нефтехимической промышленности должно осуществляться на основе актуальных научно-технических разработок, которые отвечают требованиям экономического и экологического характера.

Среди основных энергоемких объектов химической промышленности России, особое место занимает ЭТК нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. По объемам переработки углеводородного сырья в мире России занимает третье место, после США и Китая. Наряду с прогрессирующим развитием экономической составляющей нефтеперерабатывающей отрасли России, коррелируют проблемы и экологического характера [5]. Так, на этапе первичной переработки сырья в комбинированной системе атмосферно-вакуумной перегонки на одну тонну нефти расходуется значительное количество ТЭР, значения которых приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Удельные энергетические затраты на переработку сырья

Потребляемые топливные и энергетические ресурсы на одну тонну перерабатываемой продукции	Значение
Топливо, МДж	385-680
Электроэнергия, кВт·ч	6,6-8,8
Водяной пар, кг	10-17
Охлаждающая вода, м ³ ($\Delta T=15^\circ\text{C}$)	1,4-2,8

При этом, в структуре энергопотребления систем первичной переработки нефти, практически 85% приходится на различные виды топлив, около 10% на тепловую энергию с паром среднего и высокого давлений и около 5% на электроэнергию. В качестве основных видов топлива, используемого в технологии НПЗ, выступает как собственная произведенная продукция – углеводородный газ, дизельное топливо или мазут, так и покупная – природный газ [6]. При этом, для определения экологического воздействия при комплексной оценке нанесенного вреда с выбросами вредных веществ в атмосферу, прибегают к оценке количественных показателей при сжигании различного типа топлив. Наиболее распространенным показателем является годовой объем выбросов углекислого газа и его производных. Оценка выбросов диоксида углерода на одну тонну сжигаемого топлива рассчитывается в зависимости от вида топлива [7] в соответствии с регрессионными зависимостями, переводные коэффициенты которых приводятся в таблице 2.

Таблица 2

Удельные характеристики углеродного следа при сжигании топлив

Вид топлива	Выбросы CO ₂ , т /тыс.м ³
Дизельное топливо	3,15
Топочный мазут	3,1
Углеводородный газ	1,95
Природный газ	1,85

Согласно актуальным данным по оценке энергосберегающего потенциала в странах СНГ и за рубежом [8], имеются технологии и возможности по сокращению потребляемого топлива на 9%, по снижению нагрузок тепловой и электрической энергии соответственно на 9% и 10%. Кроме того, большинство нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) России, в силу технологических особенностей, имеют системы с низким показателем использования тепловой энергии, что еще раз подтверждает важность разработки перспективных инновационных научно-технологических направлений и значимость ресурсосберегающих технологий для всей нефтехимической промышленности [9].

Развитием данных направлений и разработкой инновационных решений в сфере нефтеперерабатывающей промышленности занимаются различные структуры проектных и научных организаций. Так, в одном канадском НПЗ компании Shell в г. Сарния было реализовано энергосберегающее решение по утилизации тепловой энергии шлемовых паров ректификационной колонны (РК) флюидизированного каталитического крекинга. Данное решение было организовано путем замены исходной системы охлаждения РК на новую с иным технологическим назначением. По мимо выполнения требуемой технологической операции по охлаждению шлемовых паров, разработанное решение позволяет утилизировать ранее не использованную тепловую энергию в количестве 13,5 МВт из располагаемых 23 МВт для нагрева котловой питательной воды посредством использования серии теплообменных аппаратов [10]. Такое решение обеспечивает эффективное охлаждение технологических потоков, позволяет экономить топливные и энергетические ресурсы, а также повышает надежность всей системы за счет применения современных

материалов, устойчивых к агрессивным средам в совокупности с высокими значениями термодинамических параметров. Кроме того, внедрение такого рода решений в технологию НПЗ повышает общую энергетическую эффективность производства.

С учетом существующих проблем, актуальных задач и развивающихся технологий в нефтехимической промышленности, возможно выделить наиболее распространенные и часто встречающиеся направления энергосбережения на нефтеперерабатывающих предприятиях:

1. Проведение организационно-технических мероприятий по снижению энергоёмкости технологических установок.
2. Модернизация и замена старого оборудования на новое с более высоким коэффициентом полезного действия (КПД).
3. Оптимизация технологий использования топлива.
4. Увеличение рекуперации тепла за счёт оптимизации схем движения теплоносителей, а также за счёт наращивания теплообменной площади рекуператоров.
5. Использование экономичных осветительных приборов.
6. Увеличение использования невостробованной тепловой энергии, а также повышение степени её утилизации.

На основе вышеописанной проблематики и актуальных направлений в сфере энергосбережения нефтехимической промышленности, предлагается проанализировать наиболее перспективные направления, способствующие прогрессивному развитию научно-технологической базы знаний. Это предоставит необходимую теоретико-ориентированную информацию на основе которой будут разрабатываться технологические алгоритмы внедрения проектных решений и мероприятий, а также будут решаться проблемы и задачи, имеющие непосредственное отношение к нефтеперерабатывающим технологиям и связь с энергосберегающей деятельностью на основе использования источников бросовой теплоты.

Целью настоящей статьи является разработка перспективных направлений по совершенствованию технологии НПЗ на основе использования теплоты низкотемпературных источников энерготехнологической системы производства.

Материалы и методы

На основе распространенной технологической схемы НПЗ, исследовалась потоковая схема нефтеперерабатывающего производства, выполнялся анализ энергоиспользования и выявлялись вакантные источники тепловой энергии различного потенциала для дальнейшего анализа целесообразности их использования [11]. Типовая схема переработки исходного сырья представлена на рисунке 1.

Описание технологических операций НПЗ

Очищенная от соли и воды нефть идёт на установку ректификации, называемую АТ (атмосферная трубчатка) или АВТ (атмосферно-вакуумная трубчатка). Нефть нагревают в трубчатых печах, топливом для которых служит попутный природный газ или произведённый на НПЗ углеводородный газ или мазут. Подогрев нефти осуществляется до температуры не более 360 °С в целях предотвращения развития процессов термического крекинга. Подогретая парожидкостная смесь поступает в ректификационную колонну, давление в которой близко к атмосферному, в куб колонны для лучшего испарения подаётся водяной пар. В ректификационной колонне нефть подразделяется на фракции в зависимости от температурных параметров, при этом колонны могут различаться по количеству отгонов, также в них может быть разное число систем с циркуляционным орошением. Однако во всех случаях физико-химические и тепло-массообменные процессы, протекающие в ректификационной колонне (РК), подчиняются одним и тем же законам классической термодинамики. Жидкость в нижней части РК подогревается в ребойлере и частично парообразуется и поступает на дальнейшую обработку, а неиспарившаяся часть откачивается. Пары в колонне движутся снизу-вверх, проходя при этом через слой жидкости, которая стекает сверху-вниз с одной тарелки на другую по переливным устройствам. Давление и температура убывают по высоте колонны, то есть температура и давление в нижней части колонны выше, чем в шлеме (верхней части). При контакте пара и жидкости происходит поглощение тяжёлых компонентов, содержащихся в паре жидкостью, а легкокипящие компоненты, наоборот, выделяются из жидкости. Из куба атмосферной ректификационной колонны выводится прямогонный мазут, который подлежит дальнейшей переработке в вакуумной колонне. Так как давление в такой колонне ниже атмосферного, диапазоны температур кипения сдвигаются вниз, таким образом, мазут разделяют по меньшей мере на две фракции: вакуумный газойль и гудрон. В некоторых случаях для снижения нагрузки на основную фракционирующую колонну устанавливают колонну

предварительного отбензинивания. Сырьё, поступающее в отбензинивающую колонну, подогревается в системе теплообменных аппаратов за счёт горячих продуктовых потоков главной фракционирующей колонны. Также в состав АВТ может входить блок вторичной ректификации широкой бензиновой фракции. На данном технологическом этапе первичная переработка нефти оканчивается.

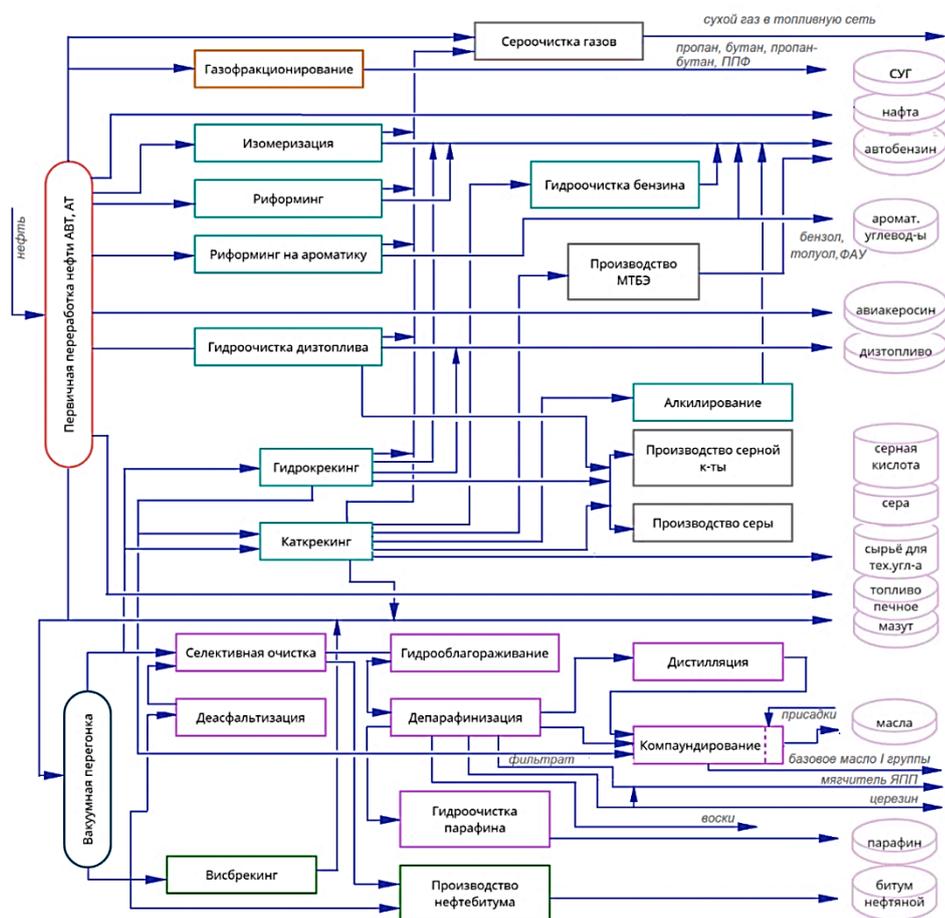


Рис.1. Поточная схема нефтеперерабатывающего завода Fig.1. Flow diagram of an oil refinery

Исследуемая схема

На начальных и промежуточной стадиях переработки нефтепродуктов, наряду с реформингом, гидроочисткой и изомеризацией имеются различные технологии, представляющие собой разнесенные системы с поэтапной обработкой сырьевой продукции или комбинированные системы, которые включают в себя выполнение нескольких технологических процессов, например – процесс ректификации, гидроочистки, абсорбции и тп. Среди подобных систем, имеет место электрообессоливающая установка (ЭЛОУ). Она может включать в себя несколько системных блоков, в зависимости от технологических особенностей. Эта система объединяет множество энергоёмких процессов [12], образующих как полезные, так и побочные продукты реакций, энергия которых может быть полезна использована. На рисунке 2 представлена принципиальная схема блока атмосферной перегонки нефтяных фракций комбинированной системы ЭЛОУ-АВТ.

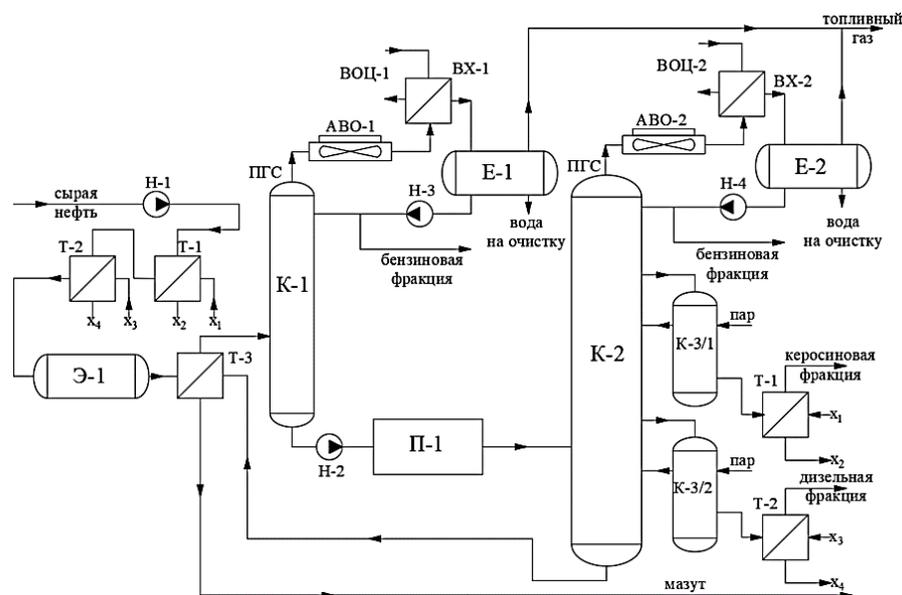


Рис.2. Принципиальная схема ЭЛОУ-АВТ: Э-1 — электродегидратор нефти; К-1 — отбензинивающая колонна; К-2 — основная ректификационная колонна; К-3/1 — отпарная колонна керосиновой фракции; К-3/2 — отпарная колонна дизельной фракции; П-1 — печь; Н-1, Н-2, Н-3, Н-4 — насосы; E-1 — рефлюксная емкость K-1; E-2 — рефлюксная емкость K-2; Т-1 — теплообменник нефть/керосин; Т-2 — теплообменник нефть/дизтопливо; Т-3 — теплообменник нефть/мазут; АВО-1 — аппарат воздушного охлаждения бензиновых фракций из K-1; ВХ-1 — водяной холодильник бензиновых фракций из K-1; АВО-2 — аппарат воздушного охлаждения бензиновых фракций из K-2; ВХ-2 — водяной холодильник бензиновых фракций из K-2.

Fig.2. Schematic diagram of EDP-AVT: E-1 - electric oil dehydrator; K-1 - topping column; K-2 - main distillation column; K-3/1 - kerosene fraction stripping column; K-3/2 - diesel fraction stripping column; P-1 - oven; N-1, N-2, N-3, N-4 - pumps; E-1 - reflux capacity K-1; E-2 - reflux capacity K-2; T-1 - oil/kerosene heat exchanger; T-2 - oil/diesel fuel heat exchanger; T-3 - oil/fuel oil heat exchanger; ACU-1 - air cooler for gasoline fractions from K-1; BX-1 - water cooler of gasoline fractions from K-1; ACU-2 - air cooler for gasoline fractions from K-2; BX-2 - water cooler of gasoline fractions from K-2.

Описание технологических операций схемы ЭЛОУ-АВТ

Атмосферная перегонка нефтяного сырья в рассматриваемом блоке осуществляется по схеме двукратного испарения. После предварительного подогрева нефти в рекуперационных теплообменниках (ТА-1,2,3) в первой ректификационной колонне отгоняются легкие бензиновые фракции. Удаление легких бензиновых фракций позволяет держать пониженное давление в системе колонны K-2, что благоприятно влияет на процесс ректификации. Получаемые фракции керосина и дизеля в системах K-3/1 и K-3/2, а также мазут перед поступлением на дальнейшую переработку направляются в систему рекуперации. Выходящая углеводородная парогазовая смесь (ПГС) после K-1 и K-2 поступает в системы воздушного и водяного охлаждения (АВО и ВОЦ) и далее направляется в рефлюксную емкость для последующей переработки. Образовавшаяся бензиновая фракция после систем E-1 и E-2 частично рециркулируется в K-1 и K-2 и отбирается на последующие стадии технологической обработки. Установки атмосферной и вакуумной перегонки на данном этапе первичной переработки являются одними из наиболее энергоемких в ЭТК НПЗ, причем весь объем перерабатываемой сырой нефти должен быть нагрет до температуры приблизительно 350°C. В общем энергопотреблении на НПЗ доминируют несколько термодинамических процессов. В частности, процессы ректификации, потребляют большое количество тепловой и электрической энергии. Процесс ректификации реализуется на установках первичной переработки нефти, где потребление энергии установками АТ и АВТ составляют порядка 40% от общего потребления энергии. Поточная теплота продуктов атмосферной перегонки с повышенной температурой используется в последующих технологических процессах в блоке вакуумной перегонки.

Анализ энергоиспользования

Описанная выше схема интересна тем, что в некоторых технологических блоках системы возникают аппаратные и технологические потери. Такие системы представляют особый интерес, поскольку существующие потери есть ни что иное как потенциальный резерв энергосбережения. Так, например, из верхних частей колонн К-1 и К-2 отводятся потоки углеводородной ПГС с довольно высокими температурными параметрами, около 120-160 °С, что выше примерно на 50-60 °С аналогичных источников бросовой теплоты в технологии. Данные тепловые потоки после К-1 и К-2 охлаждаются сначала в аппаратах воздушного охлаждения (АВО-1 и АВО-2), а затем в водяных теплообменниках (ВХ-1 и ВХ-2) до относительно низких температур, которые составляют около 30-35 °С. Таким образом, охлаждение потока ПГС относительно высокого температурного уровня, сопровождается значительными потерями энергии, теплота которых рассеивается в окружающей среде. Поэтому, целесообразно использовать энергию охлаждения и конденсации углеводородной ПГС в энергоэффективных системах, которые позволят реализовать тепловой потенциал.

На основе технологического регламента схемы ЭЛОУ-АВТ-7 получены значения термодинамических параметрах располагаемых теплоносителей после ректификационных колонн К-1 и К-2 для блока атмосферной перегонки нефти. Материальные и тепловые потоки теплоносителей представлены в таблице 3.

Таблица 3

Материальные и тепловые потоки теплоносителей

№	Поток*	Выходные параметры		
		Температура t , °С	Расход G , кг/с	Тепловой поток Q , кВт
1	ПГС после отбензинивающей колонны К1 в систему АВО-1	143	43,2	7278,5
2	ПГС после атмосферной колонны К2 в систему АВО-2	117	25,3	2900,1
3	ПГС после отбензинивающей колонны К1 в систему ВОЦ-1	65	43,2	2791,4
4	ПГС после атмосферной колонны К2 в систему ВОЦ-2	65	25,3	1563,5

*Необходимо отметить, что тепловые потоки 1 и 2 рассчитаны с учетом их охлаждения и конденсации до температуры 65 °С, а потоки 3 и 4 рассчитаны с учетом переохлаждения конденсата ПГС до температуры 35 °С.

Итого, практически 15 МВт тепловой энергии попросту рассеивается в окружающей среде (ОС). Располагаемые тепловые потоки после отбензинивающей и атмосферной колонны (К-1 и К-2) системы ЭЛОУ-АВТ возможно использовать как в технологии производства, так и для нужд стороннего потребителя. С учетом постоянно возрастающей зависимости потребления ТЭР нефтеперерабатывающими комплексами и роста единичных мощностей смежных производств, возникает необходимость в дополнительном энергообеспечении, которое способствует эффективной и надежной эксплуатации основного и вспомогательного оборудования. Кроме того, для поддержания качественных условий в производственных зонах НПЗ необходимо обеспечивать комфортную климатическую среду. В связи с этим, в качестве перспективных направлений по утилизации бросовой теплоты системы ЭЛОУ-АВТ рассматривается возможность использования располагаемых мощностей ПГС [13] в энергоэффективных системах для нагрева воздуха, поступающего в печь, и для получения теплосетевой воды, идущей в индивидуальный тепловой пункт (ИТП). Это позволит сократить технологические и аппаратные потери с теплотой, за счет чего повысится энергетическая эффективность производства. Также, за счет подогрева воздуха снизится потребление топлива, что уменьшит нагрузку на вспомогательные системы технологии [14], сократятся затраты на покупку самого топлива в связи с повышением эффективности его использования, уменьшатся выбросы парогазовой смеси в атмосферу, за счет чего снизится химическое и тепловое загрязнение окружающей среды.

Предлагается рассмотреть технологическое решения по утилизации теплоты ПГС. Поскольку представленные тепловые потоки имеют различный температурный уровень, то с целью их эффективного использования необходимо распределить потоки по соответствующим ТА так, чтобы достигалась максимальная эффективность

теплоиспользования [15]. На рисунке 3 представлено перспективное решение по установке серии ТА для систем ИТП и подогрева воздуха.

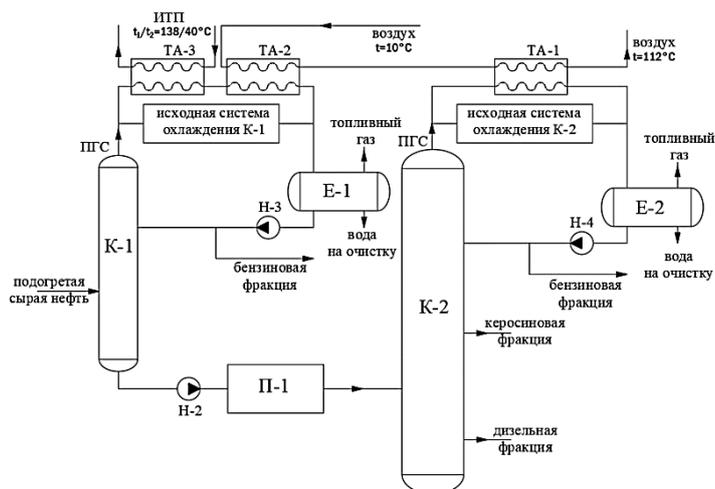


Рис.3. Модернизированная схема ЭЛОУ- АВТ Fig.3. Upgraded EDP-AVT scheme

Описание модернизированной схемы ЭЛОУ-АВТ

При охлаждении углеводородной ПГС после отбензинивающей колонны К-1 до температуры 65 °С имеем возможность использовать практически 7,3 МВт тепловой энергии в системе ИТП с температурным графиком $t_1/t_2=138/40$ °С посредством организации промежуточного нагрева теплоносителя в ТА-3. Также, предложено реализовать потенциал остаточной теплоты потока ПГС после К-1 в ТА-2 и теплоту верхнего погона атмосферной колонны К-2 в ТА-1 для нагрева наружного воздуха, идущего в печь на образование оптимального соотношения топливной смеси. Подобные решения по использованию теплоты ректификационных колонн подробно описываются в работе автора [16], а данные о целесообразности и экономической результативности такого решения обосновывается в соответствующих публикациях. Разработанная схема ИТП представленная на рисунке 4.

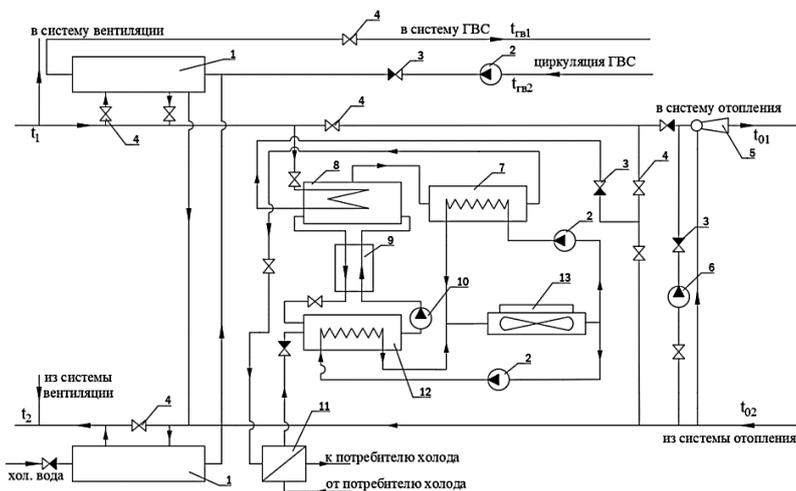


Рис.4 Схема ИТП с двухступенчатым присоединением подогревателей ГВС и с абсорбционной холодильной машиной: 1 - Подогреватель ГВС; 2 - циркуляционные насосы; 3 - обратный клапан; 4 - задвижка; 5 - струйный элеватор; 6 - центробежный насос; 7 - конденсатор абсорбционной холодильной машины (АБХМ); 8 - генератор АБХМ; 9 - теплообменник растворов; 10 - насос рабочего агента; 11 - испаритель АБХМ; 12 - абсорбер АБХМ; 13- аппарат воздушного охлаждения.

Описание принципиальной схемы ИТП

Теплосетевая вода, подогретая углеводородной ПГС в ТА-3, поступает на ИТП. Часть воды идет в систему вентиляции и в водоподогреватель ГВС второй ступени. Часть воды отбирается в генератор абсорбционной холодильной машины (АБХМ) и часть поступает в систему отопления. Отдав теплоту в генераторе АБХМ, вода подмешивается и через элеваторное смешение направляется в систему отопления. Обратный поток теплосетевой воды после системы отопления используется для подогрева холодной водопроводной воды в водоподогревателе ГВС первой ступени и затем поступает в тепловую сеть системы ТА-3. В генераторе АБХМ при нагреве выделяется легкокипящий компонент, после чего поступает в конденсатор, отдавая теплоту холодной воде, конденсируется, затем дросселируется и поступает в испаритель АБХМ. В испарителе АБХМ легкокипящий компонент испаряется, вырабатывая холод. Пары легкокипящего компонента поступают в абсорбер, где абсорбируются высококипящим компонентом. Затем, смесь, предварительно подогреваясь в теплообменнике растворов обратным потоком высококипящего компонента, поступает в верхнюю часть генератора АБХМ. Охлаждение конденсатора и абсорбера АБХМ осуществляется посредством организации вспомогательных контуров, где в качестве охлаждаемого теплоносителя выступает холодная вода, которая охлаждается в системе воздушного охлаждения (градирне). Такая схема позволяет обеспечить производство или стороннего потребителя необходимыми нагрузками на отопление, вентиляцию, кондиционирование и горячее водоснабжение (ГВС) в любой период года.

Описание системы подогрева воздуха

Как известно, практически ни один НПЗ не обходится без собственных источников генерации тепловой энергии, которые позволяют получить определенный вид энергоносителя высокого качества с требуемыми параметрами. С точки зрения энергоиспользования, наиболее перспективным вариантом реализации низкопотенциальной теплоты ПГС атмосферной ректификационной колонны К-2 является подогрев наружного воздуха, который поступает в печь для образования сбалансированного состава топливной смеси. Реализовать такое мероприятие предлагается за счет небольшой технологической модернизации, посредством организации дополнительного рекуперативного контура с теплообменниками ТА-1 и ТА-2, которые утилизируют шлемовую теплоту конденсатора колонны К-1 и всю тепловую нагрузку исходной системы охлаждения ПГС после колонны К-2. Это позволит практически полностью снизить нагрузки на вспомогательные системы охлаждения, а также приведет к существенной экономии природного газа за счет предварительного нагрева наружного воздуха, что в целом отразится на повышении КПД котла и эффективности использования ТЭР. Эксплуатация предложенных систем может осуществляться как в гибком, так и в постоянном режиме работы, что на этапе планирования и внедрения дает возможность реконструировать технологические участки без нарушения функциональности технологических операций по первичной переработке нефти в блоке атмосферной перегонки системы ЭЛОУ-АВТ.

Результаты

Предложенные перспективные направления энерго- и ресурсосбережения по использованию теплоты низкопотенциальных источников системы ЭЛОУ-АВТ в технологии производства на основе разработанных энергосберегающих мероприятий позволяют не только извлечь положительный эффект от совершенствования технологической схемы производства при существенной экономии ТЭР и повышения эффективности их использования, но и за счет реализации полученных энергоносителей возможно спрогнозировать значение экономического [17] и экологического эффекта [18]. Так, при использовании теплоты углеводородной ПГС в системе ИТП в количестве 7278,5 кВт для нужд производства или для продажи стороннему потребителю при стоимости 1000 рублей за 1 Гкал теплоты экономический эффект составит 28 млн. 310 тыс. рублей в год. За счет использования теплоты ПГС для подогрева воздуха в количестве 7254,96 кВт при стоимости природного газа 9 руб/нм³ экономический эффект составит 77 млн. 80 тыс. рублей в год. Суммарный экономический эффект от предложенных энергосберегающих решений составит 105 млн. 390 тыс. рублей в год, или в переводе на эквивалент условного топлива, экономия ТЭР составит 11,1 тыс. т.у.т/год. Данные об энергетической и экологической эффективности представлены в таблице 4.

Сравнительные характеристики предложенных решений

Мероприятие	Повышение эффективности использования топливных ресурсов, %	Экономический эффект, млн. руб/год	Сокращение выбросов, тыс. т CO ₂ /год
Подогрев теплосетевой воды, идущей в ИТП	2,49-4,39	28,31	8,95
Подогрев воздуха, идущего в печь	4,34-7,67	77,08	15,84
ИТОГО	6,83-12,06	105,39	24,79

Обсуждение

Таким образом, представленные в настоящей статье направления по использованию теплоты низкопотенциальных источников в схеме НПЗ, с одной стороны показывают их перспективность за счет утилизации значительного количества теплоты в некоторых структурных элементах системы первичной переработки нефти при незначительном конструктивном вмешательстве в технологию производства, что целом позволяет сократить тепловые потери и уменьшить потребление природного газа. Кроме того, реализация предложенных мероприятий позволит улучшить экологическую обстановку в регионе. С другой стороны, такие решения требуют дополнительных ресурсов материального-технического и временного характера на этапах проектирования, разработки и возведения вспомогательных систем и основных объектов на территории производственной зоны НПЗ, кроме того, реконструкция технологических узлов схемы должна планироваться и производиться для конкретной модификации системы ЭЛОУ, поскольку в каждой технологии имеются соответствующие особенности и нюансы как по энергетической, так и по конструктивной части. Также, необходимо отметить, что для оценки целесообразности при разработке подобных решений, необходимо выявлять потенциальных потребителей энергии на близлежащей территории технологической зоны производства и определять их потребность в соответствующих мощностях, производить детальный анализ термодинамических и технико-экономических показателей как самих решений, так и конечных модификаций технологических блоков схемы производства, преимущественно, на основе инновационных методик математического и имитационного моделирования [19].

Предложенные направления не представляет собой полного решения имеющихся проблем и поставленных задач в сфере нефтехимической промышленности, но дают начало для научно-технического обеспечения при разработке программ технического перевооружения НПЗ, а также формируют перечень методических рекомендаций, существенно упрощающий дальнейшую работу научно-исследовательских институтов и проектных организаций с целью эффективного использования ТЭР в нефтеперерабатывающем комплексе.

Выводы

1. Проанализированы основные этапы первичной переработки нефти на примере потоковой схемы НПЗ и выявлены самые энергоемкие подсистемы.
2. Выполнен анализ технологических процессов электрообессоливающей установки с атмосферной трубчаткой (ЭЛОУ-АТ) и выявлены вакантные источники тепловой энергии относительно высокого потенциала.
3. Предложены направления по использованию низкотемпературных энергоносителей, а также разработана модернизированная схема на примере системы ЭЛОУ-АТ в которой утилизируется теплота углеводородной ПГС в системах, предназначенных для технологических и коммунально-хозяйственных нужд.
4. Определен энергетический, экономический и экологический эффект от использования низкопотенциальной теплоты при реализации предложенных направлений в системе ЭЛОУ-АТ технологической схемы НПЗ, а также даны рекомендации по дальнейшему развитию энергоэффективных решений.

Литература

1. Голышева Е.А., Жданев О.В., Корнев В.В., и др. Нефтехимическая отрасль России: анализ текущего состояния и перспектив развития // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. № 10. С. 1499–1507. URL: <https://doi.org/10.31857/S0044461820100126>

2. Жданеев О.В., Корнев В. В., Рубцов А. С. О приоритетных направлениях и развитии технологий переработки нефти в России (обзор) // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 9. С. 1263–1274.

3. Грунтович Н.В., Шенец Е.Л. ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014;(2):58-66.

4. Ханило Д. А. Анализ текущего состояния и проблем функционирования предприятий нефтеперерабатывающего и нефтехимического комплексов на современном этапе // Молодой ученый. 2019. № 35 (273). С. 49-53.

5. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гатина Р.З., Гафуров Н.М. ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(9-10):21-31. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31>

6. Алдошин С.М. Глубокая переработка углеводородных ресурсов / Материалы XIV научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса» / Под редакцией А.В. Назарова и Б.П. Туманяна – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021. 174 с.

7. Федоров Б. Г. Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования. 2014. № 1(142). С. 63-78.

8. Глаголева О. Ф., Пискунов И. В // Энергосбережение - приоритетная задача современной нефтегазопереработки // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2021. № 1(109). С. 32-35.

9. Рейшахрит Е. И. Особенности управления энергоэффективностью на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 490-497.

10. Альфа Лаваль в России / Теплообменники со сварным пакетом пластин и разборным корпусом / Примеры проектов / Нефтепереработка / Comproblocs recover energy at Canadian refinery.pdf. – URL: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/local/russia/ptd/ppi00070ru-_shell_case-story.pdf (дата обращения: 25.05.2021)

11. Глаголева О. Ф., Капустин В. М. Физико-химические аспекты технологии первичной переработки нефти (обзор) // Нефтехимия. 2018. Т. 58. № 1. С. 3-10. DOI 10.7868/S002824211801001X.

12. Рогалев М.С. Описание, анализ технологической схемы и пуска наладочных работ установки ЭЛОУ-АТ Антипинского нефтеперерабатывающего завода // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2007. №4. С. 81-85.

13. Сетин С.П. Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти: дис. канд. тех. наук: 05.13.01/ Сергей Петрович. Самара, 2016. 203 с.

14. Миркин А. З., Яицких Г.С., Сюняева Г.С., Яицких В. Г. Снижение энергопотребления на НПЗ. Oil&Gas Journal Russia, № 5 (83), май, 2014 г., стр. 40–43.

15. Lebedev V.A. Exergy pinch analysis of a furnace in a primary oil refining unit/ V.A. Lebedev, E.A. Yushkova, I. S. Churkin // E3S Web of Conferences (TPACSEE 2019). 2019. Vol. 124. p. 00001.

16. Патент № 2767243 С1 Российская Федерация, МПК C10G 7/00, B01D 3/14. Энергоэффективная линия нагрева сырья на технологической установке ЭЛОУ-АВТ: № 2021122649 : заявл. 29.07.2021; опубл. 17.03.2022 / М. В. Канищев, Р. Е. Чибисов, М. А. Васильев, Л.М. Ульев; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "РусЭнергоПроект".

17. Шелгинский А.Я. Разработка энергосберегающих и экологически прогрессивных направлений производства минеральных удобрений на основе высокоэффективных тепловых схем и интенсификации тепломассообмена: Диссертация д-ра техн. наук. М., 1997. – 278 с.

18. Котляров Д. А. Оценка экологического эффекта развития альтернативной энергетики на территории Дальневосточного федерального округа // Заметки ученого. 2022. № 1-1. С. 290-298.

19. Габдракипов И.А., Липенко А. И., Бабич А. Н., и др. Моделирование процесса атмосферной перегонки нефти в среде HYSYS // Наука и образование: сохраняя прошлое, создаём будущее: Сборник статей XXVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Пенза, 10 июня 2020 года. Пенза: "Наука и Просвещение" 2020. С. 29-32.

Авторы публикации

Федюхин Александр Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Промышленных теплоэнергетических систем, Московский энергетический институт.

Звончевский Александр Геннадьевич – студент, Московский энергетический институт.

References

1. Golysheva E.A., Zhdaneev O.V., Korenev V.V., et al. Petrochemical industry in Russia: analysis of the current state and development prospects. *Journal of Applied Chemistry*. 2020. V. 93. No. 10. S. 1499–1507. URL: <https://doi.org/10.31857/S0044461820100126>
2. Zhdaneev O.V., Korenev V.V., Rubtsov A.S. On priority directions and development of oil refining technologies in Russia (review). *Journal of Applied Chemistry*. 2020. V. 93. Issue. 9. S. 1263–1274.
3. Gruntovich N.V., Shenets E.L. INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF CONSUMPTION OF FUEL AND ENERGY RESOURCES OF THE ENTERPRISE IN THE INTRODUCTION OF ENERGY SAVING MEASURES. *Energy. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2014;(2):58-66.
4. Khanilo D.A. Analysis of the current state and problems of functioning of enterprises of the oil refining and petrochemical complexes at the present stage. *Young scientist*. 2019. No. 35 (273). pp. 49-53.
5. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gatina R.Z., Gafurov N.M. POSSIBLE WAYS TO REDUCE CARBON DIOXIDE EMISSIONS. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2017;19(9-10):21-31. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-21-31>
6. Aldoshin S.M. *Deep processing of hydrocarbon resources*. Proceedings of the XIV scientific-practical conference "Actual tasks of the petrochemical complex" / Edited by A.V. Nazarov and B.P. Tumanyan. M.: Publishing Center of the Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkina, 2021. 174 p.
7. Fedorov B.G. Carbon dioxide emissions: the carbon balance of Russia. *Problems of Forecasting*. 2014. No. 1(142). pp. 63-78.
8. Glagoleva O.F., Piskunov I. V. Energy saving is a priority task of modern oil and gas processing. *Business magazine Neftegaz.RU*. 2021. No. 1(109). pp. 32-35.
9. Reishahrit E I. *Features of energy efficiency management at oil refining enterprises*. *Zapiski Gornogo instituta*. 2016. V. 219. S. 490-497.
10. Alfa Laval Russia / Welded plate heat exchangers with demountable shells / Case studies. *Oil refining*. *Compablocs recover energy at Canadian refinery.pdf*. – URL: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/local/russia/ptd/ppi00070ru-_shell_case-story.pdf (Accessed 25.05.2021)
11. Glagoleva O.F., Kapustin V. M. Physico-chemical aspects of primary oil refining technology (review). *Petrochemistry*. 2018. V.58. No.1. S.3-10. DOI 10.7868/S002824211801001X.
12. Rogalev M.S. Description, analysis of the technological scheme and commissioning of the ELOU-AT installation of the Antipinsky Oil Refiner. *Izvestiya of higher educational institutions. Oil and gas*. 2007. No. 4. pp. 81-85.
13. Setin S.P. System analysis and management of primary oil refining processes: Cand. cand. those. Sciences: 05.13.01/ Sergey Petrovich. Samara, 2016. 203 p.
14. Mirkin A.Z., Yaitskikh G.S., Sunyaeva G.S., Yaitskikh V.G. Reducing energy consumption at refineries. *Oil&Gas Journal Russia*, No. 5 (83), May 2014, pp. 40–43.
15. Lebedev V.A. *Exergy pinch analysis of a furnace in a primary oil refining unit*/ V.A. Lebedev, E.A. Yushkova, I. S. Churkin. E3S Web of Conferences (TPACEE 2019). 2019 Vol. 124.p. 00001.
16. Patent No. 2767243 C1 Russian Federation, IPC C10G 7/00, B01D 3/14. *Energy-efficient raw material heating line at the ELOU-AVT process plant*: No. 2021122649: Appl. 07/29/2021: publ. March 17, 2022 / M. V. Kanishchev, R. E. Chibisov, M. A. Vasiliev, L. M. Ulyev; applicant Limited Liability Company "RusEnergoproekt".
17. Shelginsky A.Y. *Development of energy-saving and environmentally progressive directions of production of mineral fertilizers based on highly efficient thermal schemes and intensification of heat and mass transfer*: Dissertation of Doctor of Technical Sciences. M., 1997. 278 p.

18. Kotlyarov D. A. Evaluation of the ecological effect of the development of alternative energy in the territory of the Far Eastern Federal District. *Notes of a scientist*. 2022. No. 1-1. pp. 290-298.

19. Gabdrakipov I.A., Lipenko A.I., Babich A.N., et al. Modeling the process of atmospheric distillation of oil in the HYSYS environment. *Science and education: preserving the past, creating the future*: Collection of articles of the XXVIII International Scientific and Practical Conference. In 2 parts, Penza, June 10, 2020. Penza: "Science and Education" 2020. S. 29-32.

Authors of the publication

Alexander V. Fedyukhin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Zvonchevsky Alexander Gennadievich – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Получено *02.05.2022г.*

Отредактировано *02.05.2022г.*

Принято *16.05.2022г.*



КВАЗИГОРЯЧЕЕ РАСПЫЛЕНИЕ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ С ДОБАВКАМИ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

Гвоздяков^{1,2,3} Д.В., Зенков^{1,3} А.В., Лавриненко¹ С.В., Матвеева¹ А.А.

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово, Россия

³НИТУ МИСиС, г. Москва, Россия

dim2003@trn.ru

Резюме: Актуальность работы обусловлена отсутствием в литературе результатов исследований влияния нагрева многокомпонентных водоугольных суспензий на реологические свойства и характеристики распыления. **ЦЕЛЬ.** Обоснование эффективности термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований. **МЕТОДЫ.** При решении поставленной задачи применялись ротационный вискозиметр Brookfield RVDV-II+Pro, ареометры общего назначения, метод Interferometric Particle Imaging. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Установлено, что при замещении воды в составе водоугольного топлива аналогичным по массе (не более 25%) количеством пирогенетической жидкости значение плотности суспензии увеличится на 14% при температуре 293 К. Предварительный нагрев водоугольных суспензий до 363 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%. Результаты экспериментов показали, что наибольшее влияние термической подготовки исследованных суспензий на их динамическую вязкость характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20%. Предварительный нагрев суспензий перед распылением в диапазоне изменения температур от 293 до 333 К позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом при температуре 293 К. Замещение более 25% по массе воды пирогенетической жидкостью в составе водоугольного топлива нецелесообразно для исследовавшейся марки угля с точки зрения значительного увеличения вязкости. Предварительный нагрев водоугольного топлива перед распылением позволяет снизить значение среднего размера капель на 5-9%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Обоснована эффективность термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований реологических свойств и характеристик распыления.

Ключевые слова: бурый уголь; пирогенетическая жидкость; водоугольное топливо; термическая подготовка; вязкость; распыление.

Для цитирования: Гвоздяков Д.В., Зенков А.В., Лавриненко С.В., Матвеева А.А. Квазигорячее распыление водоугольных суспензий с добавками пирогенетической жидкости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 28-41. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-28-41.

Благодарности: эксперименты по определению реологических свойств водоугольных топлив проводились при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №075-00268-20-02 (ID: 0718-2020-0040)), исследования характеристик распыления водоугольных топлив выполнены при финансовой поддержке в соответствии с дополнительным контрактом № 075-03-2021-138/3 о субсидии из федерального бюджета Российской Федерации на финансовую поддержку реализации государственного задания для государственных услуг (внутренний номер 075-GZ/X4141/687/3).

QUASI-HOT SPRAYING OF COAL-WATER SLURRIES WITH PYROGENETIC WATER ADDITIVES

DV. Gvozdyakov^{1,2,3}, AV. Zenkov^{1,3}, SV. Lavrinenko¹, AA. Matveeva¹

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

² Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

³ National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

dim2003@tpu.ru

Abstract: The relevance of the work is explained by the absence of the results of the heating effect of multicomponent coal-water slurries on rheological properties and characteristics of spraying in the literature. **PURPOSE.** Efficiency substantiation of thermal preparation of coal-water slurries based on pyrogenetic liquid by the results of experimental studies. **METHODS.** When solving this problem, the Brookfield RVDV-II+Pro rotary viscometer, general-purpose hydrometers, and the Interferometric Particle Imaging method were used. **RESULTS.** It was found that when water in coal-water fuel is replaced by a similar amount of pyrogenetic liquid (no more than 25%), the density of the slurry increases by 14% at a temperature of 293 K. Preheating of coal-water slurries to 363 K reduces the increase in the density value to 7%. The experimental results showed that the greatest influence of the thermal preparation of the studied slurries on their dynamic viscosity is characteristic of the temperature range from 293 to 333 K. At such temperatures, a decrease in the viscosity of the fuel is possible by 17-20%. Preheating of slurries before spraying in the temperature range from 293 to 333 K makes it possible to increase jet spraying angle by 21-29% in comparison with two-component coal-water fuel at a temperature of 293 K. Substitution of more than 25% by weight of water with pyrogenetic liquid in coal-water fuel is impractical for the studied grade of coal from the point of view of a significant increase in viscosity. Preheating coal-water fuel before spraying reduces the average droplet size by 5-9%. **CONCLUSION.** The efficiency of thermal preparation of coal-water slurries based on pyrogenetic liquid by the results of experimental studies of rheological properties and spraying characteristics was substantiated.

Keywords: lignite; pyrogenetic liquid; coal-water fuel; thermal preparation; viscosity; spraying.

For citation: Gvozdyakov DV, Zenkov AV, Lavrinenko SV, Matveeva AA. Quasi-hot spraying of coal-water slurries with pyrogenetic water additives. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3):28-41. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-28-41.

Acknowledgments: experiments to determine the rheological properties of coal-water fuels were performed with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-00268-20-02 (ID: 0718-2020-0040)), studies of the characteristics of coal-water fuels spraying were carried out with financial support in accordance with the supplementary contract No. 075-03-2021-138/3 on subsidy from the federal budget of the Russian Federation for financial support of the implementation of the state task for public services (internal number 075-GZ/X4141/687/3).

Введение

Водоугольные суспензии (ВУС) являются перспективными топливами для промышленной энергетики [1, 2]. С точки зрения экономики, в качестве компонентов ВУС можно использовать, например, отходы угольнообогатительных фабрик [3]. Авторы Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K. и др. [4] добавляли отработанные нефтепродукты в состав суспензионного топлива. В работе авторов Zhao Z., Wang R., Ge L. и др. [5] описывается способ утилизации сточных вод в составе ВУС. Жидкие отходы химических производств также могут быть утилизированы путем сжигания в составе жидких композиционных топлив [6]. Широкий спектр компонентов ВУС позволяет снизить ее стоимость и стоимость производимой энергии в сравнении с традиционными топливами – уголь, газ, мазут. Несмотря на то, что теплотворная способность ВУС в среднем в два раза ниже, чем у угля, введение в состав суспензии отработанных нефтепродуктов или отходов химических производств позволяет существенно увеличить калорийность топлива [7]. Еще одним преимуществом водоугольных топлив (ВУТ) являются низкие, в сравнении с углем, объемы эмиссии в атмосферу продуктов сгорания [8], наносящих вред окружающей среде. Такие положительные качества новых перспективных топлив промышленной энергетики являются основанием для их всестороннего изучения. В работе авторов Chen R., Wilson M., Leong Y.K. и др. [9] исследовались водоугольные суспензии на основе разных типов угля с точки зрения реологических свойств, а именно вязкости и предела текучести. В работе Барановой М.П. [10] оценивалось влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма. Авторы Мингалеева Г.Р., Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. [11] проводили сравнительный анализ способов снижения вязкости водоугольных топлив. В указанных выше работах установлено, что при использовании низкосортных углей

невозможно добиться высокого содержания твердой фазы в суспензии без дополнительной обработки, например, термической.

Известны исследования зажигания капель ВУС [12], которые показали, что введение в состав топлива дополнительных компонентов, например, отходов нефтепереработки, значительно снижает время задержки зажигания.

Существуют работы по изучению концентрации вредных выбросов в атмосферу после сжигания суспензионных топлив [13, 14]. Установлено, что замещение части угля водой, введение пара, добавление биомассы, регулировка температуры горения приводят к снижению выбросов антропогенных газов (CO_2 , SO_2 , NO).

В работе авторов Ma X., Duan Y., Liu M. [15] изучалось качество распыления суспензионного топлива в зависимости от давления воздуха, отношения расхода воздуха к расходу топлива, диаметра устья форсунки. Установлено, что увеличение давления воздуха приводит к улучшению качества распыления. При этом геометрические параметры форсунки также играют важную роль при распылении суспензионных топлив. Это также подтверждается исследователями [16].

Проведенные нами ранее исследования [17, 18] показали, что добавление в состав ВУТ жидких горючих компонентов, таких как отработанные нефтепродукты или спирты, приводит к значительному изменению характеристик распыления.

Как отмечалось выше, в качестве компонентов ВУС используется достаточно широкий спектр материалов. Однако, современными исследователями не изучается влияние пирогенетической жидкости (ПЖ) на свойства и характеристики ВУТ. Это вещество является отходом пиролизных процессов, в частности, при производстве древесного угля [19, 20]. Последний достаточно широко используется в качестве топлива для котлов малой и средней мощности. Древесный уголь, как правило, изготавливают из прессованных опилок или щепы. Образующаяся в процессе пиролиза древесины, ПЖ содержит в себе различные соединения фенолов и кислот, поэтому ее прямая утилизация в систему канализации запрещена. При этом жидкость обладает калорийностью примерно 1-4 МДж/кг в зависимости от технологических условий процесса пиролиза. Одним из вариантов ее утилизации является сжигание путем подмешивания к жидким топливам, например, мазуту или ВУТ.

Однако, предложенный авторами статьи компонент ВУС – ПЖ – обладает значением вязкости в 2-2,5 раза больше, чем у обычной воды. Соответственно, замещая часть обычной воды на ПЖ, вязкость новой суспензии увеличится. В результате чего ухудшатся характеристики распыления ВУТ и, соответственно, зажигания их капель в камерах сгорания. На практике, чтобы снизить вязкость и улучшить характеристики распыления котельного топлива, например, мазута, осуществляют его нагрев до 353-393 К. Это позволяет получить мелкодисперсную струю и сократить затраты на его перекачивание по топливному тракту.

Научная значимость работы заключается в том, что результаты экспериментальных исследований влияния подогрева ВУС, содержащих ПЖ, перед распылением позволяют оценить эффективность такой подготовки топлива на свойства и характеристики диспергирования в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом. Также, это даст возможность установить диапазоны изменения температур нагрева ВУС, при которых реологические свойства и характеристики распыления топлив уже не зависят от температуры.

Практическая значимость состоит в том, что в реальных условиях полученные данные позволят осуществлять эффективную термическую подготовку ВУС перед сжиганием и рационально использовать энергию собственных нужд станции.

Проведение экспериментальных исследований влияния термической подготовки ВУС на реологические свойства и характеристики ее распыления необходимо с точки зрения развития технологий ВУС и расширения научной информационной базы. Полученные результаты будут полезны при проектировании новых или модернизации действующих котельных агрегатов.

Таким образом, целью работы является обоснование эффективности термической подготовки водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости по результатам экспериментальных исследований влияния нагрева на реологические свойства и характеристики распыления таких топлив.

Материалы и методы

Компоненты исследованных водоугольных топлив:

бурый уголь (марки 2Б Канско-Ачинского угольного бассейна) – зольность 8,0%, влажность 9,0%, выход летучих 42,5%, количество углерода 72,1% daf, количество водорода 5,8% daf, общая доля кислорода, азота и серы 22,1% daf;

пирогенетическая жидкость – плотность 1044,0 кг/м³, динамическая вязкость 2,24 мПа·с, кинематическая вязкость 2,12 мм²/с, рН 2,31;

водопроводная вода - плотность 997,0 кг/м³, динамическая вязкость 0,98 мПа·с, рН 6,8.

Подготовка бурого угля состояла из нескольких стадий: дробление крупнокускового угля в щековой дробилке до фракции характерным размером не более 30-40 мм; тонкий помол в дезинтеграторе до фракции характерным размером не более 2 мм; просеивание через вибрационные сита до размера фракции не более 200 мкм.

Пирогенетическая жидкость получена в процессе пиролиза древесных отходов (стружка, щепа, ветки).

Водопроводная вода бралась из системы водоснабжения.

Процесс приготовления ВУС: измельченный уголь, пирогенетическая вода и водопроводная вода в соответствии с компонентным составом (таблица 1) помещались в барабан, изготовленный из керамики, общим объемом 3 л с предварительно загруженными мелющими телами (керамические шары диаметром 30 мм). Массовое соотношение шаров с углем составляло 1:1. Далее в течение одного часа осуществлялось перемешивание суспензии до гомогенного состояния.

Таблица 1

Водоугольные суспензии

Состав, №	Бурый уголь (БУ)	Водопроводная вода (В)	Пирогенетическая жидкость (ПЖ)	Обозначение
1	50	50	0	Образец 1
2		45	5	Образец 2
3		40	10	Образец 3
4		35	15	Образец 4
5		30	20	Образец 5
6		25	25	Образец 6

Экспериментальные значения динамической вязкости определены при помощи ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II+Pro. Жидкость объемом 500 мл наливалось в стеклянный цилиндрический сосуд диаметром 0,1 м, после чего шпindel вискозиметра погружался в исследуемую среду.

Экспериментальное определение значений плотности осуществлялось при помощи ареометров общего назначения.

Погрешность измерений вязкости и плотности ВУС с учетом величины погрешности средств измерения и числа экспериментов (не менее 5):

- для вязкости – не более ±3,5%;
- для плотности – не более ±3,0%.

Экспериментальные исследования характеристик распыления ВУТ выполнены на специализированном стенде (рис. 1). Установка предназначена для изучения характеристик струи жидких и сухих топлив после распыления, исследования форсунок энергетических установок.

Эксперименты по распылению ВУС проведены при давлении топлива (P_m) 0,3 МПа и воздуха (P_a) 0,28 МПа. Давление последнего задавалось на 0,02 МПа меньше, чем ВУТ, чтобы исключить обратное течение жидкости по топливному трубопроводу. При проведении экспериментов использовалась форсунка с внутренним смешением топлива и распыляющего агента. Такие форсунки хорошо зарекомендовали себя при распылении вязких суспензий [21]. Выбранные значения давлений характерны для полномасштабных энергетических установок, работающих на жидком топливе [22]. Продолжительность каждого эксперимента составила от 100 до 120 с.

Принципиальная схема распыления горячей ВУС представлена на рисунке 2. Нагрев воздуха для подачи на насос и форсунку осуществлялся при помощи поверхностного теплообменника (ПТО) трубчатого типа. ПТО представляет собой емкость объемом 10 л и змеевик, изготовленный из меди. Наружный диаметр теплообменной трубы – 10 мм. Толщина стенки трубки – 1 мм. Площадь поверхности теплообмена составила 0,2 м². В качестве греющей среды использовалась кипящая вода. Холодный воздух под давлением подавался из компрессора на ПТО, после чего нагретый до необходимой температуры воздух направлялся на коллектор и распределялся на два потока: на насос и на форсунку. ВУС подогревалась на индукционной печи до необходимой температуры. Все трубопроводы и насос покрыты теплоизоляционным материалом на основе полиэтилена толщиной 10 мм. Перед проведением экспериментов вся система «насос-трубопроводы-форсунка» прогревалась с целью исключить теплопотери при распылении ВУС. Перед распылением непосредственно ВУС,

исследованные составы нагревались на 5 К выше значения требуемой температуры. Это необходимо для того, чтобы, несмотря на теплоизоляцию всего тракта топливоподачи, непосредственно в сопловом канале форсунки температура суспензии была не меньше требуемого значения.



Рис. 1. Исследовательский стенд: 1 – внешний вид; 2 – насос для подачи ВУТ; 3 – форсунка; 4 – линия подачи ВУТ; 5 – линия подачи распыляющего агента; 6 – лазер (Beamtech Vlite-200); 7 – кросскорреляционная камера (ImperX Bobcat B2020); 8 – емкость временного хранения отработанного ВУТ; 9 – направляющая крепления форсунки; 10 – емкость для ВУТ; 11 – вытяжная вентиляция; 12 – компьютер и дублирующий монитор; 13 – регулятор давления воздуха; 14 – поверхностный теплообменник; 15 – манометр; 16 – термометр для измерения температуры воздуха; 17 – термометр для измерения температуры ВУТ.

Fig. 1. Research setup 1 – appearance; 2 – CWF feed pump; 3 – nozzle; 4 – CWF feed line; 5 – air feed line; 6 – laser (Beamtech Vlite-200); 7 – cross-correlation camera (ImperX Bobcat B2020); 8 – temporary storage of waste CWF; 9 – nozzle holder; 10 – CWF tank; 11 – exhaust ventilation; 12 – computer and backup monitor; 13 – air pressure regulator; 14 – surface heat exchanger; 15 – pressure gauge; 16 – thermometer for measuring air temperature; 17 – thermometer for measuring CWF temperature.

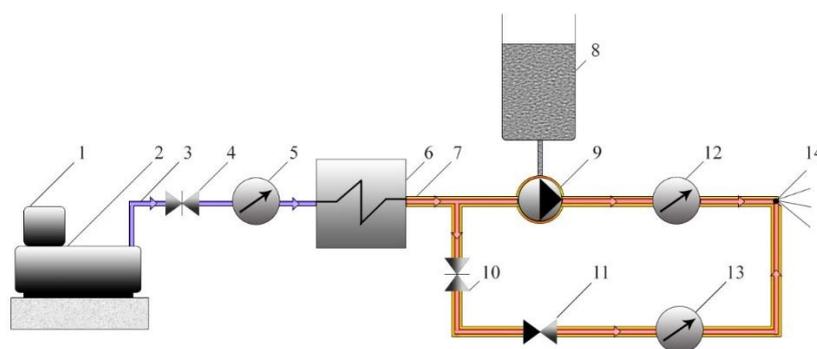


Рис. 2. Принципиальная схема 1 – воздушный компрессор; 2 – ресивер-накопитель воздуха; 3 – трубопровод холодного воздуха; 4 – регулятор давления воздуха; 5 – манометр; 6 – теплообменник; 7 – трубопровод горячего воздуха; 8 – бак запаса ВУС; 9 – пневматический насос; 10 – регулятор расхода горячего воздуха; 11 – обратный клапан (необходим для того, чтобы исключить течение жидкости в систему регулирования распределения воздуха мембранного насоса); 12 – термометр для контроля температуры ВУС; 13 – термометр для контроля температуры воздуха; 14 – форсунка.

Fig. 2. Schematic diagram: 1 – air compressor; 2 – air storage receiver; 3 – cold air pipeline; 4 – air pressure regulator; 5 – pressure gauge; 6 – heat exchanger; 7 – hot air pipeline; 8 – CWS tank; 9 – air pump; 10 – hot air flow regulator; 11 – reverse-flow valve (necessary in order to exclude the flow of liquid into the air distribution control system of the diaphragm pump); 12 – thermometer for CWS temperature control; 13 – thermometer for air temperature control; 14 – nozzle.

Нагрев суспензий и воздуха осуществлялся в диапазоне изменения температур от 293 К до 363 К с шагом 10 К. Температура нагретого воздуха и топлива измерялась непосредственно перед форсункой.

Размер каплей определялся при помощи метода *IPI (Interferometric Particle Imaging)* [23-25]. Метод применяется для измерения мгновенных пространственных распределений размеров (от 10 до 1000 мкм) каплей в потоке. Основан на восстановлении размеров каплей по частоте интерференционной картины от точечных источников света, возникающих на сферических каплях жидкости при освещении их мощным лазерным импульсом (лазерный нож). Значения диаметров каплей вычислялись в программе *ActualFlow* [23-25].

Значение угла раскрытия струи определялось стандартным методом [26]. При обработке изображений струи (не менее 20 фотографий для каждого состава) аппроксимировались ее края, после чего проводились две ортогональные линии к продольной оси сопла. Суммируя значения двух половин угла (θ_1 и θ_2) получали угол раскрытия струи θ . Таким образом, угол определяли по 20 снимкам для каждого состава и находили среднее значение. Полученное число принимали за угол раскрытия струи $\bar{\theta}$.

Результаты и обсуждение

Реологические свойства жидкостей оказывают существенное влияние на характеристики распыления. От изменения плотности или вязкости, как правило, зависит размер каплей после распыления, их количество, дальность струи и т.д. Например, авторами [27] установлено, что эффективное распыление суспензий возможно при значениях вязкости не более 1,2 Па·с при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с^{-1} . Также известно, что жидкости с низкими значениями вязкости лучше подвержены диспергированию в среде воздуха (или окислителя в условиях высоких температур). Плотность распыляемой жидкости также оказывает влияние на характеристики распыления [28].

На рисунке 3 показаны зависимости изменения плотности ВУС от количества ПЖ и температуры. Установлено, что при замещении воды в составе ВУС аналогичным по массе (25%) количеством ПЖ значение плотности суспензии увеличится на 14% при температуре жидкости 293 К. Нагрев такой ВУС до 373 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%. Относительно небольшие по массе добавки ПЖ в состав ВУТ способствуют небольшому росту плотности суспензии в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом – не более 6%.

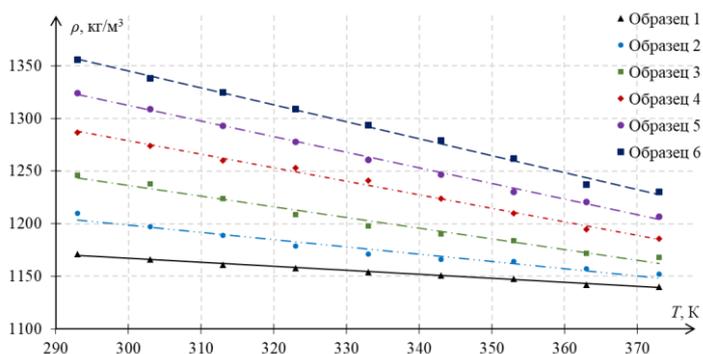


Рис. 3. Изменение плотности ВУС при нагрев

Fig. 3. Change in the density of CWS due to heating

Анализ результатов исследований влияния термической подготовки ВУС в составе с ПЖ показал достаточно типичные для суспензий и эмульсий изменения их плотности. Даже незначительные (от 3 до 14%) изменения плотности суспензии окажут влияние на характер разрушения каплей при распылении [29, 30]. В первую очередь на стадию первичного дробления. Таким образом, предварительный нагрев ВУС в составе с ПЖ окажет положительный эффект на процесс диспергирования суспензии.

Результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 4, показывают снижение вязкости ВУС в составе с ПЖ при их нагреве. Качественно, полученные результаты достаточно хорошо согласуются с известными данными, например [31]. На рисунках 4а-4е серым цветом выделены области, соответствующие изменениям значений динамической вязкости ВУС при температурах от 293 до 363 К. С целью установления наиболее приемлемых для распыления суспензий на графиках также представлены зависимости изменения динамической вязкости ВУС при скорости сдвига шпинделя вискозиметра 100 с^{-1} от температуры (зависимости, обозначенные зеленым цветом). По результатам экспериментов установлено, что существенные изменения вязкости суспензий характерны при их нагреве до 333 К. При более высоких температурах (от 333 до 363 К) динамическая вязкость ВУС изменяется незначительно. Такое изменение

вязкости достаточно характерно для суспензионных и эмульсионных жидкостей и различных скоростей сдвига шпинделя вискозиметра.

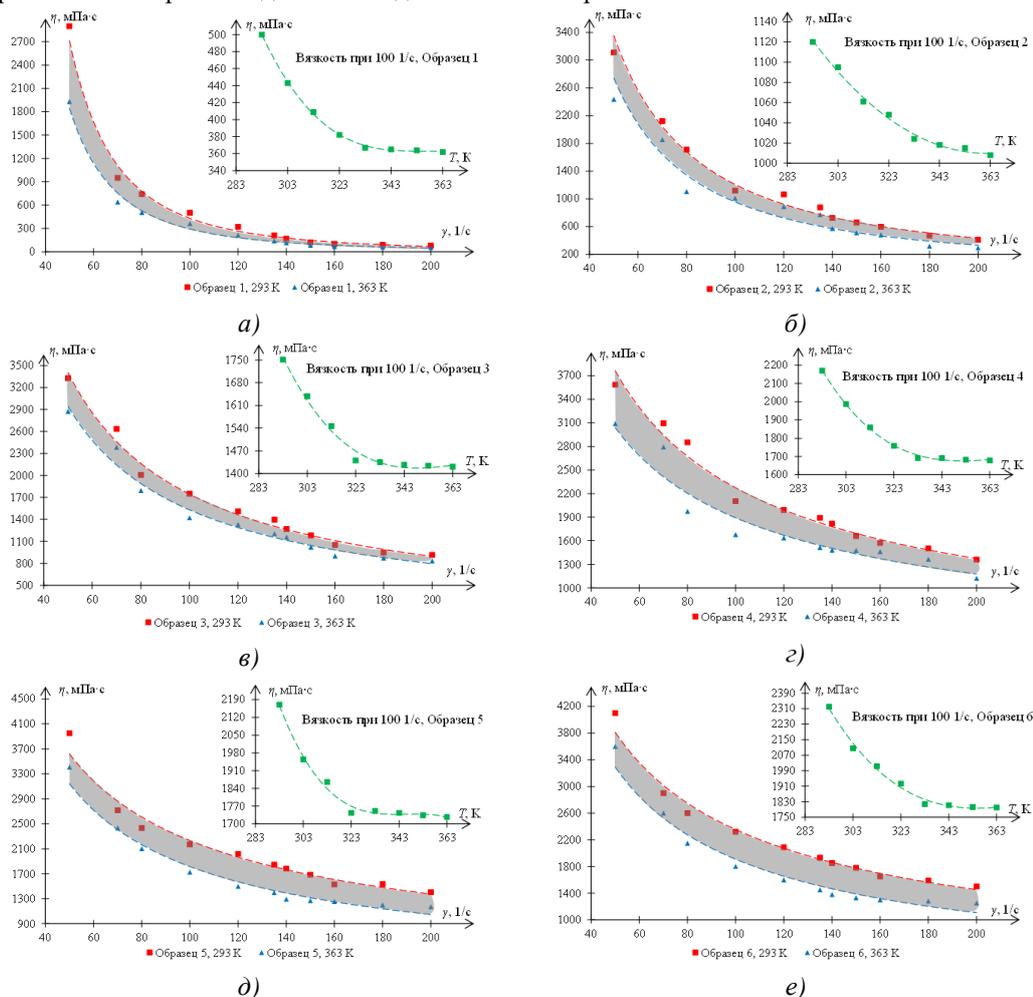


Рис. 4. Изменение динамической вязкости ВУС при нагреве.

Fig. 4. Change in the dynamic viscosity of CWS due to heating.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что наибольшее влияние термической подготовки исследовавшихся суспензий на изменение их динамической вязкости характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20% в сравнении с двухкомпонентным водоугольным топливом. Незначительное (не более 6%) снижение вязкости характерно при нагреве ВУС выше 333 К. Такое изменение можно объяснить тем, что ВУС – это многокомпонентная жидкость. Причем один из ее компонентов является твердым веществом. В свою очередь ПЖ является существенно неоднородной жидкостью, так как в ее составе присутствуют масляные агломераты. В таком случае, термическая подготовка ВУС в диапазоне температур от 293 до 333 К перед распылением является достаточно эффективной. Такой подход окажет положительное влияние на характеристики распыления ВУС (средний размер капель, угол раскрытия струи).

С учетом результатов исследований влияния термической подготовки ВУС на ее реологические свойства, эксперименты по изучению угла раскрытия струи и среднего размера капель выполнены в диапазоне изменения температуры топлива от 293 до 333 К. Представленные на рисунке 5 снимки иллюстрируют характер изменения угла раскрытия струи, который является важным параметром при распылении жидких материалов. Его величина определяет границы зоны воспламенения топлива, эффективность процесса его горения и, как следствие, полноту сгорания после распыления.

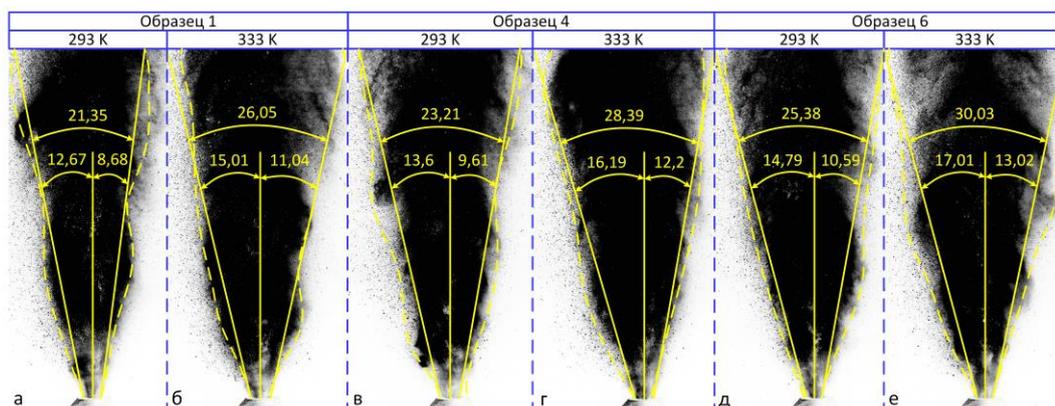


Рис. 5. Угол раскрытия струи

Fig. 5. Jet spraying angle

Анализируя результаты экспериментов, установлено положительное влияние термической подготовки ВУС на угол раскрытия струи. Несмотря на наличие и рост концентрации ПЖ в составе суспензии, угол раскрытия увеличивается в сравнении с холодным распылением (при температуре топлива 293 К). Введение в состав ВУТ до 25% по массе ПЖ при температуре 293 К является причиной увеличения угла раскрытия струи на 16%. В целом, влияние количества ПЖ в составе топлива и нагрева суспензии до 333 К на изменение угла раскрытия в сравнении с Образцом 1 выглядит следующим образом:

- Для Образца 2 увеличение угла раскрытия струи составляет 21%;
- Для Образца 3 увеличение угла раскрытия струи составляет 22%;
- Для Образца 4 увеличение угла раскрытия струи составляет 25%;
- Для Образца 5 увеличение угла раскрытия струи составляет 27%;
- Для Образца 6 увеличение угла раскрытия струи составляет 29%.

Такое влияние термической подготовки ВУТ на угол раскрытия струи объясняется в первую очередь снижением вязкости топлива, в результате чего образуется больше капель малых размеров. Их траектории при распылении ориентированы более хаотично. Такое изменение угла раскрытия струи характерно для распыления горячих жидкостей [32]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что термическая подготовка (нагрев до 333 К) водоугольных суспензий в составе с ПЖ позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с обычным двухкомпонентным ВУТ при температуре 293 К.

На рисунке 6 представлена область регистрации капель ВУС с целью определения их среднего характерного размера. При проведении экспериментов область регистрации струи разделялась на три зоны. На изображениях хорошо различимы крупные (диаметром ~ 1 мм) капли (агломераты) ВУС в зоне 1. Наличие таких фрагментов близко к устью форсунки объясняется тем, что в данной области еще не все крупные капли топлива подверглись разрушению. Такое поведение отдельных капель характерно для водоугольных суспензий [33].

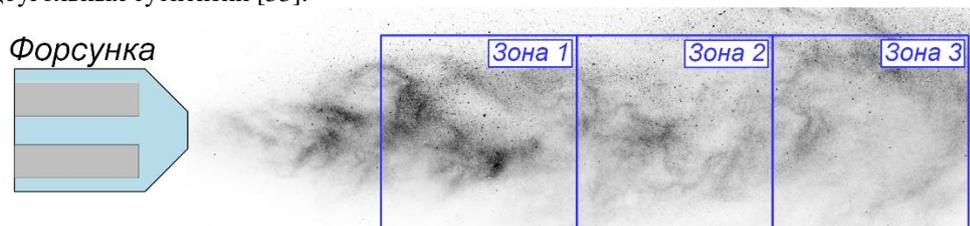


Рис. 6. Области струи для определения размера капель ВУС

Fig. 6. Areas of the jet for determining the size of the droplets in the air

Влияние ПЖ и температуры на изменение среднего размера капель ВУС в областях исследования представлено на рисунке 7 в виде гистограмм. Анализ результатов показал, что добавка ПЖ в состав ВУС и термическая подготовка суспензии приводят к заметному изменению среднего размера капель топлива в струе. Введение в состав ВУТ до 25% по массе ПЖ при температуре 293 К является причиной увеличения среднего размера капель топлива в струе в среднем на 8%. Это объясняется ростом вязкости ВУС. Экспериментальные исследования показали, что нагрев двухкомпонентного водоугольного топлива (Образец 1) до 333 К приводит к снижению среднего размера капель в трех характерных областях – Зона 1, Зона 2 и Зона 3 – на 5, 6 и 5%,

соответственно. Снижение среднего размера капель после распыления Образца 4 в результате нагрева до 333 К составляет 9%, а Образца 6 – 8%.

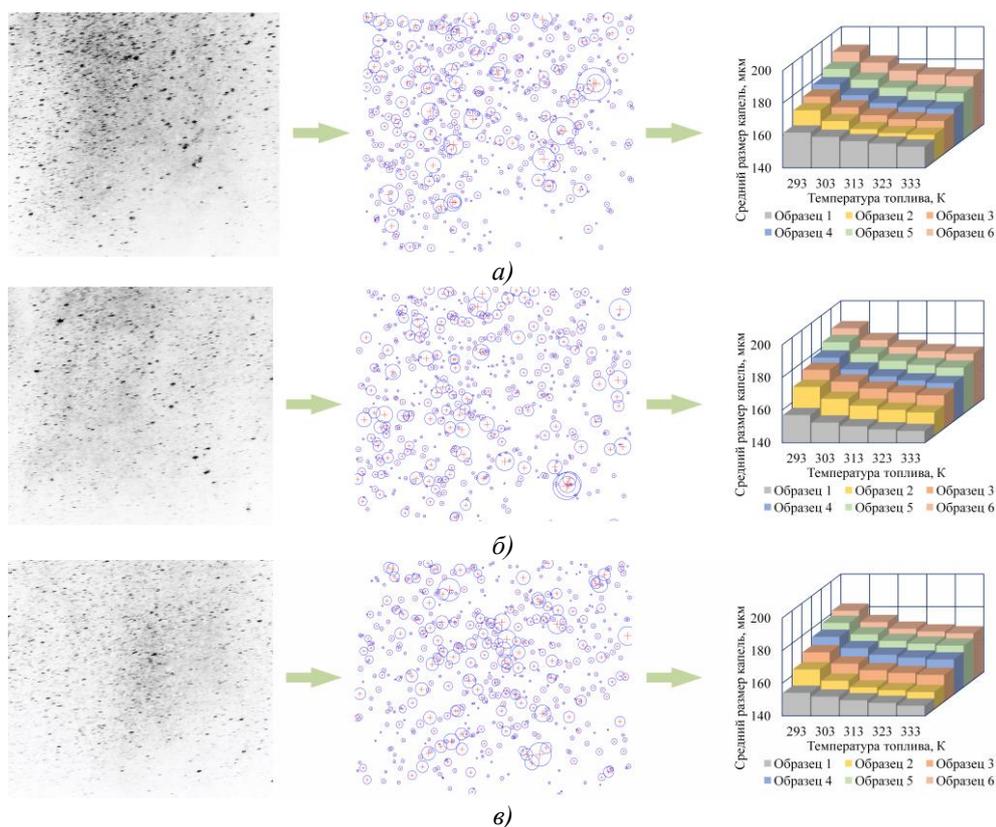


Рис. 7. Определение среднего размера капель ВУС в струе *Fig. 7. Determination of the average size of CWS droplets in the jet*

По результатам исследований влияния ПЖ в составе ВУТ и термической подготовки суспензии на изменение среднего размера капель топлива после распыления можно сделать несколько выводов. Во-первых, по результатам предварительных экспериментов установлено, что добавление более 25% по массе ПЖ в состав ВУТ нецелесообразно (с исследовавшейся маркой угля). Вязкость суспензии сильно увеличивается, что является существенным ограничением с точки зрения процесса распыления. Во-вторых, в исследованном диапазоне изменения концентрации ПЖ в составе ВУТ увеличение среднего размера капель топлива составляет около 8%. Предварительный нагрев ВУС перед распылением позволяет существенно снизить значение среднего размера капель суспензии. Изменения составляют 5-9% в сравнении с холодной (при 293 К) ВУС.

Анализ результатов немногочисленных исследований [34, 35] по распылению водоугольных топлив иллюстрирует достаточно широкий диапазон изменения анализируемых параметров. В первую очередь это связано с тем, что исследователи [34, 35] при проведении своих экспериментов используют форсунки различной конструкции. При этом значение параметров распыления также очень сильно отличается. Таким образом, сравнивать результаты (размер капель, угол раскрытия струи) настоящей работы с известными не совсем корректно.

В целом, по результатам проведенных экспериментальных исследований квазигорячего распыления водоугольных суспензий в составе с пирогенетической жидкостью можно сделать вывод об эффективности предварительной термической подготовки таких топлив перед их распылением. Значительно снижается негативное воздействие пирогенетической жидкости в составе водоугольных суспензий на их реологические свойства и характеристики распыления. Установленный наиболее эффективный температурный диапазон нагрева суспензии позволяет сделать вывод о том, что, реализуя данный способ на практике, можно существенно сократить тепловое загрязнение окружающей среды используя в качестве источника тепловой энергии тепло дымовых газов. При введении в состав водоугольного топлива ПЖ также решается вопрос ее утилизации. При этом наличие хоть и малой теплотворной способности

пирогенетической воды позволяет решить проблему низкой реакционной способности водоугольных топлив – сократить время задержки их зажигания.

Выводы

По результатам проведенных экспериментальных исследований реологических свойств и характеристик распыления водоугольных суспензий на основе пирогенетической жидкости дано обоснование эффективности термической подготовки таких топлив и сформулированы следующие выводы.

1) При замещении воды в составе ВУС аналогичным по массе (не более 25%) количеством ПЖ значение плотности суспензии увеличивается на 14% при температуре 293 К. Нагрев ВУС до 363 К позволяет снизить рост значения плотности до 7%.

2) Наибольшее влияние термической подготовки исследовавшихся суспензий на ее динамическую вязкость характерно для диапазона температур от 293 до 333 К. При таких значениях температур снижение вязкости суспензии возможно на 17-20%.

3) Нагрев суспензий в диапазоне изменения температур от 293 до 333 К позволяет увеличить угол раскрытия струи на 21-29% в сравнении с обычным двухкомпонентным ВУТ при температуре 293 К.

5) Добавление более 25% по массе ПЖ в состав ВУТ нецелесообразно (с исследовавшейся маркой угля). Вязкость суспензии сильно увеличивается, что является существенным ограничением с точки зрения процесса распыления.

6) В исследованном диапазоне изменения концентрации ПЖ в составе ВУТ увеличение среднего размера капель топлива составляет около 8%. Предварительный нагрев ВУС перед распылением позволяет существенно снизить значение среднего размера капель суспензии. Изменения составляют 5-9% в сравнении с холодной (при 293 К) ВУС.

Литература

1. Садовский Д.Ю., Макаров А.С., Савицкий Д.П., и др. Получение композиционного водоугольного топлива с применением глицерина // Вопросы химии и химической технологии. 2017. Т. 1. № 110. С. 59–63.

2. Саламатин А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России // Уголь. 2000. Т. 3. С. 10–15.

3. Няшина Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы: Дис. ... канд. тех. наук. Москва; 2018. 201 с.

4. Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K., et al. Coal–oil–water multiphase fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size // Fuel. 2008. Vol. 87, N15–16. pp. 3428-3432.

5. Zhao Z., Wang R., Ge L., et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission // Energy. 2019. Vol. 168. pp. 609-618.

6. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., et al. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2021. Vol. 9, N1. pp. 1-21.

7. Strizhak P.A., Verшинina K.Y. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // Energy. 2017. Vol. 120. pp. 34-46.

8. Zhou H., Li Y., Li N., et al. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions // Journal of the Energy Institute. 2019. Vol. 92. pp. 351-363.

9. Chen R., Wilson M., Leong Y.K., et al. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels // Fuel. 2011. Vol. 90, N4. pp. 1689-1695.

10. Баранова М.П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма // Труды КГТУ. 2006. Т. 2, N3. С. 143–147.

11. Мингалеева Г.Р., Гайнетдинов А.В., Шакиров Р.Р., Ахметов Э.А. Сравнительный анализ способов снижения вязкости водоугольных топлив // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015, N7-8. С. 37-46.

12. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects // Fuel Processing Technology. 2016. Vol. 148. pp. 224-235.

13. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., et al. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 772. pp. 144909.
14. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. Т. 19, №3-4. С. 41-52.
15. Ma X., Duan Y., Liu M. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013. Vol. 46. pp. 131-138.
16. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer // *Fuel*. 2012. Vol. 98. pp. 183-193.
17. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries // *Energy*. 2021. Vol. 230. 120900.
18. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 218. 106864.
19. Mitchell E.J.S., Gudka B., Whittaker C., et al. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating // *Fuel Processing Technology*. 2020. Vol. 210. 106552.
20. Kwoczynski Z., Čmelík J. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280. 124302.
21. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size // *International Journal of Multiphase Flow*. 2015. Vol. 77. pp. 19-31.
22. Kim H.H., Park Y.H., Han K., et al. Combustion and emission characteristics of a reprocessed used lubricating oil as a renewable fuel for boiler cold start-up operation // *Energy*. 2021. Vol. 222. 119784.
23. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // *Applied Thermal Engineering*. 2019. V. 163. 114400.
24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019. V. 77. pp. 288-298.
25. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., et al. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28, №6. pp. 1340-1359.
26. Hang J., Bae C., Lee K.O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems // *International Journal of Engine Research*. 2003. Vol. 4. pp. 283-298.
27. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., et al. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // *Journal of the Energy Institute*. 2018. Vol. 91, №6. pp. 978-983.
28. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung S., et al. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle // *International Journal of Multiphase Flow*. 2020. Vol. 126. 103240.
29. Minakov A.V., Shebelev A.A., Strizhak P.A., et al. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals // *Fuel*. 2019. Vol. 254. 115606.
30. Shin J., Kim D., Seo J., et al. Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle // *Energy*. 2020. Vol. 205. 118090.
31. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., et al. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil // *Fuel*. 2021. Vol. 302. 121203.
32. Aleiferis P.G., van Romunde Z.R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions // *Fuel*. 2013. Vol. 105. pp. 143-168.

33. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Valiullin T.R., et al. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 225. 107037.

34. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. 2021. Vol. 303. 121182.

35. Zheng J., Xu Y., Wang Q., et al. Characteristics of particle size and velocity of droplets of coal water slurry subjected to air-blast electrostatic atomization using a phase Doppler particle analyzer // *Journal of Electrostatics*. 2019. Vol. 98. pp. 40-48.

Авторы публикации

Гвоздяков Дмитрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет; научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории катализа и преобразования углеродосодержащих материалов с получением полезных продуктов, Кузбасский государственный технический университет; научный сотрудник Лаборатории «Катализ и переработка углеводородов», НИТУ МИСиС.

Зенков Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет; научный сотрудник Лаборатории «Катализ и переработка углеводородов», НИТУ МИСиС.

Лавриненко Сергей Викторович – канд. пед. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет.

Матвеева Анастасия Александровна – канд. техн. наук, доцент Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Инженерная школа энергетики, Томский политехнический университет.

References

1. Sadovsky D.Yu., Makarov A.S., Savitsky D.P., et al. Obtaining composite coal-water fuel with the use of glycerin. *Questions of chemistry and chemical technology*. 2017;1(110):59-63. (In Russ).

2. Salamatin A.G. On the state and prospects of using coal-water fuel in Russia. *Coal*. 2000;3:10-15. (In Russ).

3. Nyashina G.S. *Issledovaniye sposobov snizheniya vliyaniya teplovykh elektricheskikh stantsiy na okruzhayushchuyu sredu pri szhiganii suspensionnykh topliv iz otkhodov ugleobogashcheniya i biomassy* [dissertation]. Moscow; 2018. 201 p. (In Russ).

4. Shukla S.C., Kukade S., Mandal S.K., et al. Coal-oil-water multiphase fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size. *Fuel*. 2008;87(15-16):3428-3432.

5. Zhao Z., Wang R., Ge L., et al. Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurrying, combustion, and pollutant emission. *Energy*. 2019;168:609-618.

6. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., et al. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(1):1-21.

7. Strizhak P.A., Vershinina K.Y. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals. *Energy*. 2017;120:34-46.

8. Zhou H., Li Y., Li N., et al. Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions. *Journal of the Energy Institute*. 2019;92:351-363.

9. Chen R., Wilson M., Leong Y.K., et al. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels. *Fuel*. 2011;90(4):1689-1695.

10. Baranova M.P. Influence of plasticizing additives on rheological characteristics of coal-water suspensions from coals of varying degrees of metamorphism. *Proceedings of KSTU*. 2006;2(3):143-147. (In Russ).

11. Mingaleeva G.R., Gainetdinov A.V., Shakirov R.R., Akhmetov E.A. Comparative analysis of ways to reduce the viscosity of coal-water fuels. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;7-8:37-46. (In Russ).

12. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., et al. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Processing Technology*. 2016;148:224-235.

13. Nikitin A.D., Nyashina G.S., Ryzhkov A.F., et al. Anthropogenic emissions from the combustion of composite coal-based fuels. *Science of the Total Environment*. 2021;772:144909.

14. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Shlegel N.E., Shevyrev S.A. Reduction of anthropogenic emissions during combustion of coals and waste of their processing as components of organo-coal-water slurries. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):41-52. (In Russ).

15. Ma X., Duan Y., Liu M. Atomization of petroleum-coke sludge slurry using effervescent atomizer. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;46:131-138.

16. Daviault S.G., Ramadan O.B., Matida E.A., et al. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer. *Fuel*. 2012;98:183-193.

17. Gvozdyakov D., Zenkov A. Improvement of atomization characteristics of coal-water slurries. *Energy*. 2021;230:120900.

18. Gvozdyakov D., Zenkov A. Influence of petrochemicals on jet characteristics after coal-water fuel spraying. *Fuel Processing Technology*. 2021;218:106864.

19. Mitchell E.J.S., Gudka B., Whittaker C., et al. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating. *Fuel Processing Technology*. 2020;210:106552.

20. Kwoczynski Z., Čmelík J. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process. *Journal of Cleaner Production*. 2021;280:124302.

21. Mlkvik M., Stähle P., Schuchmann H.P., et al. Twin-fluid atomization of viscous liquids: The effect of atomizer construction on breakup process, spray stability and droplet size. *International Journal of Multiphase Flow*. 2015;77:19-31.

22. Kim H.H., Park Y.H., Han K., et al. Combustion and emission characteristics of a reprocessed used lubricating oil as a renewable fuel for boiler cold start-up operation. *Energy*. 2021;222:119784.

23. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., et al. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*. 2019;163:114400.

24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., et al. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2019;77:288-298.

25. Alekseenko S.V., Bilsky A.V., Dulin V.M., et al. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007;28(6):1340-1359.

26. Hang J., Bae C., Lee K.O. Initial development of non-evaporating diesel sprays in common-rail injection systems. *International Journal of Engine Research*. 2003;4:283-298.

27. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., et al. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):978-983.

28. Tareq M.M., Dafsari R.A., Jung S., et al. Effect of the physical properties of liquid and ALR on the spray characteristics of a pre-filming airblast nozzle. *International Journal of Multiphase Flow*. 2020;126:103240.

29. Minakov A.V., Shebelev A.A., Strizhak P.A., et al. Study of the Weber number impact on secondary breakup of droplets of coal water slurries containing petrochemicals. *Fuel*. 2019;254:115606.

30. Shin J., Kim D., Seo J., et al. Effects of the physical properties of fuel on spray characteristics from a gas turbine nozzle. *Energy*. 2020;205:118090.

31. Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Yu., et al. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil. *Fuel*. 2021;302:121203.

32. Aleiferis P.G., van Romunde Z.R. An analysis of spray development with iso-octane, n-pentane, gasoline, ethanol and n-butanol from a multi-hole injector under hot fuel conditions. *Fuel*. 2013;105:143-168.

33. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Valiullin T.R., et al. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes. *Fuel Processing Technology*. 2022;225:107037.

34. Shadrin E.Yu., Anufriev I.S., Butakov E.B., et al. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*. 2021;303:121182.

35. Zheng J., Xu Y., Wang Q., et al. Characteristics of particle size and velocity of droplets of coal water slurry subjected to air-blast electrostatic atomization using a phase Doppler particle analyzer. *Journal of Electrostatics*. 2019;98:40-48.

Authors of the publication

Dmitry V. Gvozdnyakov – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia; National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia.

Andrey V. Zenkov – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia.

Sergey V. Lavrinenko – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

Anastasia A. Matveeva – Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

Получено **06.05.2022г.**

Отредактировано **13.05.2022г.**

Принято **15.05.2022г.**



ВЫБОР СХЕМНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В АДАПТИВНЫХ СЕТЯХ С ТЯГОЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н.В. Савина¹, И.А. Лисогурский¹, Л.Н. Лисогурская¹

¹Амурский государственный университет, г. Благовещенск, Россия
nataly-savina@mail.ru, ivan_2404@mail.ru, kalinichenko-lid@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Анализ существующих схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой и оценка их соответствия новым свойствам электрической сети при переходе на активно-адаптивную платформу. *Определение особенностей работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу. Характеристика существующих технических средств и схемных решений для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой и их анализ на предмет соответствия новым свойствам электрической сети. МЕТОДЫ.* Для решения поставленных задач был выполнен структурный анализ существующих технических и схемных решений для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В данной статье произведена систематизация соответствия технических средств решаемым проблемам в области качества электроэнергии. *Определены особенности работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу. Выявлены современные технические средства и схемные решения, соответствующие новым свойствам электрической сети. Предложен вариант комбинирования технологий для комплексного влияния на показатели качества электроэнергии. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* При переходе электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу в целях улучшения качества электроэнергии целесообразно применять технические средства, способные обеспечивать ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяговой нагрузки. К таким средствам относятся распределенная генерация, накопители электрической энергии, активные фильтрокомпенсирующие и симметрирующие устройства, FACTS технологии второго поколения. Классические подходы решения проблем с качеством электрической энергии, основанные на применении пассивных технических устройств, не соответствуют новым свойствам активно-адаптивных сетей с тягой переменного тока.

Ключевые слова: *качество электроэнергии; тяга переменного тока; СТАТКОМ; активные фильтры; FACTS технологии.*

Для цитирования: Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Выбор схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в адаптивных сетях с тягой переменного тока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 42-54. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54.

SELECTION OF CIRCUIT AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR IMPROVEMENT THE QUALITY OF ELECTRICITY IN ADAPTIVE NETWORKS WITH TRACTION AC POWER

NV. Savina¹, IA. Lisogurskiy¹, LN. Lisogurskaya¹

¹Amur State University, Blagoveshchensk, Russia
nataly-savina@mail.ru, ivan_2404@mail.ru, kalinichenko-lid@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Analysis of existing circuit and technical solutions for improving the quality of electricity in networks with traction load and assessment of their compliance with new properties of the electric network when switching to an active adaptive platform. *Determination of the features of the operation of electric networks with traction load during the transition to*

an active-adaptive platform. Review of existing technical means and circuit solutions for improving the quality of electricity in electric networks with traction load and their analysis for compliance with new properties of the electric network. METHODS. To solve the tasks set, a structural analysis of existing technical and circuit solutions was performed to improve the quality of electricity in electric networks with traction load. RESULTS. In this article, the systematization of the compliance of technical means with the solved problems in the field of electricity quality is carried out. The features of the operation of electric networks with traction load during the transition to an active-adaptive platform are determined. Modern technical means and circuit solutions corresponding to the new properties of the electrical network are revealed. A variant of combining technologies for a complex effect on the quality of electricity is proposed. CONCLUSION. When switching electric networks with traction load to an active adaptive platform in order to improve the quality of electricity, it is advisable to use technical means capable of providing PCE within acceptable limits in real time, depending on the operating modes of the power system and traction load. Such means include distributed generation, electric energy storage, active filter-compensating and balancing devices, FACTS technologies of the second generation. Classical approaches to solving problems with the quality of electrical energy based on the use of passive technical devices do not correspond to the new properties of active-adaptive networks with alternating current traction.

Keywords: power quality; AC traction; static current; active filters; FACTS technologies.

For citation: Savina NV, Lisogurskiy I.A, Lisogurskaya LN. Selection of circuit and technical solutions for improvement the quality of electricity in adaptive networks with traction AC power. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):42-54. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-42-54.

Введение и литературный обзор

Электрифицированный железнодорожный транспорт – крупный потребитель электрической энергии, негативно влияющий на показатели качества электроэнергии (ПКЭ), нормируемые¹. Тяга переменного тока, как передвижной источник несимметрии и несинусоидальности токов и напряжений, приводит к снижению эффективности и надежности функционирования электрических сетей [1].

Наряду с возникновением несимметричных режимов работы трехфазной питающей сети, а также появлением высших гармоник, источниками которых являются используемые на электроподвижных составах выпрямительные агрегаты с полупроводниковыми преобразователями, тяговая нагрузка приводит к появлению отклонений напряжения и колебаний напряжения. При этом последний упомянутый параметр качества электроэнергии, на который оказывает негативное влияние тяга переменного тока, связан с широко применяемым в железнодорожном транспорте рекуперативным торможением, позволяющим реализовать возврат электрической энергии в контактную сеть.

Важно отметить нестационарность случайных процессов изменения ПКЭ в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Данная особенность связана с тем, что каждый электроподвижной состав является передвижным источником искажения качества электроэнергии. При этом суммирование искажений от разных поездов, количество которых постоянно изменяется, может привести как к наложению и усилению негативного влияния на ПКЭ, так и к взаимной компенсации негативных воздействий.

Улучшение качества электроэнергии приводит к увеличению срока службы электрооборудования, уменьшению эксплуатационных издержек, сокращению дополнительных потерь электроэнергии в элементах электрической сети. Снижение негативного влияния на класс точности электроизмерительных приборов повлечет за собой уменьшение количества ошибок и отказов в работе систем релейной защиты и автоматики, выполненных на базе микропроцессорных устройств. Приведение к допустимым значениям ПКЭ, относящихся к несинусоидальности, несимметрии, колебаниям напряжения и электромагнитным помехам, источником которых является тяга переменного тока, положительно влияет на надежность функционирования

¹ ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 08.04.2022г)

электрических сетей с тяговой нагрузкой. В свою очередь, это приведет к уменьшению экономического ущерба от недоотпуска электроэнергии, связанного с внезапными и постепенными отказами.

Вопросам улучшения качества электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой уделено большое внимание в отечественных и зарубежных источниках. Существующие схемные и технические решения, в том числе базирующиеся на применении инновационных технологий, рассмотрены достаточно подробно. Значительная часть работ [2,3,4,5] посвящена применению регулируемых средств компенсации реактивной мощности для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тягой переменного тока. С целью улучшения ПКЭ по несинусоидальности отмечена целесообразность применения пассивных [6,7,8] и активных [2,4,9,10] фильтров гармоник. Для улучшения ПКЭ по несимметрии существуют схемы симметрирования, подлежащие периодическому улучшению в связи с появлением новых технологий [11,12,13]. В источниках [2,14] рассмотрено применение энергетических роутеров, являющихся одной из технологий *Smart Grid*, с целью повышения качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог.

Как показал анализ проблема качества электроэнергии достаточно широко исследована в традиционных электрических сетях с тяговой нагрузкой, но опыт эксплуатации показывает их низкую эффективность.

Целесообразность перехода электрических сетей с тягой переменного тока на активно-адаптивную платформу обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности их функционирования, что может быть обеспечено внедрением современных технических средств совместно с интеллектуальной системой мониторинга и управления. Анализ современных технических средств для улучшения качества электрической энергии, а также оценка возможности их использования в адаптивном режиме работы электрической сети с тяговой нагрузкой, является важной актуальной задачей, требующей решения.

При этом предложенные варианты решения проблем обеспечения ПКЭ в допустимых пределах должны быть проанализированы на возможность их применения в условиях внедрения концепции «интеллектуальных сетей» в электрические сети с тягой переменного тока, т.к. перевод данных сетей на активно-адаптивную платформу является развитием решения проблемы качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой, что обуславливает актуальность данной статьи.

Научная значимость работы заключается в выявлении технических средств и схемных решений, способных оказывать положительное влияние на качество электроэнергии, обеспечивая его оптимальные параметры в любой момент времени, при переводе электрических сетей, питающих тяговую нагрузку, в активно-адаптивные сети.

Целью данной статьи является анализ существующих схемных и технических решений для улучшения качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой и оценка их соответствия новым свойствам электрической сети при переходе на активно-адаптивную платформу.

В рамках достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определение особенностей работы электрических сетей с тяговой нагрузкой при переходе на активно-адаптивную платформу.

2. Характеристика существующих технических средств для улучшения качества электроэнергии в электрических сетях с тягой переменного тока и их анализ на предмет соответствия новым свойствам электрической сети.

3. Выявление схемных решений, наиболее предпочтительных в условиях перехода к новой концепции «умной» электрической сети.

Активно-адаптивная сеть (ААС), согласно ², представляет собой совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям энергии элементов электрических сетей и систем управления, включающих компоненты базовых технологий адаптивного управления электрической сетью, таких как технологии аккумулирования электроэнергии, технологии сверхпроводимости, токоограничивающие устройства, технологии цифровой подстанции, технологии мониторинга и диагностики электрических сетей и другие.

Переход электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу подразумевает появление в данных сетях управляемых сетевых элементов, а

² Россети ФСК ЕЭС. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf. (дата обращения 08.04.2022г)

также внедрение систем контроля и управления качеством электроэнергии и надежностью электроснабжения в узлах сети. Применение данной концепции создаст возможности для осуществления оперативного реагирования на любые изменения режима работы энергосистемы в режиме реального времени оптимальными управляющими воздействиями, изменяя параметры сети. При этом, новые свойства электрических сетей с тягой переменного тока, такие как адаптивность, гибкость, многофункциональность, должны быть обеспечены внедрением современных технических устройств.

Материалы и методы

Для реализации базовых технологий адаптивного управления электрической сетью существует широкий спектр технических устройств, часть из которых можно использовать для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой [15]. В целях улучшения качества электроэнергии в данных сетях необходимо применять технические устройства, которые смогут обеспечить изменение ПКЭ и параметров электрической сети в требуемых пределах в режиме мониторинга в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяги переменного тока.

На рисунке 1 представлена обобщенная классификация технических средств для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Произведена систематизация соответствия технических средств решаемым проблемам в области качества электроэнергии.

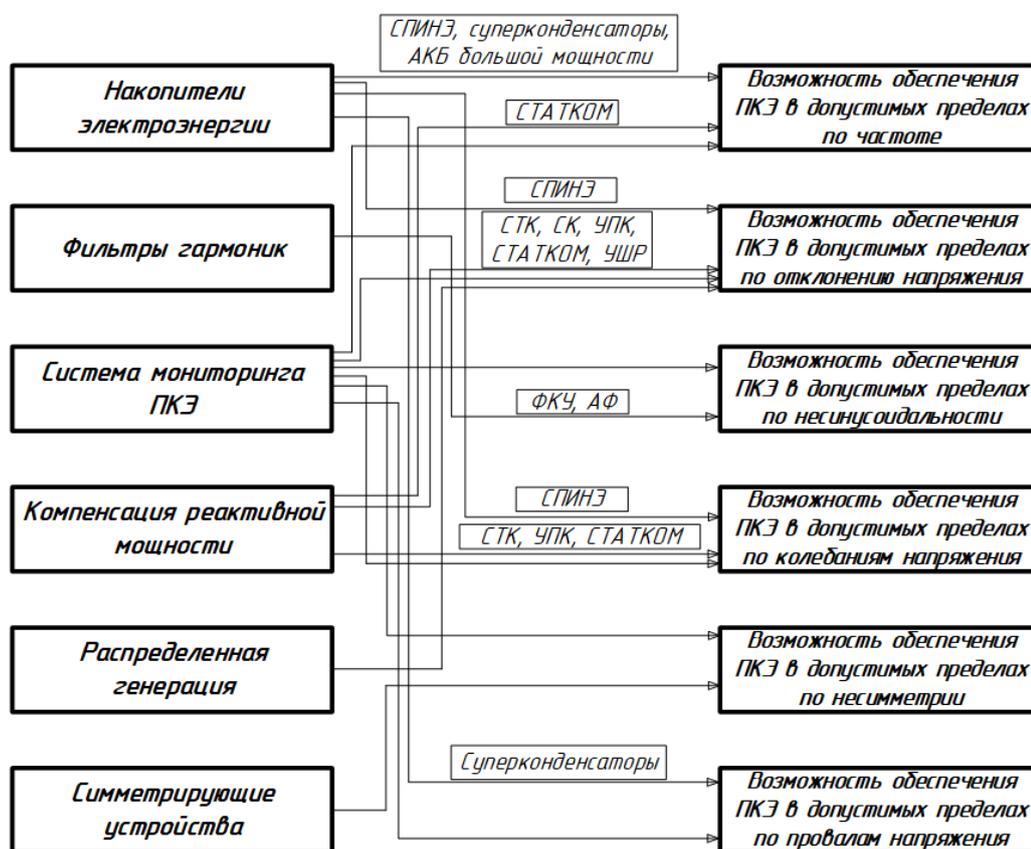


Рис. 1. Классификация технических средств для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

Fig. 1. Classification of technical means for managing the quality of electricity in electric networks with traction load.

Рассмотрим характеристику данных технических средств и проанализируем возможность их применения в условиях перехода электрических сетей с тягой переменного тока на активно-адаптивную платформу.

Система мониторинга ПКЭ.

Система мониторинга ПКЭ способна обеспечить в режиме реального времени сбор, обработку и анализ полной достоверной информации о текущем состоянии качества электрической энергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

На рынке электротехнического оборудования широко представлены средства

измерений показателей качества электрической энергии (СИ ПКЭ) как зарубежных, так и отечественных производителей. В условиях масштабной цифровизации энергетики рационально применять СИ ПКЭ с возможностью поддержки протоколов цифровой подстанции МЭК 61850. Это связано с перспективами развития цифровых тяговых подстанций, как объектов с высоким уровнем автоматизации управления.

Система мониторинга ПКЭ является технологией, обязательной к внедрению в условиях перехода электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную платформу.

Распределенная генерация.

РГ может быть интегрирована в электрические сети с тягой переменного тока, что позволит регулировать напряжение в узлах сети в реальном времени, обеспечивая значения ПКЭ в оптимальных пределах по отклонению напряжения. В целях наиболее корректного регулирования напряжения в электрических сетях с РГ необходимо предусмотреть внедрение гибкой схемы управления, основанной на автоматизации подстанций и современных коммуникационных технологиях [16].

Важно учитывать специфическое влияние РГ на качество электрической энергии. Наряду с положительным воздействием, связанным с поддержанием уровней напряжения в узлах сети в оптимальных пределах, РГ негативно влияет на ПКЭ по несинусоидальности, являясь источником высших гармоник. Также, в сетях с РГ могут возникать колебания напряжения и частоты, приводящие к появлению фликера.

Однако, данные проблемы негативного влияния РГ на качество электрической энергии возможно решить применением современных прогрессивных технологий в области силовой электроники.

Накопители электрической энергии (НЭ).

НЭ относятся к базовым технологиям адаптивного управления электрической сетью. Внедрение НЭ повышает эффективность использования энергетических мощностей, увеличивает системный эффект от применения РГ, приводит к появлению активных потребителей.

Функционал НЭ позволяет производить накопление или отдачу требуемой мощности в соответствии с заданной характеристикой регулирования, что дает им возможность участвовать в регулировании частоты в энергосистеме, стабилизировать колебания генерируемой мощности и мощности нагрузки, регулировать напряжения в узлах сети, а также смягчать наведенные помехи в энергосистеме³.

Применение НЭ в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой позволит эффективно решать проблемы качества электроэнергии в части провалов и выбросов напряжения, кратковременных прерываний, переходных перенапряжений, быстрых изменений напряжения.

Важно отметить, что тяга переменного тока при определенных условиях может выполнять функциональные возможности НЭ.

Фильтры гармоник.

Отрицательное влияние гармонических искажений на электроэнергетическую систему, приводящее к увеличению потерь электроэнергии в электроустановках, некорректной работе релейной защиты и автоматики, а также к другим негативным последствиям, на сегодняшний день является актуальной проблемой в связи с резким увеличением повсеместного использования искажающих сеть вентильных преобразователей электрической энергии.

Классическим решением проблемы негативного влияния высших гармоник является применение силовых резонансных фильтров (фильтрокомпенсирующих устройств). Данное устройство является многофункциональным. Упрощенные схемы силовых резонансных фильтров изображены на рисунке 2. Помимо снижения уровня высших гармоник, силовые резонансные фильтры могут решать задачу компенсации реактивной мощности из-за наличия батарей конденсаторов в составе устройства, являющихся источниками реактивной мощности. [17]

Силовые резонансные фильтры являются статическими устройствами. Они не способны эффективно корректировать ПКЭ по несинусоидальности в режиме мониторинга в условиях изменения гармонического состава токов и напряжений. Следовательно, данные технические устройства не могут быть использованы при

³ ГОСТ Р 58092.3.1-2020. «Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Проектирование и оценка рабочих параметров. Общие требования» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200173637> (дата обращения 08.04.2022г)

реализации перехода электрических сетей с тяговой нагрузкой на адаптивную платформу. Такой же вывод можно сделать и о филтросимметрирующих устройствах, являющихся несимметричными фильтрами, состоящими из пассивных компонентов.

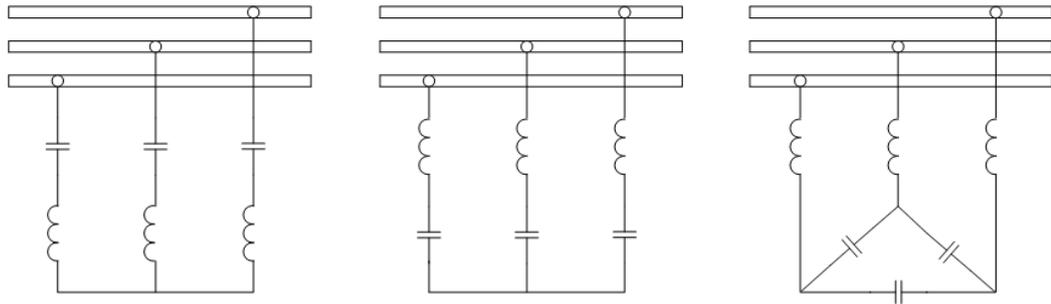


Рис. 2. Упрощенные схемы силовых резонансных фильтров.

Fig. 2. Simplified schemes of power resonant filters.

Проблема фильтрации высших гармоник в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой может быть решена при помощи активных и гибридных фильтров, способных в зависимости от работы энергосистемы и тяги переменного тока изменять собственные характеристики, обеспечивая ПКЭ в допустимых пределах по несинусоидальности в режиме мониторинга.

Вопросами разработки активных фильтрокомпенсирующих и симметрирующих устройств (АФКУ) в части теоретических и методических основ их проектирования, а также внедрением пилотных проектов занимаются различные научно-производственные предприятия. На современном рынке представлены АФКУ шунтирующего и серийного типа.

Комплексным решением задачи улучшения ПКЭ в электрических сетях, связанных с отклонением напряжения, несинусоидальностью и несимметрией является применение шунтирующего АФКУ на основе статического компенсатора реактивной мощности (СТАТКОМ). В качестве альтернативы применению резонансных фильтров, возможно использование шунтирующего гибридного активного фильтра, способного в режиме реального времени обеспечить адаптивную фильтрацию и демпфирование гармоник [18].

Компенсация реактивной мощности.

В активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой для обеспечения ПКЭ по отклонению напряжения целесообразно применять FACTS технологии (рис. 3), способные выполнять полный функционал всех регулируемых средств компенсации реактивной мощности.

Данные электросетевые технологии являются перспективными и помимо положительного влияния на качество электрической энергии приводят к повышению динамической и статической устойчивости ЭЭС, нормализации параметров режимов работы ЭЭС, а также полному использованию пропускной способности действующих сетей⁴.

Особое внимание следует уделить FACTS устройствам второго поколения, которые обладают возможностью векторного регулирования, что подразумевает управление не только величиной, но и фазой вектора напряжения электрической сети. Базовым устройством второго поколения является СТАТКОМ, состоящий из преобразователя напряжения, выполненного на силовых транзисторах, который без дополнительных силовых реакторов и конденсаторных батарей способен обеспечить выработку и потребление реактивной мощности в пределах $\pm 100\%$. Электрическая схема СТАТКОМ приведена на рисунке 4. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к расширению масштабов практического применения данного технического устройства.

⁴ СТО 56947007 - 29.240.019-2009. Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России: стандарт организации. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.240.019-2009_FACTS.pdf. (дата обращения 12.04.2022г)

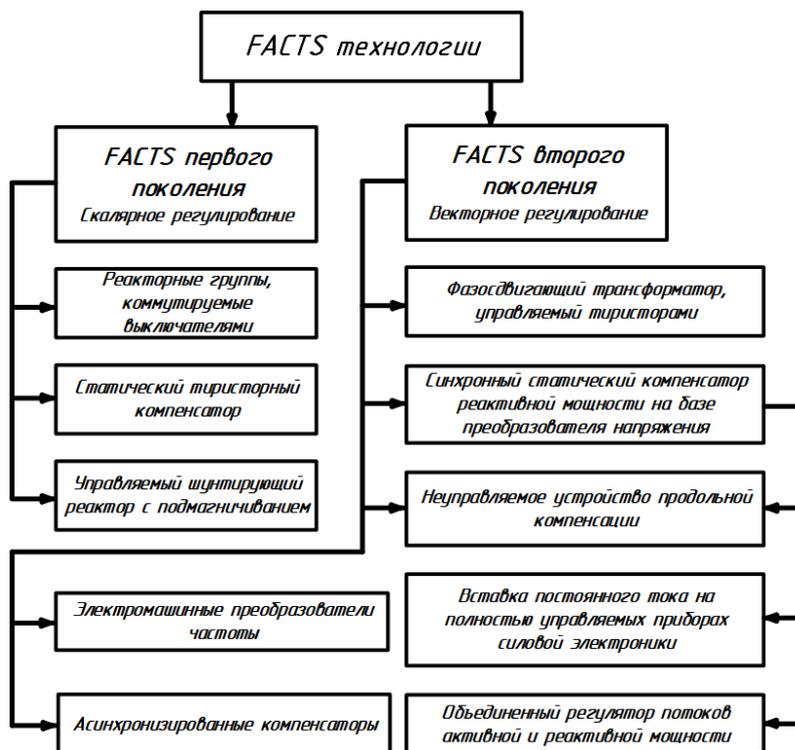


Рис. 3. Классификация устройств FACTS первого и второго поколения.

Fig. 3. Classification of FACTS devices of the first and second generation.

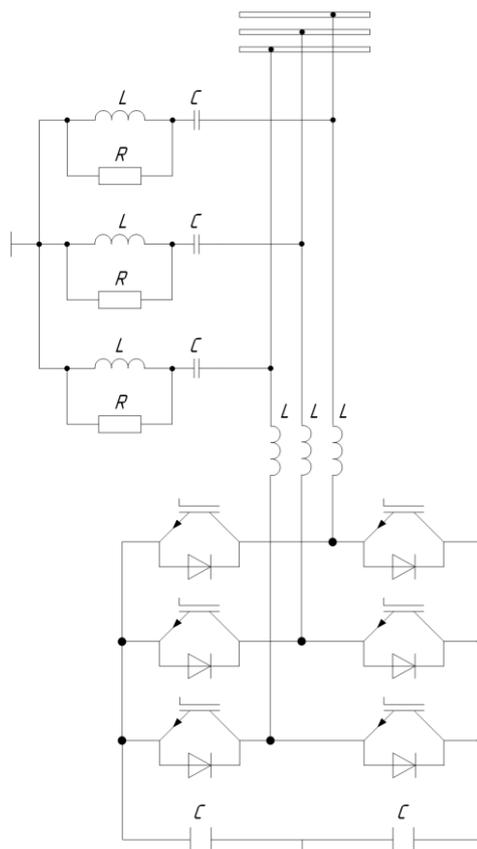


Рис. 4. Электрическая схема СТАТКОМ

Fig. 4. Electrical diagram of the STATCOM

Схемные решения.

Обеспечение ПКЭ в допустимых пределах по несимметрии в электрических сетях с тяговой нагрузкой является одной из важнейших проблем, так как тяга переменного тока создает существенную несимметрию в питающей трехфазной сети.

Классический подход к снижению несимметрии, подразумевающий применение трех типов тяговых подстанций по фазировке подключения трансформаторов, является недостаточно эффективным, что приводит к необходимости разработки и внедрения более действенных технических решений, направленных на улучшение качества электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой.

В настоящее время существуют схемы симметрирования двухфазной нагрузки путем формирования напряжений, отличающихся по фазе на 90° (схема Скотта), а также схемы на базе индуктивных и емкостных элементов (схема Штейнмеца) (рис. 5). Стоит отметить, что установки поперечной компенсации реактивной мощности также обладают симметрирующим эффектом, однако они не способны полностью убрать несимметрию, источником которой является тяга переменного тока [19].

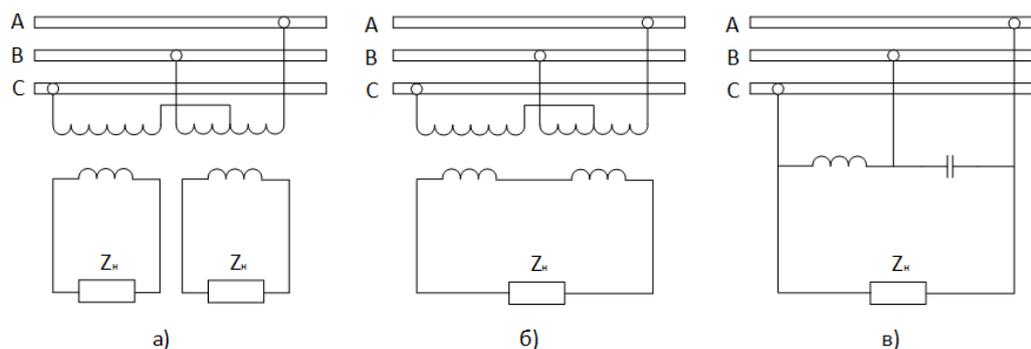


Рис. 5. Схемы симметрирования: а, б – схема Скотта, в – схема Штейнмеца. Fig. 5. Symmetry schemes: a, b – Scott scheme, c – Steinmetz scheme.

Большие перспективы применения имеют технические устройства на основе мощных полностью управляемых силовых *MOSFET* и *IGBT* транзисторов. Данные устройства могут осуществлять корректировку ПКЭ по несинусоидальности, несимметрии и отклонению напряжения, удерживая их значения в допустимых пределах. Важно отметить, что отдельные устройства подобного типа, сочетая в себе функционал нескольких технических средств для улучшения ПКЭ, способны комплексно влиять на качество электрической энергии [20].

Результаты и обсуждение

Задача улучшения качества электрической энергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой может быть успешно решена внедрением инновационных технологий, реализуемых на базе современных технических средств.

В работе определено, что возможность обеспечения ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени может быть реализована внедрением управляемых сетевых элементов, системы мониторинга ПКЭ, а также системы управления качеством электроэнергии. Обоснована целесообразность применения средств управления параметрами режимов последнего поколения в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой. В отличие от существующих подходов показано, что входящие в систему мониторинга ПКЭ средства измерения должны поддерживать протоколы цифровой подстанции МЭК 61850, что позволит обеспечить возможность их применения в условиях внедрения перспективной технологии цифровой тяговой подстанции.

Предложено использовать РГ в сетях с тяговой нагрузкой. Применение РГ в целях повышения качества электроэнергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой позволит обеспечить корректировку уровней напряжения в узлах не только в допустимых пределах, но и в оптимальных. При этом негативное влияние на качество электроэнергии самой РГ может быть нивелировано путем применения современных технологий в области силовой электроники. Системный эффект от внедрения РГ возможно усилить при её использовании совместно с НЭ.

Технологии накопления электроэнергии являются важным компонентом концепции активно-адаптивных сетей. Внедрение НЭ в электрическую сеть с тягой переменного тока окажет положительное влияние на качество электрической энергии в части решения проблем провалов и выбросов напряжения, кратковременных прерываний, переходных перенапряжений, быстрых изменений напряжения.

При решении проблемы гармонических искажений в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой применение классических решений, таких как использование

силового резонансного фильтра, является нецелесообразным, т.к. будучи пассивными, данные устройства не способны эффективно корректировать ПКЭ по несинусоидальности в режиме реального времени в условиях постоянного изменения гармонического состава токов и напряжений. Современными техническими средствами, полностью соответствующими новым свойствам электрической сети с тяговой нагрузкой при их переходе на активно-адаптивную платформу, являются активные и гибридные фильтры, способные изменять собственные характеристики в зависимости от режима работы энергосистемы и тяги переменного тока, обеспечивая в режиме мониторинга ПКЭ в допустимых пределах по несинусоидальности.

При выборе технических средств, способных комплексно влиять на ПКЭ в адаптивном режиме, особое внимание стоит уделить СТАТКОМ. Данное оборудование обладает возможностью регулирования величины и фазы вектора напряжения электрической сети и относится к FACTS устройствам второго поколения. Современные устройства, реализуемые на базе СТАТКОМ, имеют возможность комплексно поддерживать ПКЭ в допустимых пределах по отклонению напряжения, частоте, колебанию напряжения, несинусоидальности и несимметрии (рис. 6).

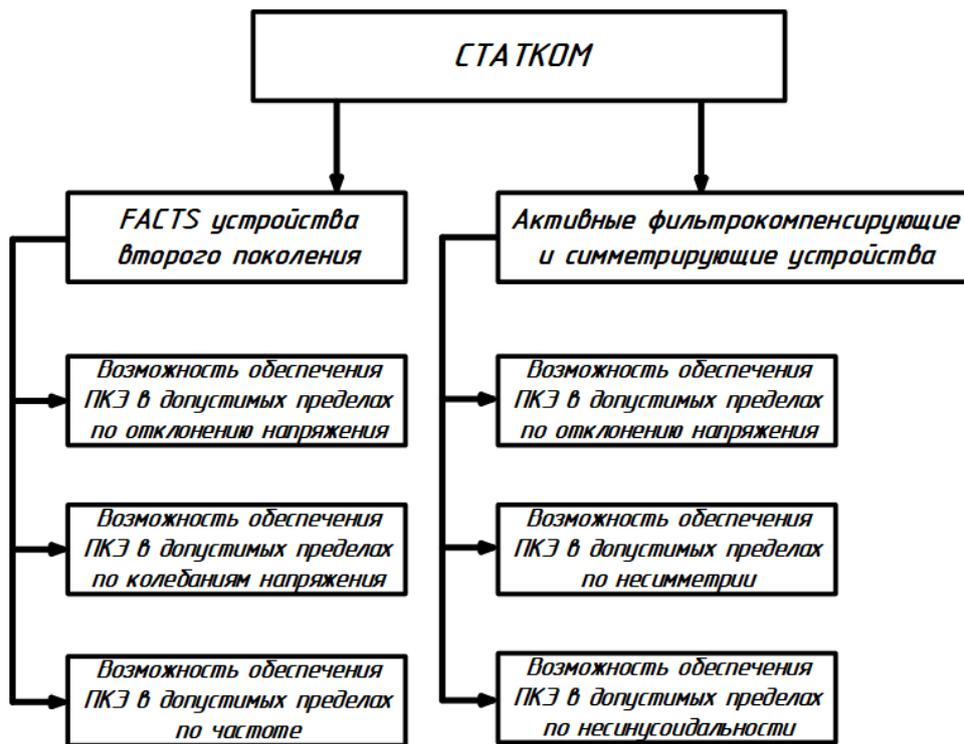


Рис. 6. Систематизация соответствия современных устройств, реализуемых на базе СТАТКОМ, решаемым проблемам в области качества электроэнергии.

Fig. 6. Systematization of compliance of modern devices implemented on the basis of STATCOM with solved problems in the field of electricity quality.

Важно отметить, что полученный от применения установок поперечной компенсации реактивной мощности симметрирующий эффект, обусловленный снижением потребляемого тягового тока, является недостаточным в электрических сетях с тяговой нагрузкой. Следовательно, для того, чтобы оказывать комплексное положительное влияние на качество электроэнергии в активно-адаптивных сетях с тяговой нагрузкой, необходимо использовать технические средства на базе СТАТКОМ совместно с современными схемами симметрирования нагрузки.

Исходя из вышесказанного, развитием решения проблемы качества электроэнергии в сетях с тяговой нагрузкой является перевод таких сетей на платформу активно-адаптивных сетей, применение в них РГ в сочетании с накопителями энергии, выбор технических средств и схемных решений, обеспечивающих поддержание качества электроэнергии в оптимальных пределах адаптивно изменениям схемно-режимной ситуации.

Заключение

При переходе электрических сетей с тяговой нагрузкой на активно-адаптивную

платформу в целях улучшения качества электроэнергии целесообразно применять технические средства, способные обеспечивать ПКЭ в допустимых пределах в режиме реального времени в зависимости от режимов работы энергосистемы и тяговой нагрузки.

В данной работе технические средства для улучшения ПКЭ впервые были проанализированы на предмет соответствия новым свойствам электрической сети с тягой переменного тока, возникающим при переходе данных сетей на активно-адаптивную платформу. К таким средствам относятся распределенная генерация, накопители электрической энергии, активные фильтрокомпенсирующие и симметрирующие устройства, *FACTS* технологии второго поколения. При этом стоит отметить целесообразность комбинирования данных технологий с целью получения новых свойств адаптивности электрической сети.

Классические подходы решения проблем с качеством электрической энергии, основанные на применении пассивных технических устройств, не соответствуют новым свойствам активно-адаптивных сетей с тягой переменного тока. В условиях перехода к новой концепции «умных» электрических сетей применение данных подходов является нецелесообразным.

Литература

1. Савина Н.В., Лисогурский И.А. Тяга переменного тока, как источник снижения эффективности и надежности функционирования электрических сетей // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16–26 февраля 2021 года, Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. С. 143-147.
2. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В. Качество электроэнергии в высоковольтных электрических сетях, питающих тяговые подстанции Транссиба // Энергетическая политика. 2018. № 1. С. 86-95.
3. S. Hu, et al. A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, N2. pp. 1167-1177.
4. Pee-Chin Tan, R. E. Morrison, D. G. Holmes Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39, N2. pp. 575-581.
5. H. Liao, S. Abdelrahman, J. V. Milanović Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks With Renewable Generation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2017. Vol. 32, N4, pp. 1975-1985.
6. Ginn H.L., Czarnecki L.S. An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters // IEEE Trans. on Power Delivery. 2006. Vol. 21, N3. pp. 1445–1451.
7. Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, Shou-Yung Chu. Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion // IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. Vol. 19, N3. pp. 1204–1211.
8. A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014 Vol. 10, N2. pp. 1401-1412.
9. Крюков А.В., Черепанов А.В., Шафиков А.Р. Снижение гармонических искажений в высоковольтных сетях, питающих тяговые подстанции, на основе активных фильтров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. № 1(61). С. 36-46.
10. L. Liu, N. Dai, K. W. Lao, W. Hua A Co-Phase Traction Power Supply System Based on Asymmetric Three-Leg Hybrid Power Quality Conditioner // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69, N12. pp. 14645-14656.
11. Морозов П.В., Морозов Ю.В. Распределение мощности между обмотками тяговых трансформаторов на основе цифровой фильтрации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 6(149). С. 1136-1144.
12. Крюков А.В., Любченко И.А. Улучшение качества электроэнергии в системах электроснабжения стационарных объектов железнодорожного транспорта. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(6):53-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65>

13. Дикович В.В., Кац И.М., Стремиллова О.С. Выбор методов и средств снижения несимметрии напряжений в восточной части оэс сибери. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016;(9-10):66-72. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-66-72>
14. Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Применение энергетических роутеров в электротехнических комплексах железных дорог переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 10-15.
15. Савина Н.В., Лисогурский И.А., Лисогурская Л.Н. Применение технологий активно-адаптивных сетей для управления качеством электроэнергии в электрических сетях с тяговой нагрузкой // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2021. № 93. С. 56-61.
16. Федоров В.К., Леонов Е.Н., Федоров Д.В. Влияние распределенной генерации на потери и качество электрической энергии // Омский научный вестник. 2016. № 6(150). С. 72-76.
17. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд. М., Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
18. Мустафа Г.М., Гусев С.И. Опыт использования активных фильтро-компенсирующих устройств шунтирующего и серийного типа в электрических сетях // Управление качеством электрической энергии: Сборник трудов Международной научно-практической конференции, Москва, 05–07 декабря 2018 года, Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Центр полиграфических услуг» РАДУГА", 2018. С. 67-77.
19. Закарюкин, В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4(20). С. 68-73.
20. Киселев, М.Г. Исследование и разработка методов симметрирования токов в трехфазных системах электроснабжения на основе силовых электронных устройств компенсации неактивной мощности: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты: Москва; 2017. Доступно по: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006654507?page=1&rotate=0&theme=white> Ссылка активна на 12 апреля 2022.

Авторы публикации

Савина Наталья Викторовна – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики, Амурский государственный университет», г. Благовещенск.

Лисогурский Иван Александрович – аспирант, Амурского государственного университета, г. Благовещенск.

Лисогурская Лидия Николаевна – аспирант, Амурского государственного университета, г. Благовещенск.

References

1. Savina NV, Lisogurskiy IA. *Tyaga peremennogo toka, kak istochnik snizheniya effektivnosti i nadezhnosti funkcionirovaniya elektricheskikh setei*. Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniya k vnedreniyu: IV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, Komsomolsk-on-Amur, Russia, 16–26 Feb 2021; Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-na-amure state university, 2021. pp.143-147. doi:10.17084/978-5-7765-1468-5_2021_143
2. Bulatov YuN, Kryukov AV, Cherepanov AV *Kachestvo elektroenergii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii Transsiba. Energeticheskaya politika*. 2018; 1:86-95. EDN: XORWEP
3. S. Hu, et al. *A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017; 64(2):1167-1177. doi: 10.1109/TIE.2016.2615265.
4. Pee-Chin Tan, R.E. Morrison, D. G. Holmes *Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection*. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003; 39(2):575-581. doi: 10.1109/TIA.2003.809455.

5. H. Liao, S. Abdelrahman, J. V. Milanović *Zonal Mitigation of Power Quality Using FACTS Devices for Provision of Differentiated Quality of Electricity Supply in Networks With Renewable Generation*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017; 32(4):1975-1985. doi: 10.1109/TPWRD.2016.2585882.
6. Ginn H.L., Czarnecki L.S. *An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters*. IEEE Trans. on Power Delivery. 2006; 21(3):1445–1451.
7. Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, Shou-Yung Chu. *Strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion*. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004; 19(3):1204–1211.
8. A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, *A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads*. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2014; 2(10):1401-1412. doi: 10.1109/TII.2014.2307196.
9. Kryukov AV, Cherepanov AV, Shafikov AR Snizhenie garmonicheskikh iskazhenii v vysokovol'tnykh setyakh, pitayushchikh tyagovye podstantsii, na osnove aktivnykh fil'tro. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie*. 2019; 61(1):36-46. doi: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).36-46. EDN: ZFBFFZ
10. L. Liu, N. Dai, K. W. Lao, W. Hua *A Co-Phase Traction Power Supply System Based on Asymmetric Three-Leg Hybrid Power Quality Conditioner*. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020; 69(12):14645-14656. doi: 10.1109/TVT.2020.3032939.
11. Morozov PV, Morozov YuV Raspreделение moshchnosti mezhdu obmotkami tyagovykh transformatorov na osnove tsifrovoi fil'tratsii. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2019; 149(6):1136-1144. doi: 10.21285/1814-3520-2019-6-1136-1144. EDN: LJFCMP
12. Kryukov A.V., Lyubchenko I.A. Improving the quality of electricity supply systems in stationary objects of railway transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(6):53-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-6-53-65>
13. Dikovich V.V., Katz E.M., Stremilova O.S. Selection of methods and tools of voltage unbalance reduction within the Eastern part of Siberian integrated power system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016;(9-10):66-72. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-9-10-66-72>
14. Arsent'ev GO, Arsent'ev OV, Kryukov AV Primenenie energeticheskikh routerov v elektrotekhnicheskikh kompleksakh zheleznykh dorog peremennogo toka. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2021; 50(1):10-15. doi: 10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15. EDN: ELNTGF
15. Savina NV, Lisogurskii IA, Lisogurskaya LN Primenenie tekhnologii aktivno-adaptivnykh setei dlya upravleniya kachestvom elektroenergii v elektricheskikh setyakh s tyagovoi nagruzkoj. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*. 2021; 93:56-61. doi: 10.22250/jasu.93.12.
16. Fedorov VK, Leonov EN, Fedorov DV Vliyanie raspredelennoi generatsii na poteri i kachestvo elektricheskoi energii. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2016; 150(6):72-76.
17. Zhezhenko IV. *Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyati*. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2000, 331 p.
18. Mustafa GM, Gusev SI. *Opyt ispol'zovaniya aktivnykh fil'tro-kompensiruyushchikh ustroystv shuntiruyushchego i seriesnogo tipa v elektricheskikh setyakh*. Upravlenie kachestvom elektricheskoi energii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 05–07 Dec 2018; Moskva: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu Tsentra poligraficheskikh uslug «RADUGA», 2018. pp. 67-77.
19. Zakaryukin VP, Kryukov AV, Ivanova ES Analiz skhem simmetrirovaniya tyagovykh nagruzok zheleznykh dorog peremennogo toka. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2013; 20(4):68-73.
20. Kiselev, MG *Issledovanie i razrabotka metodov simmetrirovaniya tokov v trekhfaznykh sistemakh elektrosnabzheniya na osnove silovykh elektronnykh ustroystv kompensatsii neaktivnoi moshchnosti: spetsial'nost' 05.09.01 «Elektromekhanika i elektricheskie apparaty»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk*. Moscow; 2017. Available at: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006654507?page=1&rotate=0&theme=white> Accessed: 12 April 2022.

Authors of the publication

Natalya V. Savina – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

© Н.В. Савина, И.А. Лисогурский, Л.Н. Лисогурская

Ivan A. Lisogurskiy – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

Lydia N. Lisogurskaya – Amur State University, Blagoveshchensk, Russia.

Получено

02.05.2022г.

Отредактировано

16.05.2022г.

Принято

24.05.2022г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ЗНАЧЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

О.В. Соловьева¹, С.А. Соловьев¹, Ю.В. Ваньков¹, И.Г. Ахметова¹, Р.З. Шакурова¹,
А.Р. Талипова¹

¹Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: 0000-0002-4757-6387, solovyeva.ov@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Повышение энергоэффективности высокопористых ячеистых материалов с различной геометрией (SC, BCC, FCC, DEM) и с различными пористостями среды ($\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$) посредством численного моделирования. Определить влияние геометрии и пористости ячеистого материала на значения перепада давления, тепловой поток и показатель энергетической эффективности. *МЕТОДЫ.* Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Fluent v. 19.2. Геометрические модели пористых сред представляют собой наборы пересекающихся сфер с различной структурой упаковки: периодическая простая кубическая упаковка (SC), гранецентрированная кубическая упаковка (FCC), объемно-центрированная кубическая упаковка (BCC) и случайная структура, созданная методом дискретных элементов (DEM). Расчеты проводились при следующих скоростях потока воздуха: 0,01; 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** При скоростях потока воздуха 0,01 м/с и 0,05 м/с все исследуемые структуры демонстрируют близкие значения теплового потока. При значениях пористости $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$ наибольшие значения теплового потока показала структура FCC, при пористостях $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$ наибольший тепловой поток имела структура BCC. Это объясняется тем, что при соответствующих значениях пористости структура FCC или BCC имели наибольшую площадь поверхности, которая и обеспечивала большой тепловой поток. При пористостях среды $\varepsilon=0,7$ и $\varepsilon=0,75$ упаковки BCC и FCC показывают высокое значение перепада давления. При пористостях среды $\varepsilon=0,8$ и $\varepsilon=0,85$ наибольшее значение перепада давления соответствует упаковке ячеек FCC, а при пористостях $\varepsilon=0,9$ и $\varepsilon=0,95$ – упаковке BCC. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** При максимальном значении пористости $\varepsilon=0,95$ упаковка ячеек BCC обеспечивает большее значение теплового потока по сравнению со структурой FCC. Упаковка SC имеет наименьшие значения теплового потока при всех исследуемых пористостях. Также упаковке SC соответствуют наименьшие значения перепада давления и, в связи с этим, наиболее высокие значения показателя энергетической эффективности.

Ключевые слова: высокопористый ячеистый материал, теплообмен, энергоэффективность, численное моделирование, тепловой поток.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, <https://rscf.ru/project/21-79-10406/>.

Для цитирования: Соловьева О.В., Соловьев С.А., Ваньков Ю.В., Ахметова И.Г., Шакурова Р.З., Талипова А.Р. Исследование влияния геометрии высокопористого ячеистого материала на значение энергетической эффективности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69.

DETERMINATION OF THE EFFECT OF THE OPEN CELL FOAM MATERIAL GEOMETRY ON THE VALUE OF ENERGY EFFICIENCY

OV. Soloveva¹, SA. Solovev¹, YuV. Vankov¹, IG. Akhmetova¹, RZ. Shakurova¹,
AR. Talipova¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: 0000-0002-4757-6387, solovyeva.ov@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Improving the energy efficiency of open cell foam materials with different geometries (SC, BCC, FCC, DEM) and with different medium porosities ($\varepsilon=0.7$; $\varepsilon=0.75$; $\varepsilon=0.8$; $\varepsilon=0.85$; $\varepsilon=0.9$; $\varepsilon=0.95$) by numerical simulation. To determine the influence of the geometry and porosity of an open cell foam material on the values of pressure drop, heat flux and energy efficiency factor. *METHODS.* Numerical simulation was carried out using the ANSYS Fluent 19.2 software package. Geometric models of porous structures are sets of intersecting spheres with different packing structures: periodic Simple Cubic packing (SC), Face Centered Cubic packing (FCC), Body Centered Cubic packing (BCC), and random structure generated by the discrete element method (DEM). The calculations were carried out at the following air flow velocities: 0.01; 0.05; 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25 m/s. *RESULTS.* At air flow velocities of 0.01 m/s and 0.05 m/s, all the studied structures show approximately the same heat flux. With porosity values $\varepsilon=0.75$; $\varepsilon=0.8$; $\varepsilon=0.85$ the highest values of heat flow were shown by the FCC structure, with porosity $\varepsilon=0.7$; $\varepsilon=0.9$; $\varepsilon=0.95$ the BCC structure had the highest heat flux. This is explained by the fact that, at the corresponding porosity values, the FCC or BCC structure had the largest surface area, which provided the largest heat flux. With the porosities of media $\varepsilon=0.7$ and $\varepsilon=0.75$, the BCC and FCC cell packages show a high pressure drop. With the porosities of media $\varepsilon=0.8$ and $\varepsilon=0.85$, the highest pressure drop corresponds to FCC cell packing, and for porosities $\varepsilon=0.9$ and $\varepsilon=0.95$, to BCC cell packing. *CONCLUSION.* With equal high porosity, the BCC cell packing provides a higher value of heat flux than the FCC structure. The SC package has the lowest heat flux values for all studied porosities. The SC package also has the lowest pressure drop values and therefore the highest energy efficiency values.

Keywords: open cell foam material, heat transfer, energy efficiency, numerical simulation, heat flux.

Acknowledgments: The research was funded by the Russian Science Foundation, grant number 21-79-10406, <https://rscf.ru/en/project/21-79-10406/>.

For citation: Soloveva OV, Solovev SA, Vankov YuV, Akhmetova IG, Shakurova RZ, Talipova AR. Determination of the effect of the open cell foam material geometry on the value of energy efficiency. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3):55-69. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-55-69.

Введение

Теплообменники играют важную роль в различных инженерных приложениях. Процессы нагрева и охлаждения различных жидкостей и газов являются основой технологических процессов, протекающих на предприятиях энергетической отрасли, поэтому создание высокоэффективных и компактных теплообменников – одна из приоритетных задач в сфере энергетики [1-3].

В последние годы исследователи сосредоточили внимание на увеличении интенсивности теплопередачи теплообменников [4,5]. Одним из средств достижения этой цели является использование в теплообменниках материалов с пористой структурой [6-8]. Это связано с их низкой стоимостью, легким весом, сложной траекторией потока и высоким значением теплопроводности [9,10]. По сравнению с цельными структурами пористые материалы имеют развитую удельную поверхность, которая обеспечивает большую площадь контакта между матрицей (пенной) и средой (жидкостью, газом или другим твердым телом) [11]. Из-за большой площади контакта пористых структур теплообмен между задействованными материалами происходит особенно эффективно [12-14].

Экспериментально подтверждена целесообразность использования пористых металлических вставок в конструкции кожухотрубных теплообменников. Rydalina et al., Ahmed et al. [15, 16] пришли к выводу, что скорость теплопередачи выше в теплообменниках с пористыми металлическими вставками (по сравнению с теплообменниками без вставок). Интенсивность теплопередачи выше в теплообменнике с наибольшей пористостью по сравнению с другими протестированными теплообменниками с пористыми вставками. По полученным результатам в исследованиях авторов Varagh et al. (2018), Varagh et al. (2019) [17, 18] можно заключить, что при заполнении канала пористой вставкой, наибольшее значение теплопередачи (как в ламинарных, так и в турбулентных потоках) обеспечивается при полностью заполненном пористой средой канале. В турбулентном потоке канал с пористыми зонами кольцевой

формы (пористая зона, примыкающая к стенке) имеет лучшие тепловые характеристики, что означает большую теплопередачу с низким перепадом давления. По мере увеличения толщины пористой среды и увеличения массового расхода газа скорость теплопередачи увеличивается. Результаты исследований показывают, что охлаждение с пористой зоной может значительно увеличить скорость теплопередачи по сравнению с однофазным охлаждением без пористой зоны.

Nilrueng et al. [19] экспериментально исследовали коэффициент теплоотдачи и перепад давления при движении воды внутри пластинчатого теплообменника, заполненного медной пеной. Результаты показывают, что коэффициент теплопередачи и перепад давления увеличиваются при увеличении скорости воды и плотности пор. Коэффициент теплопередачи увеличился на 20,23%, 29,37% и 40,28% для медных пен с плотностью пор 30 PPI (30 пор на дюйм), 40 PPI и 50 PPI соответственно, по сравнению с пластинчатым теплообменником. Авторами Buonomo et al. [20] было проведено исследование компактного теплообменника с пятью круглыми трубками, встроенными в алюминиевую пену, чтобы определить размеры области металлической пены, которая представляет собой оптимизацию между повышением скорости теплопередачи и увеличением мощности на прокачку теплоносителя. Окончательная геометрическая конфигурация теплообменной системы с алюминиевой пеной с пористостью, равной 0,94, и плотностью пор 20 PPI, характеризовалась толщиной 0,056 м и шагом (расстоянием между трубками теплообменника) 0,0168 м.

Целью данной работы является определение влияния геометрии и пористости на значение теплового потока и показатель энергетической эффективности высокопористого ячеистого теплообменного элемента. В качестве комплексного показателя оценки энергоэффективности предлагается отношение теплового потока к потребляемой мощности на прокачку газа [21].

Научная значимость работы заключается в определении параметров, вносящих наибольший вклад в изменение энергетической эффективности теплообменных элементов.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования можно использовать при разработке и внедрении высокоэффективных теплообменников в различных отраслях промышленности.

Материалы и методы

Созданы модели высокопористых сред с упорядоченной и неупорядоченной структурой при разных значениях пористости среды: $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$.

Расчетная область представляет собой цилиндрическую структуру, внутри которой расположена нагретая пористая вставка толщиной 20 мм и диаметром 20 мм с присоединенными патрубками длиной 20 мм и 60 мм соответственно. Такие размеры обусловлены необходимостью обеспечить удаленность границ входа и выхода для нужной сходимости численного расчета.

Геометрические модели пористых структур представляют собой наборы пересекающихся сфер. В зависимости от регулярности микроструктуры пористая структура может быть случайной и периодической [22]. В этом исследовании пористая вставка представляет собой упаковку ячеек, которая была построена: 1) методом дискретного элемента (Discrete Element Method) (DEM); 2) в виде объемно-центрированной кубической решетки (Body-centered Cubic) (BCC); 3) в виде гранецентрированной кубической решетки (Face-centered Cubic) (FCC); 4) в виде простой кубической решетки (Simple Cubic) (SC). Расчеты, полученные с использованием упаковки DEM усредняли для пяти различных геометрий в связи с неупорядоченной структурой. Примеры расчетных областей представлены на рисунке 1.

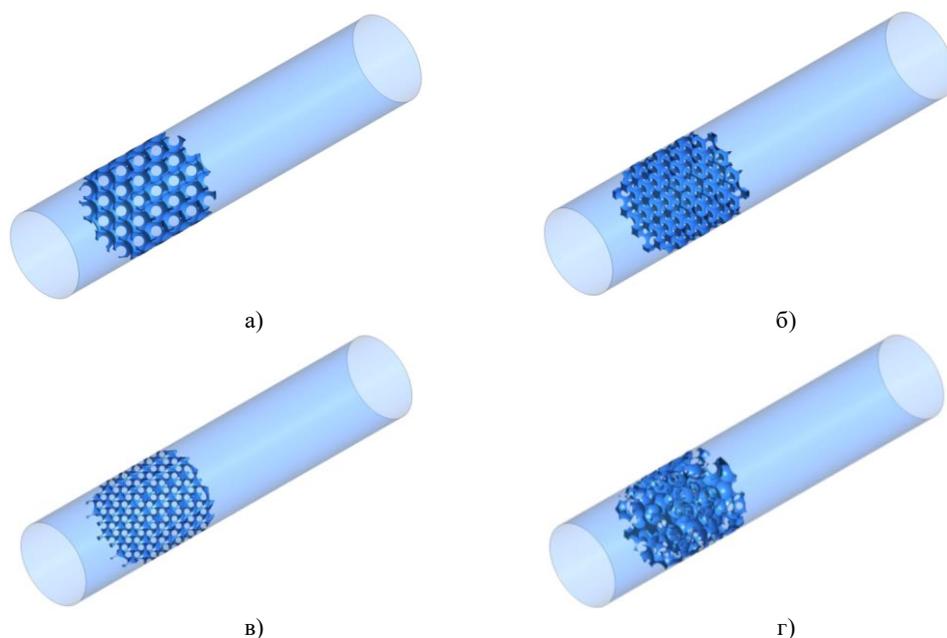


Рис.1. Примеры расчетных моделей для структур с пористостью $\varepsilon=0,9$:
а) BCC; б) FCC; в) SC; г) DEM

Fig.1. Examples of calculation models for structures with porosity $\varepsilon=0.9$:
a) BCC; b) FCC; c) SC; g) DEM

На границах области задавались следующие параметры: температура на поверхности пористой структуры – 373К; температура воздуха на входе – 293К. Параметры воздуха, используемые в расчетах: плотность – $\rho=1,225$ кг/м³; динамический коэффициент вязкости – $\mu=1,7894 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с). Расчет проводился для следующих скоростей воздуха: 0,01; 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с, данным скоростям соответствовали следующие значения массового расхода G : $3,84 \cdot 10^{-6}$; $1,92 \cdot 10^{-5}$; $9,60 \cdot 10^{-5}$; $1,92 \cdot 10^{-4}$; $2,88 \cdot 10^{-4}$; $3,84 \cdot 10^{-4}$; $4,8 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Количество ячеек сеточного разбиения находилось в пределах от 1,9 до 2,2 млн ячеек. Проверка сеточного разбиения проводилась посредством измельчения расчетной сетки, при котором не происходило дальнейшего изменения расчетных параметров, либо они изменялись с незначительной погрешностью. Численное моделирование теплообмена в пористой среде проведено методом контрольных объемов в программном комплексе ANSYS Fluent (v.19.2). В расчетах использовалась SST-модель турбулентности.

Математическая модель движения газа

Течение газа через металлические пены представляет собой сложное явление, когда непрерывные препятствия приводят к рециркуляции и завихрениям [23]. Сложная геометрия металлических пен усиливает турбулентность, что способствует увеличению скорости теплопередачи от твердого тела к газу.

В литературе встречаются различные типы моделей течения газа для определения характеристик течения через пористую среду, такие как модели, основанные на уравнениях Навье-Стокса, полуэмпирических (например, соотношениях Дарси, Форхгеймера, Эргуна и т.д.) и эмпирических соотношениях. Уравнениями Дарси-Бринкмана, Форхгеймера, Эргуна и т.д. описываются приближенные модели движения газа в пористой среде.

Основные уравнения гидродинамики и теплообмена, которые решаются при прямом численном моделировании:

1) Уравнение сохранения массы в приближении стационарного течения в контрольном объеме принимает вид:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, \vec{v} – вектор скорости газа.

2) Уравнение сохранения импульса:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}), \quad (2)$$

где p – статическое давление, μ – динамический коэффициент вязкости.

3) Уравнение энергии:

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} c_p T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T), \quad (3)$$

где c_p – теплоемкость газа, λ – коэффициент теплопроводности газа, T – температура газа.

Расчет показателя энергетической эффективности

Показатель энергетической эффективности определялся по формуле [24]:

$$E_f = \frac{Q}{\delta P} \quad (4)$$

где Q – тепловой поток с поверхности пористой вставки, Вт; δP – мощность, затрачиваемая на прокачку воздуха, Вт, рассчитываемая по формуле [24]:

$$\delta P = G_v \cdot \Delta p = \frac{G}{\rho} \cdot \Delta p \quad (5)$$

где G_v – объемный расход воздуха, м³/с; Δp – перепад давления, Па; G – массовый расход воздуха, кг/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Экспериментальные исследования

Для проверки корректности модели проведены экспериментальные исследования по определению перепада давления в пористой среде. Образцы пористых вставок толщиной 20 мм и 20 мм в диаметре (упаковки ячеек BCC, FCC и SC) и пористостью $\varepsilon=0,85$ были напечатаны на 3D-принтере и представляли собой обратную матрицу расчетной модели. Для проведения эксперимента также были напечатаны вспомогательные входной и выходной патрубки с размерами, аналогичными модели для численного расчета: длиной 20 и 60 мм соответственно. На рисунке 2 изображена схема экспериментальной установки.

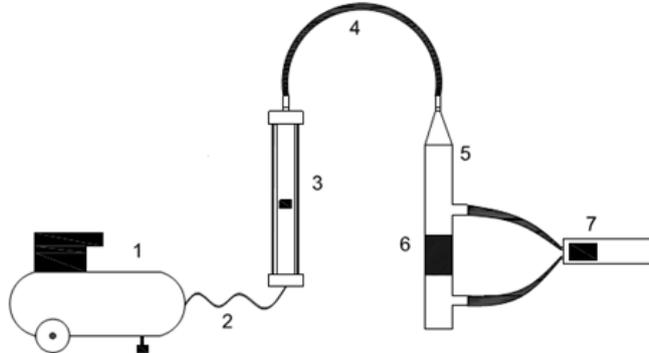


Рис. 2. Схема экспериментальной установки по определению перепада давления в пористой среде: 1 – компрессор; 2 – подающий воздухопровод; 3 – ротаметр; 4 – выходной воздухопровод; 5 – канал; 6 – вставка из пористого материала; 7 – дифференциальный манометр

Fig. 2. Circuit diagram of the experimental installation for determining the pressure difference in a porous medium: 1 - compressor, 2 - supplying air duct, 3 - rotameter, 4 - exhaust air duct; 5 - channel; 6 - porous material insert; 7 - differential pressure gauge

Эксперимент проводился следующим образом. Компрессор 1 подавал сжатый воздух по подающему воздухопроводу 2 в ротаметр 3. По выходному воздухопроводу 4 воздух поступал в канал 5, в котором была расположена пористая вставка 6. Измерение перепада давления (разницы давлений на входе и выходе из канала) осуществлялось дифференциальным манометром 7. Исследования проведены при тех же скоростях потока воздуха, что задавались в численных расчетах: 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с. Для каждой из скоростей потока воздуха для моделей BCC, FCC и SC было проведено по 5 измерений. Отклонение от среднего результата не превышало 5%.

На рисунке 3 приведены кривые перепада давления от скорости потока воздуха для пористых структур трех геометрий (SC, BCC, FCC) со значением пористости $\varepsilon=0,85$, полученные в результате численных расчетов и экспериментальных исследований.

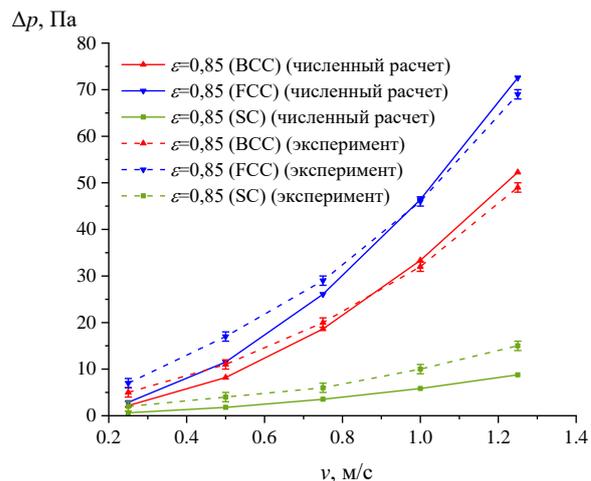


Рис. 3. Зависимости перепада давления от скорости потока для вставок с пористостью $\varepsilon=0,85$

Fig. 3. Pressure differential dependence on flow rate for insert with porosity $\varepsilon=0.85$

Можно заключить, что значения перепада давления для структур трех геометрий, полученные посредством численных расчетов, хорошо согласуются со значениями перепада давления, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 представлены графики изменения площади поверхности упаковок в зависимости от пористости среды.

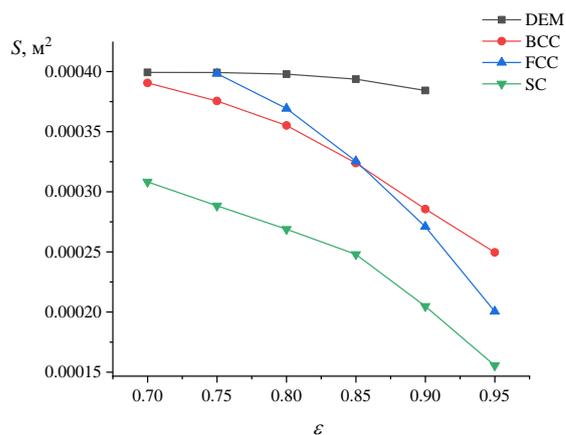
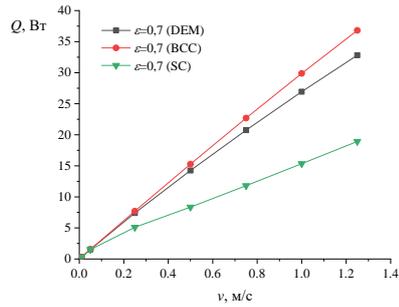


Рис. 4. Площадь поверхности упаковок DEM, BCC, FCC, SC

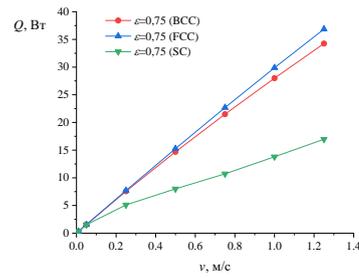
Fig. 4. Surface area of DEM, BCC, FCC, SC packages

Упаковка SC имеет наименьшее значение площади поверхности по сравнению с другими структурами. Максимальной площадью обладает упаковка ячеек, построенная методом DEM при всех значениях пористости среды. Упаковка FCC имеет преимущество в площади поверхности до значения пористости $\varepsilon=0,85$.

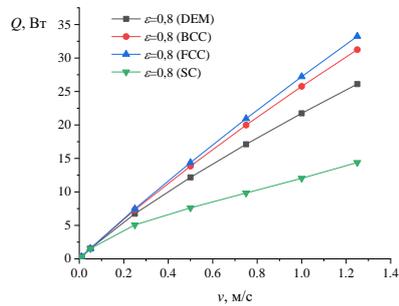
На рисунке 5 (а-е) представлены кривые изменения теплового потока в зависимости от скорости при пористостях среды: $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$.



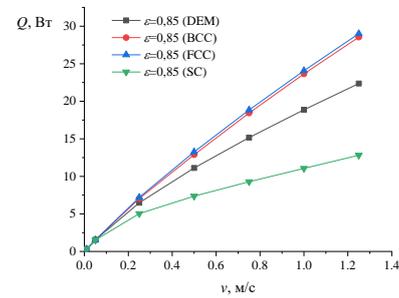
а)



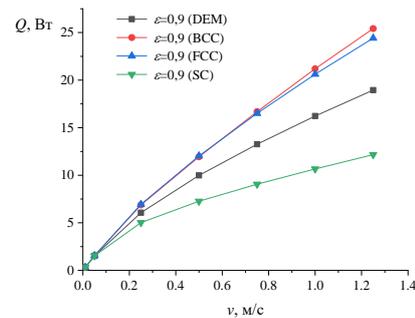
б)



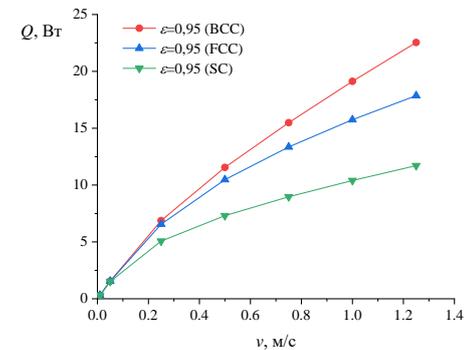
в)



г)



д)



е)

Рис. 5. Зависимость теплового потока от скорости для упаковок ячеек с пористостью: а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

Fig. 5. Heat flow dependence on speed for porous cell packaging: а) $\varepsilon=0.7$; б) $\varepsilon=0.75$; в) $\varepsilon=0.8$; г) $\varepsilon=0.85$; д) $\varepsilon=0.9$; е) $\varepsilon=0.95$

Из графиков видно, что при скоростях потока воздуха 0,01 и 0,05 м/с все исследованные структуры демонстрируют близкие значения теплового потока. Отличия становятся заметны при скоростях потока 0,25-1,25 м/с. При пористости среды $\varepsilon=0,7$ (рис. 5а) на скоростях 0,25-1,25 м/с значения выше демонстрирует упаковка ВСС. Прирост теплового потока в сравнении с DEM составляет 4,1-12,2% в зависимости от скорости:

чем выше скорость, тем больше прирост теплового потока. При пористости среды $\varepsilon=0,75$ (рис. 5б) большой демонстрирует упаковка ячеек FCC. Прирост теплового потока относительно ВСС составляет 1,9-7,6%. При пористости среды $\varepsilon=0,8$ (рис. 5в) также наблюдается прирост теплового потока у структуры FCC относительно ВСС (на 2,1-6,4%). При пористости среды $\varepsilon=0,85$ (рис. 5г) прирост теплового потока упаковки FCC относительно ВСС составляет $\sim 2\%$. При пористости среды $\varepsilon=0,9$ (рис. 5д) на скоростях потока воздуха 0,25 и 0,5 м/с значения выше так же демонстрирует упаковка FCC. ВСС уступает незначительно (на 0,89; 0,77%), а при скоростях 0,75-1,25 м/с упаковке ВСС соответствуют значения выше FCC на 1,1-4,1%. Упаковка ячеек ВСС с большей пористостью ($\varepsilon=0,95$) показывает значения теплового потока выше, чем структура FCC с той же пористостью (рис. 5е). Упаковке SC при всех значениях пористости соответствует наименьшее значение теплового потока, что объясняется наименьшей площадью поверхности структуры данной геометрии.

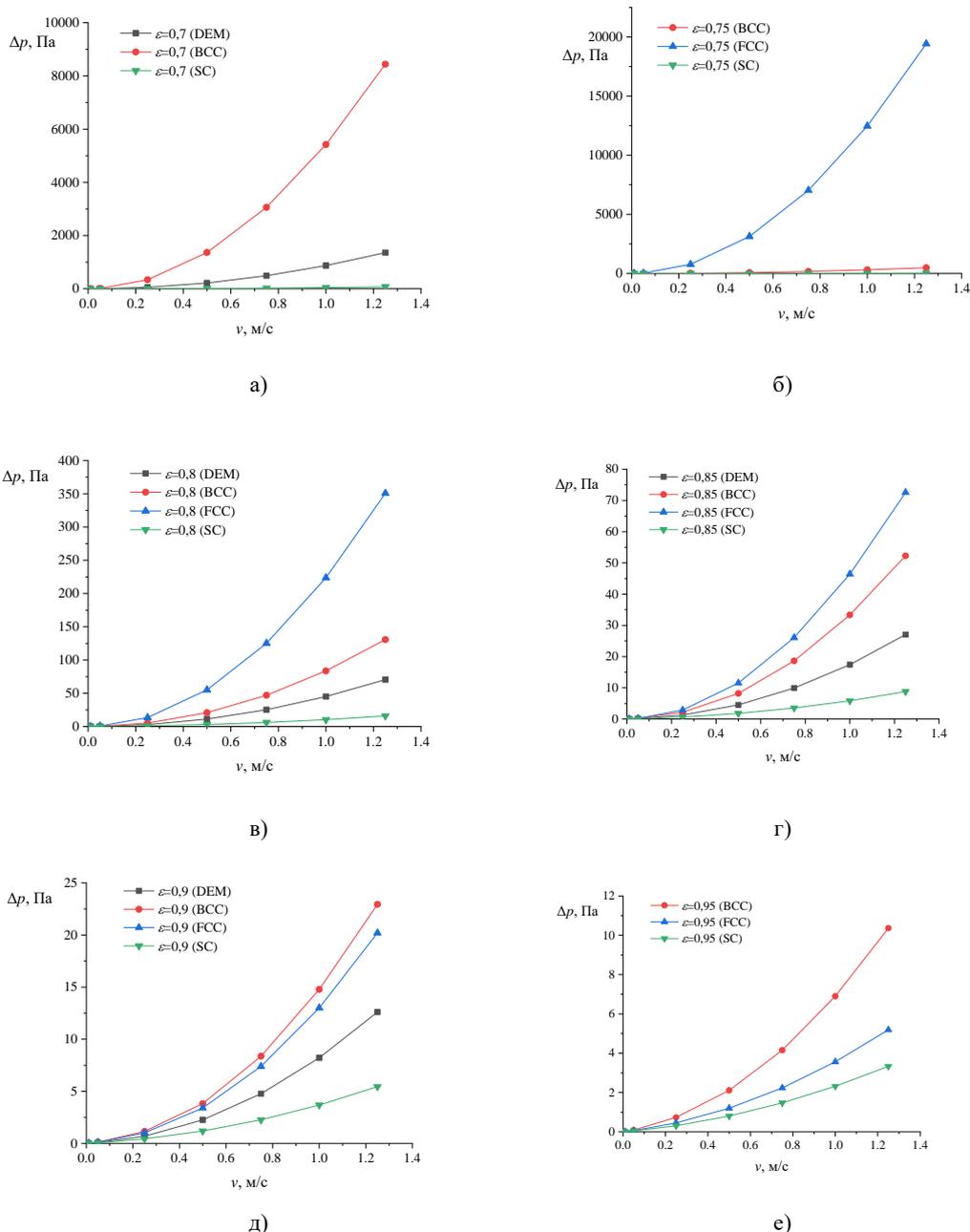


Рис. 6. Зависимость перепада давления от скорости для упаковок ячеек с пористостью: а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

Fig. 6. Pressure Differential Velocity Dependence for Porous Cell Packaging: а) $\varepsilon=0.7$; б) $\varepsilon=0.75$; в) $\varepsilon=0.8$; г) $\varepsilon=0.85$; д) $\varepsilon=0.9$; е) $\varepsilon=0.95$

На рисунке 6 (а-е) представлены графики изменения перепада давления в зависимости от скорости при пористостях среды: $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$. При пористостях среды $\varepsilon=0,7$ и $\varepsilon=0,75$ наблюдается заметный рост перепада давления для упаковок ВСС и FCC соответственно. Это связано с особенностями построения геометрии данных упаковок, а именно с малым диаметром отверстий пористой среды, который усложняет прохождение потока воздуха через упаковку ячеек. При пористостях среды $\varepsilon=0,8$ и $\varepsilon=0,85$ наибольший перепад давления соответствует упаковке ячеек FCC, а при пористостях $\varepsilon=0,9$ и $\varepsilon=0,95$ – упаковке ВСС. Перепад давления для случая упаковки ячеек SC при всех пористостях оказывается меньше, чем для упаковок DEM, ВСС и FCC.

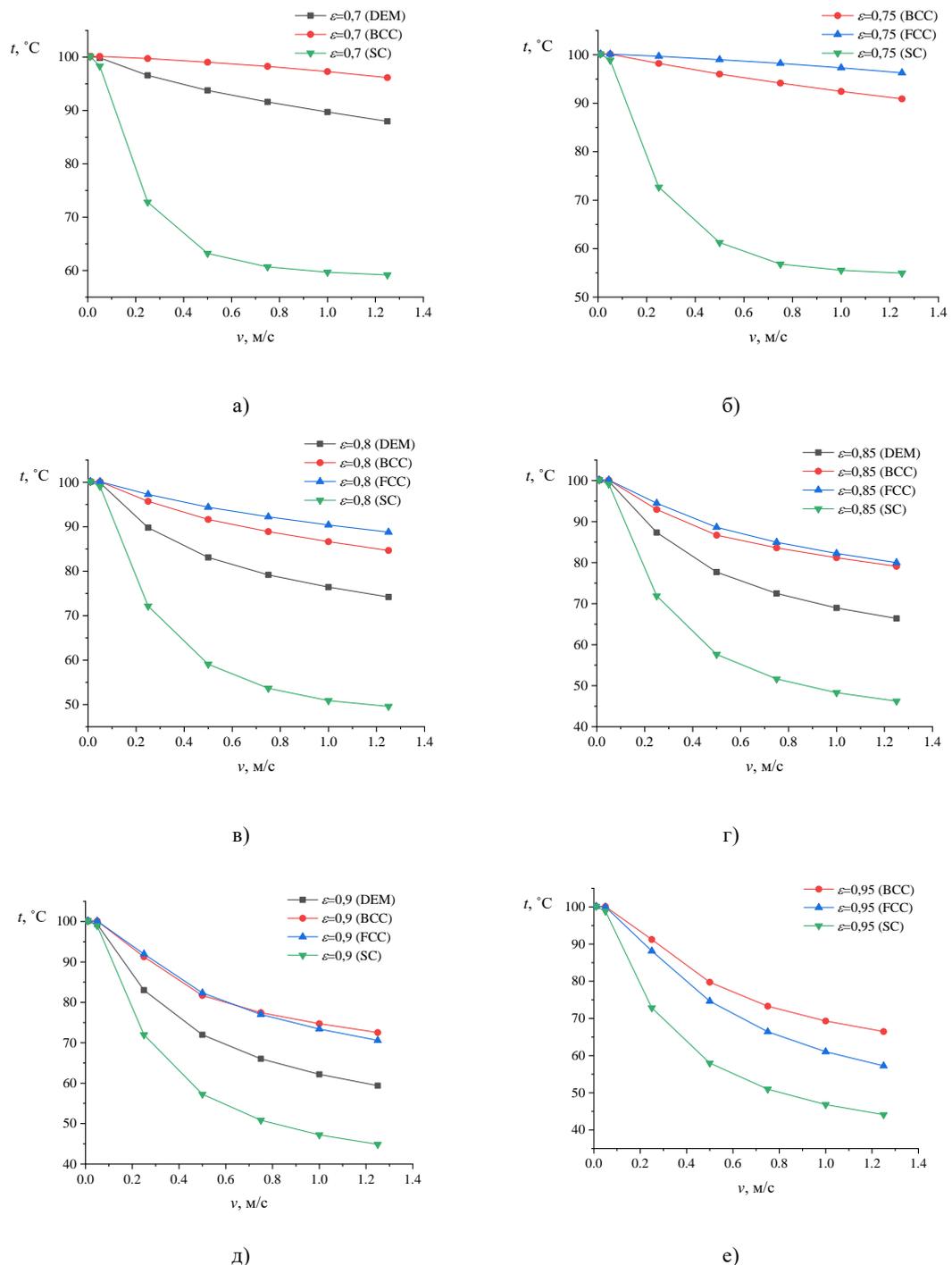


Рис. 7. Зависимость температуры воздуха на выходе из расчетной области от скорости для упаковок ячеек с пористостью: а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

Fig.. 7. Air temperature at the outlet from the design area depends on the speed for cell packages with porosity: а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

На рисунке 7 (а-е) представлены кривые изменения температуры воздуха на выходной границе расчетной области. Из графиков видно, что, как и в случае с тепловым потоком, при скоростях воздуха 0,01 и 0,05 м/с структуры показывают близкие значения температуры на выходе. Отличия становятся заметны при скоростях потока воздуха 0,25-1,25 м/с. В случае пористостей среды $\varepsilon=0,7$ (рис. 7а) и $\varepsilon=0,95$ (рис. 7е) наибольшая температура на выходе соответствует упаковке ячеек ВСС. При пористостях среды $\varepsilon=0,75$ (рис. 7б), $\varepsilon=0,8$ (рис. 7в), $\varepsilon=0,85$ (рис. 7г) наибольшая температура на выходе соответствует упаковке FCC. При пористости среды $\varepsilon=0,9$ (рис. 7д) на скоростях потока воздуха 0,25 и 0,5 м/с значения выше так же демонстрирует упаковка FCC. ВСС уступает незначительно, а при скоростях 0,75-1,25 м/с упаковке ВСС соответствуют значения на 0,5-2°C выше FCC. Самая низкая температура воздуха на выходе из расчетной области в каждом из случаев соответствует упаковке ячеек SC.

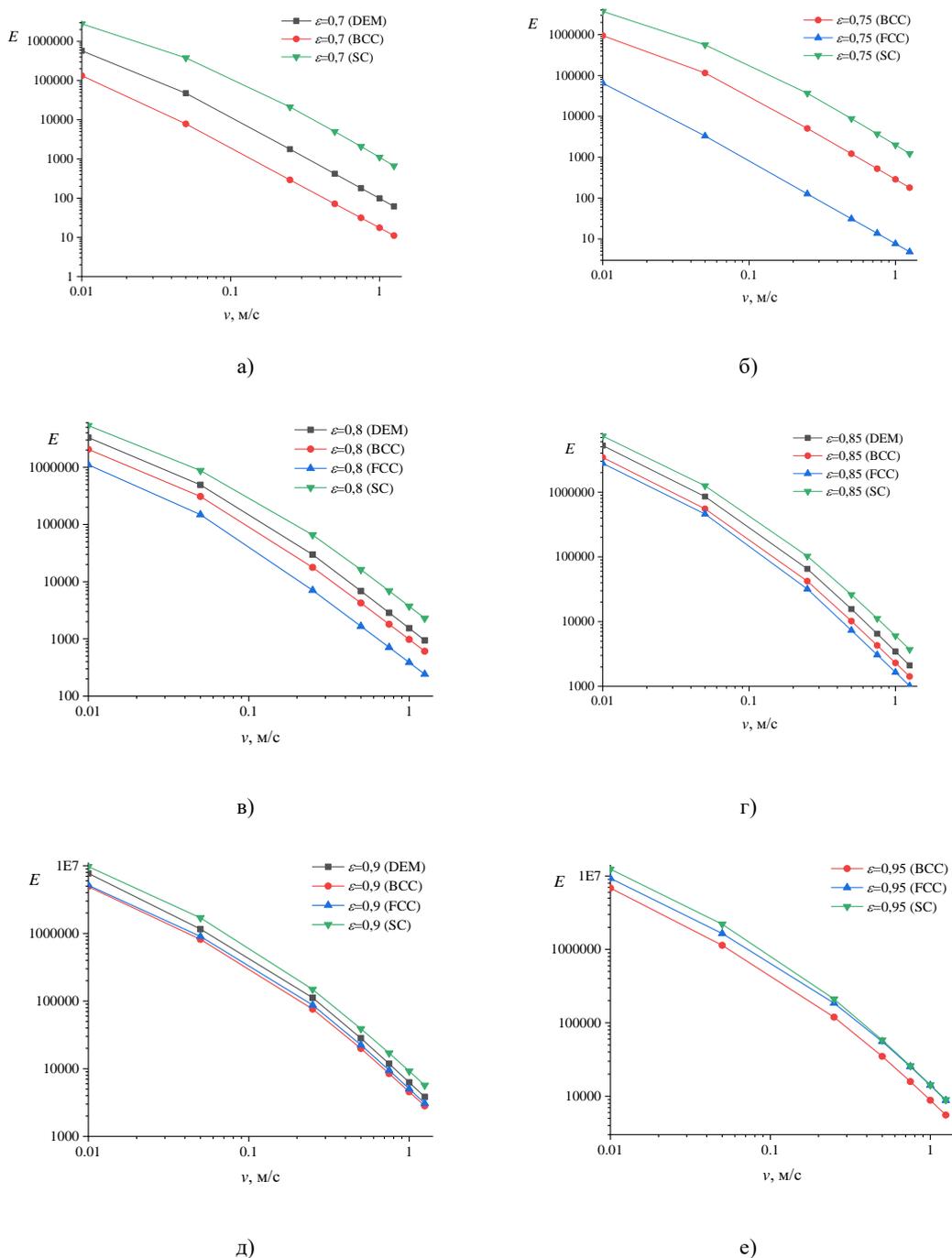


Рис. 8. Зависимость показателя энергетической эффективности от скорости для упаковок ячеек с пористостью: а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

Fig. 8. The energy efficiency ratio depends on the speed for cell packages with porosity а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$

Показатель энергетической эффективности определялся как отношение теплового потока к мощности, требуемой на прокачку теплоносителя через пористую вставку. Исследования изменения показателя энергетической эффективности в зависимости от скорости (рис. 8, а-е) показали, что при всех исследованных расчетных скоростях 0,01-1,25 м/с и пористостях $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$ наибольшее значение энергетической эффективности показывает упаковка ячеек SC, несмотря на наименьшие значения теплового потока (рис. 5). Это объясняется тем, что данная структура обеспечивает наименьшие значения перепада давления, и соответственно для прокачки теплоносителя через пористую вставку со структурой SC требуется меньше мощности.

Понижение энергоэффективности при использовании упаковок DEM, BCC и FCC относительно SC продемонстрировано на рисунке 9 (а-е).

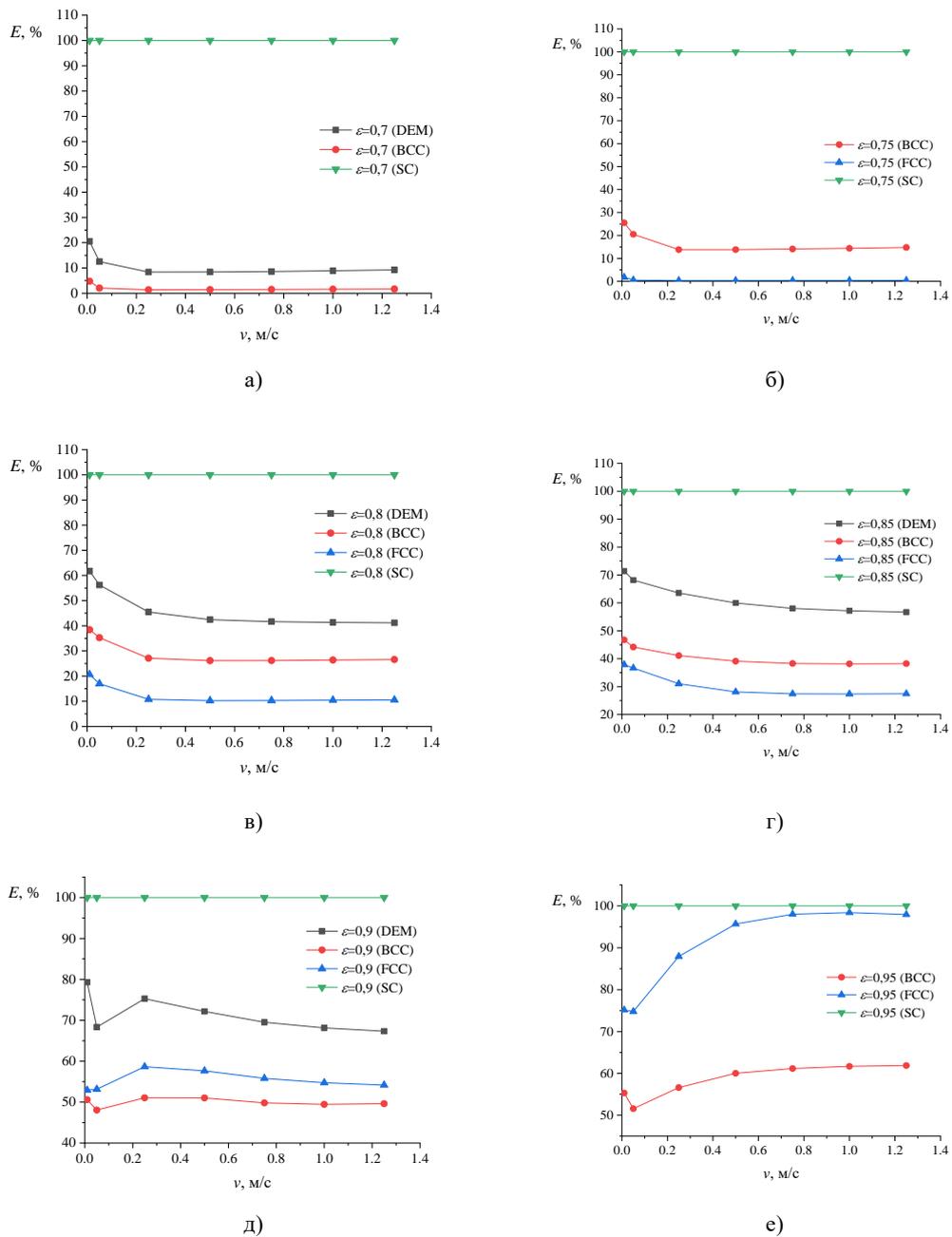


Рис. 9. Зависимость показателя энергетической эффективности от скорости потока воздуха в процентах относительно упаковки ячеек SC для упаковок с пористостью:

Fig. 9. The energy efficiency indicator depends on the percentage of the air flow rate relative to the packaging of SC cells for porous packages:

а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$; е) $\varepsilon=0,95$.
а) $\varepsilon=0,7$; б) $\varepsilon=0,75$; в) $\varepsilon=0,8$; г) $\varepsilon=0,85$; д) $\varepsilon=0,9$;
е) $\varepsilon=0,95$.

При пористостях среды $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$ при всех расчетных скоростях наименьшее значение энергоэффективности соответствует упаковке ВСС. При пористостях $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$ меньшие значения энергоэффективности демонстрирует упаковка FCC. Это связано с высоким перепадом давления упаковок FCC/ВСС и низким перепадом давления SC при данных пористостях среды. Однако при пористости среды $\varepsilon=0,95$ прирост энергоэффективности при использовании для теплообмена упаковки SC относительно FCC на скоростях 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с составляет только 4,33; 1,99; 1,60; 2,06% соответственно, что можно объяснить высокими значениями теплового потока и близким к SC перепадом давления упаковок FCC при данной пористости среды.

Выводы

В данной работе проведены численные и экспериментальные исследования влияния геометрии пористой вставки и значения пористости на тепловой поток и перепад давления. Были созданы модели высокопористых сред со структурами в виде простой кубической решетки (SC), гранецентрированной кубической решетки (FCC), объемно-центрированной кубической решетки (ВСС) и со случайной структурой, построенной методом дискретных элементов (DEM). Численное моделирование проводилось в ANSYS Fluent (v.19.2) при следующих скоростях потока воздуха: 0,01; 0,05; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 м/с. Задавались следующие значения пористости: $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$. Результаты численных расчетов показали, что при всех исследованных скоростях потока воздуха и пористостях среды наименьшие значения теплового потока и перепада давления демонстрирует структура SC. При пористостях среды $\varepsilon=0,75$; $\varepsilon=0,8$; $\varepsilon=0,85$ наибольший тепловой поток обеспечивает структура FCC, что объясняется большой площадью поверхности структуры при данных значениях пористости. При пористостях среды $\varepsilon=0,7$; $\varepsilon=0,9$; $\varepsilon=0,95$ большее значение площади поверхности соответствует структуре ВСС, и при данных пористостях наибольшее значение теплового потока также соответствует структуре ВСС. Перепад давления менялся в зависимости от пористости вставки и скорости потока воздуха. Увеличение скорости потока приводит к увеличению перепада давления, в то время как увеличение пористости вставки, наоборот, приводит к снижению перепада давления. При пористостях среды $\varepsilon=0,7$ и $\varepsilon=0,75$ наблюдается рост перепада давления для случая упаковок ВСС и FCC, что объясняется особенностями построения геометрии данных типов упаковок. При пористости среды $\varepsilon=0,8$ наибольший перепад давления соответствует упаковке ячеек FCC. При скоростях потока воздуха 0,25-1,25 м/с и пористости среды $\varepsilon=0,7$ наибольшие значения перепада давления показывает упаковка ВСС. При указанных скоростях потока, пористостях $\varepsilon=0,75$ и $\varepsilon=0,8$ наибольший перепад давления демонстрирует упаковка FCC. При скоростях 0,25-1,25 м/с и пористости $\varepsilon=0,85$ наибольшие значения перепада давления и теплового потока соответствуют упаковке ячеек FCC, при пористостях $\varepsilon=0,9$ и $\varepsilon=0,95$ большие значения обеспечивает упаковка ячеек ВСС. Исследования энергетической эффективности показали, что, несмотря на наименьшие значения теплового потока, структура SC обеспечивает наибольшую энергоэффективность благодаря низкому перепаду давления, возникающему при прохождении потока воздуха через данную структуру.

Литература

1. Rydalina N., Antonova E., Akhmetova I., et al. Analysis of the Efficiency of Using Heat Exchangers with Porous Inserts in Heat and Gas Supply Systems // Energies. 2020. Vol. 13, N22. pp. 1-13.
2. Kim J., Sibilli T., Ha M.Y., et al. Compound porous media model for simulation of flat top U-tube compact heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 138. pp. 1029-1041.
3. Li Z., Ding Y., Liao Q., et al. An approach based on the porous media model for numerical simulation of 3D finned-tubes heat exchanger // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. Vol. 173. pp. 1-12.
4. Jayan N., Bhatlu M., Sukanya K., et al. Heat transfer augmentation approach in double pipe heat exchanger // Journal of Critical Reviews. 2020. Vol. 7, N7. pp. 791-794.
5. Souayah B., Hdhiri N. Mixed convective heat transfer and heat generation simulation in lid-driven enclosure filled with porous medium // International Journal of Modern Physics C.

2021. Vol. 32, N8. pp.2150106.

6. Rashidi S., Kashefi M. H., Kim K. C., et al. Potentials of porous materials for energy management in heat exchangers—A comprehensive review // *Applied energy*. 2019. Vol. 243. pp. 206-232.

7. Rashidi S., Hormozi F., Doranehgard M. H. Abilities of porous materials for energy saving in advanced thermal systems // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021. Vol. 143, N3. pp. 2437-2452.

8. Puchor T., Lenhard R., Malcho M., et al. Heat transfer distribution inside porous media as replacement for finned heat exchanger // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC. 2019. Vol. 2118, N1. pp.1-8.

9. Zhao C. Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55, N13-14. pp. 3618-3632.

10. Yang H., Li Y., Ma B., et al. Review and a Theoretical Approach on Pressure Drop Correlations of Flow through Open-Cell Metal Foam // *Materials*. 2021. Vol. 14, N12. pp. 1-18.

11. August A., Nestler B. About the surface area to volume relations of open cell foams // *Engineering Research Express*. 2020. Vol. 2, N1. pp. 1-9.

12. Bose J. R., Manova S., Asirvatham L. G., et al. Comprehensive case study on heat transfer enhancement using micro pore metal foams: From solar collectors to thermo electric generator applications // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 27. pp. 101333.

13. Соловьева О.В., Яфизов Р.Р., Соловьев С.А. Определение эффективной длины пористой структуры при конвективном теплообмене // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2020. Т. 12. № 3(47). С. 113-122.

14. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Талипова А.Р., и др. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 56-64.

15. Rydalina N., Stepanov O., Antonova E. The use of porous metals in the design of heat exchangers to increase the intensity of heat exchange // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2020. Vol. 178. pp. 1-5.

16. Ahmed H. E., Fadhil O. T., Salih W. A. Heat transfer and fluid flow characteristics of tubular channel partially filled with grooved metal foams // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 108. pp. 1-14.

17. Baragh S., Shokouhmand H., Ajarostaghi S. S. M., et al. An experimental investigation on forced convection heat transfer of single-phase flow in a channel with different arrangements of porous media // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 134. pp. 370-379.

18. Baragh S., Shokouhmand H., Ajarostaghi S. S. M. Experiments on mist flow and heat transfer in a tube fitted with porous media // *International Journal of Thermal Sciences*. 2019. Vol. 137. pp. 388-398.

19. Nilpueng K., Asirvatham L. G., Dalkılıç A. S., et al. Heat transfer and fluid flow characteristics in a plate heat exchanger filled with copper foam // *Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 56, N12. pp. 3261-3271.

20. Buonomo B., di Pasqua A., Manca O., et al. Evaluation of thermal and fluid dynamic performance parameters in aluminum foam compact heat exchangers // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 176. pp. 1-14.

21. Liu X, Zhang S, Zhou Z, et al. Study on structure optimization of heat exchanger and evaluation index of heat transfer performance // *Huagong Xuebao/CIESC Journal*. 2020. Vol. 71, NS1. pp. 98-105.

22. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams // *Progress in materials science*. 2001. Vol. 46, N6. pp. 559-632.

23. Hossain M. S., Shabani B. Air flow through confined metal foam passage: Experimental investigation and mathematical modelling // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018. Vol. 99. pp. 13-25.

24. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.

Авторы публикации

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры

«Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Инженерная кибернетика» (ИК) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, зав. кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ахметова Ирина Гареевна – д-р техн. наук, заведующая кафедрой «Экономика и организация производства» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Талипова Азалия Радиковна – магистрант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Rydalina N, Antonova E, Akhmetova I, et al. Analysis of the Efficiency of Using Heat Exchangers with Porous Inserts in Heat and Gas Supply Systems. *Energies*. 2020; 13(22):1-13. doi: 10.3390/en13225854
2. Kim J, Sibilli T, Ha M Y, et al. Compound porous media model for simulation of flat top U-tube compact heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019; 138: 1029-1041. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.116>.
3. Li Z, Ding Y, Liao Q, et al. An approach based on the porous media model for numerical simulation of 3D finned-tubes heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 173:1-12. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121226
4. Jayan N, Bhatlu M, Sukanya K, et al. Heat transfer augmentation approach in double pipe heat exchanger. *Journal of Critical Reviews*. 2020; 7(7): 791-794. doi:10.1007/s00231-016-1838-x
5. Souayah B, Hdhiri N. Mixed convective heat transfer and heat generation simulation in lid-driven enclosure filled with porous medium. *International Journal of Modern Physics C*. 2021; 32(8): 2150106. doi:10.1142/S0129183121501060
6. Rashidi S, Kashefi M H, Kim K C, et al. Potentials of porous materials for energy management in heat exchangers—A comprehensive review. *Applied energy*. 2019; 243:206-232. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.200
7. Rashidi S, Hormozi F, Doranehgard M H. Abilities of porous materials for energy saving in advanced thermal systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2021; 143(3):2437-2452. doi:10.1007/s10973-020-09880-9
8. Puchor T, Lenhard R, Malcho M, et al. Heat transfer distribution inside porous media as replacement for finned heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing LLC. 2019; 2118(1): 1-8. doi:10.1063/1.5114766
9. Zhao C Y. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012; 55(13-14): 3618-3632. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.017
10. Yang H, Li Y, Ma B, et al. Review and a Theoretical Approach on Pressure Drop Correlations of Flow through Open-Cell Metal Foam. *Materials*. 2021; 14(12): 1-18. doi:10.3390/ma14123153
11. August A, Nestler B. About the surface area to volume relations of open cell foams. *Engineering Research Express*. 2020; 2(1): 1-9. doi:10.1088/2631-8695/ab6ac6
12. Bose J R, Manova S, Asirvatham L G, et al. Comprehensive case study on heat transfer enhancement using micro pore metal foams: From solar collectors to thermo electric generator applications. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 27:101333. doi:10.1016/j.csite.2021.101333
13. Soloveva O.V., Yafizov R.R., Solovov S.A. The porous structure effective thickness determination in the case of convective heat exchange. *Kazan State Power Engineering*

University Bulletin. 2020; 12(3):113-122.

14. Soloveva O.V., Solovev S.A., Talipova A.R., et al. Study of the influence of the porosity of a fibrous material on the energy efficiency value. *Kazan State Power Engineering University Bulletin*. 2022; 14(1):56-64.

15. Rydalina N, Stepanov O, Antonova E. The use of porous metals in the design of heat exchangers to increase the intensity of heat exchange. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2020; 178:1-5. doi:10.1051/e3sconf/202017801026

16. Ahmed H E, Fadhil O T, Salih W A. Heat transfer and fluid flow characteristics of tubular channel partially filled with grooved metal foams. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2019; 108:1-14. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104336

17. Baragh S, Shokouhmand H, Ajarostaghi S S M, et al. An experimental investigation on forced convection heat transfer of single-phase flow in a channel with different arrangements of porous media. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018; 134:370-379. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.04.030

18. Baragh S, Shokouhmand H, Ajarostaghi S S M. Experiments on mist flow and heat transfer in a tube fitted with porous media. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019; 137:388-398. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.030

19. Nilpueng K, Asirvatham L G, Dalkılıç A S, et al. Heat transfer and fluid flow characteristics in a plate heat exchanger filled with copper foam. *Heat and Mass Transfer*. 2020; 56(12):3261-3271. doi:10.1007/s00231-020-02921-x

20. Buonomo B, di Pasqua A, Manca O, et al. Evaluation of thermal and fluid dynamic performance parameters in aluminum foam compact heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 176:1-14. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.115456

21. Liu X, Zhang S, Zhou Z, et al. Study on structure optimization of heat exchanger and evaluation index of heat transfer performance. *HuagongXuebao/CIESC Journal*. 2020; 71(S1):98-105. doi: 10.11949/0438-1157.20191189

22. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*. 2001; 46(6):559-632. doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5

23. Hossain M. S., Shabani B. Air flow through confined metal foam passage: Experimental investigation and mathematical modelling. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018;99:13-25. doi:10.1016/j.expthermflusci.2018.07.018

24. Bazhan P I, Kanevets G E, Seliverstov V M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam*. Moscow: Mashinostroenie, 1989.

Authors of the publication

Olga V. Soloveva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Sergei A. Solovev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuri V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Irina G. Akhmetova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Rozalina Z. Shakurova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azalia R. Talipova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 20.05.2022г.

Отредактировано 02.06.2022г.

Принято 02.06.2022г.



**ПРИЕМЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СОЗДАНИИ МАЛОСТОЧНОЙ
СИСТЕМЫ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ
ТАТАРСТАН**

Чичиров А.А., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Минибаев А.И.

**Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
aachichirova@mail.ru**

Резюме: *ЦЕЛЬ.* теоретическое обоснование ресурсосберегающих технологий и разработка «концевых» электромебранных установок при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан. *МЕТОДЫ.* В работе использовались приемы системного анализа и была разработана математическая модель для описания движения водных потоков и концентраций веществ в них. Описано задействованное оборудование, сконструированное для экспериментальной и промышленной отработки предлагаемых технологий с техническими характеристиками разработанных аппаратов и установок. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На тепловых электрических станциях по результатам проведенного системного анализа была показана возможность утилизации отходов водоподготовительных установок. Для переработки отходов испарительной водоподготовительной установки Казанской ТЭЦ-3 была реализована электромебранная технология очистки и разделения на двух последовательно соединенных аппаратах диффузионного диализа и электродиализа, позволяющие отделение щелочи от сточных вод и ее концентрирования. Конечными продуктами электромебранной переработки являются щелочной раствор с рН 13,86 и концентрацией ОН ионов 2,7% (до 4%) и умягченный щелоче-солевой раствор. Присутствие солевых компонентов в щелочном растворе обнаруживается в пределах 2% по массе. Щелочной раствор может использоваться в цикле станции для регенерации анионитных фильтров I ступени. Щелоче-солевой раствор не содержит ионов жесткости и может подаваться на подпитку теплосети. Электромебранная установка позволяет перерабатывать за час 0,5 м³ щелочных отходов испарительной водоподготовительной установки. Образуются на выходе концентрированный щелочной раствор и щелоче-солевой раствор в пропорции - 1:9. Электромебранная установка потребляет 6 кВт*ч электроэнергии на переработку 1 м³ сточных вод. Работа установки характеризуется безотходностью и безреагентностью. На ионитной водоподготовительной установке Нижнекамской ТЭЦ-1 был предложен метод, разработана технология и смонтирована экспериментальная опытно-промышленная установка для переработки щелочных отработанных регенерационных растворов анионитных фильтров. Электродиализатор перерабатывает. Производительность установки составляет 1,5 м³ в час щелочных сточных вод с получением 0,15 тонн 4% щелочного раствора и потреблением электроэнергии - 4 кВт*ч на 1 м³ щелочных отработанных растворов. При работе установки отмечается полное отсутствие отходов с безреагентным процессом утилизации сточных вод. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Возврат регенерированных растворов щелочи и умягченной воды в производственный цикл позволяет получить значительное улучшение показателей, характеризующих экологичность и ресурсосбережение без использования химических реагентов.

Ключевые слова: электромебранные технологии; утилизация сточных вод; ТЭС; экономия воды и реагентов.

Для цитирования: Чичиров А.А., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Минибаев А.И. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электромебранные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С.66-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-66-82.

**SYSTEM ANALYSIS METHODS AND RESOURCE-SAVING ELECTROMEMBRANE
TECHNOLOGIES IN CREATING A LOW-FLOW WATER SYSTEM USING OF
TATARSTAN REPUBLIC ENERGY FACILITIES**

AA. Chichirov, AA. Filimonova, ND. Chichirova, AI. Minibaev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

aachichirova@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* theoretical substantiation of resource-saving technologies and development of "terminal" electromembrane installations when creating a low-flow water use system for energy facilities of the Republic of Tatarstan. *METHODS.* In the work, the methods of system analysis were used and a mathematical model was developed to describe it. The description and technical characteristics of the developed devices and installations for testing the proposed technologies are presented. *RESULTS.* At Kazan CHPP-3, a technology was developed and a pilot electromembrane plant was installed for the disposal of blowdown water from the thermal desalination complex. As a result of the operation of the electromembrane unit, a transparent alkaline solution is formed with a pH of 13.86 and a concentration of OH ions of 2.7% (up to 4%). The content of salt components in the concentrate is 2% by weight. The resulting concentrated alkaline solution can be used in the cycle of the station for the regeneration of anion exchange filters of the 1st stage. The softened saline solution is fed to the heating network. The electromembrane plant processes 0.5 tons per hour of alkaline wastewater with a ratio of concentrated alkaline solution to softened brine of 1:9. The specific power consumption is 6 kWh per 1 ton of blowdown water. The operation of the plant is characterized by the complete absence of waste and bezreagnosti. At the ion-exchange water treatment plant of the Nizhnekamsk CHPP-1, a method was proposed, a technology was developed, and an experimental pilot plant was installed for processing alkaline spent regeneration solutions of anion-exchange filters. The electromembrane plant processes 1.5 tons per hour of alkaline waste. The capacity of the plant is 0.1 tons of 4% alkaline solution. Specific power consumption - 4 kWh per 1 ton of alkaline waste solutions. During the operation of the installation, there is a complete absence of waste with a reagent-free wastewater disposal process. *CONCLUSION.* The return of regenerated alkali solutions and softened water to the production cycle makes it possible to obtain a significant improvement in indicators that characterize environmental friendliness and resource saving without the use of chemical reagents.

Keywords: *electromembrane technologies; wastewater disposal; thermal power plants; water and reagents saving .*

For citation: Chichirov AA., Filimonova AA., Chichirova ND., Minibaev AI. System analysis methods and resource-saving electromembrane technologies in creating a low-flow water system using of Tatarstan Republic energy facilities. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):66-82. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-66-82.

Введение

Предприятие энергетического сектора, как и любой другой промышленный объект, потребляет природную воду и сбрасывает загрязненные стоки. Однако, объемы воды, которыми оперирует тепловая электрическая станция (ТЭС), особенно в случае отпуска пара, не сравнятся ни с одним другим промышленным потребителем, что, несомненно, оказывает неблагоприятное воздействие на экологию водоемщиков региона воздействия. В соответствии с Государственным докладом «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году», подготовленным Минприроды России, а также согласно данным Федерального агентства водных ресурсов и отдела водных ресурсов по Республике Татарстан (РТ) Нижне-Волжского бассейнового водного управления Федерального агентства водных ресурсов (Росводресурсы) [1], электроэнергетика является самым значимым российским водопользователем (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Ежегодное воздействие на водные ресурсы энергосистемы регионального и федерального масштабов

	относит, %	Республика Татарстан		относит, %	РФ	
		энергетика, млн. м ³	общий, млн. м ³		энергетика, млн. м ³	общий, млн. м ³
Забор «свежей» воды	35,4	247,2	698,5	43	22106	51163,8
Забор «свежей» воды на производственные цели	55,4	232,2	419,2	78,5	20903	26615,8
Сброс сточных вод	39	215,4	547,8	51	19265	37666
Сброс загрязненных сточных вод	7,5	20,7	276	11,4	1445	12602

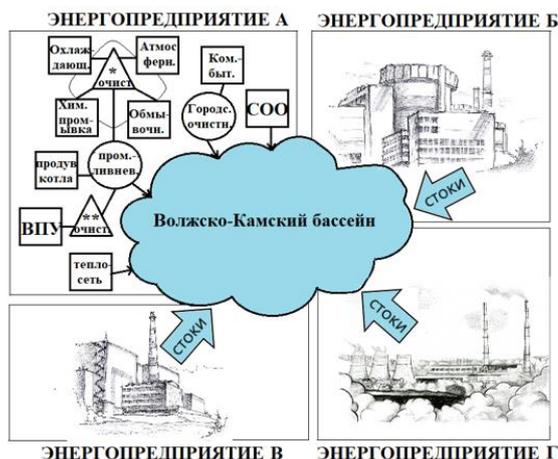


Рис. 1. Схематичный рисунок энергосистемы региона РТ Fig. 1. Schematic drawing of the Tatarstan Republic energy system

Структура сточных вод энергопредприятий представлена 51,1% - нормативно-чистыми, 7,4% - загрязненными, 3,9% - нормативно-очищенными.

Больше всего в стоках из загрязняющих веществ содержатся сульфаты и хлориды, попадающие, в том числе со сточными водами водоподготовительных установок объектов энергетики [2]. «По данным Управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по Республике Татарстан более 80% предприятий, имеющих очистные сооружения и осуществляющих сброс сточных вод в водоёмы, не выполняют их очистку до показателей, заложенных в проектах нормативов допустимых сбросов, определяющих максимальную концентрацию вредных веществ.» из Государственного доклада «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году», который был опубликован в 2021 г.

Анализ обращения с отходами для предприятий энергетического сектора показывает, что от 10 до 30% их общего количества повторно потребляется на самих энергопредприятиях. Продувка системы оборотного охлаждения используется в качестве исходной воды для водоподготовительной установки, промывочные воды фильтров применяются для последующего их взрыхления, сжигание нефтесодержащих отходов в котлах и недопал извести проводится для планировки территории и др. От 10 до 45% общего количества отходов вывозится на санкционированные свалки. Около 50% общего количества отходов размещается в шламохранилищах и объектах временного хранения электростанций [3].

В странах Европы и США создание бессточной ТЭС основано преимущественно на технологии выпаривания стоков с получением обезвоженных отходов [4]. Очевидные преимущества этого метода, заключающиеся в простоте, отсутствии сложных многосоставных схем переработки, минимальном количестве стоков, получении твердых отходов, пригодных для последующего сжигания или захоронения, все же не делают выпаривание оптимальным решением по обращению со сточными водами. Технология, основанная на термическом подходе, являет собой пример экологического максимализма и оправдана при использовании дешевых и экологически чистых топливных ресурсов, например, сбросного тепла ТЭС. В противном случае в соответствии со вторым и третьим законами динамического внутреннего равновесия Б. Коммонера уменьшаются сбросы в одном регионе за счет несоизмеримо больших сбросов в других. Также выпаривание стоков не решает глобальную проблему работы водоподготовительных установок, заключающуюся в превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) по загрязняющим веществам в сбрасываемых водах.

Другое крайнее решение в области водоподготовки - экономический максимализм (стремление к минимуму затрат на очистку воды) связано со стремлением получить от природы максимум возможностей с минимумом затрат с учетом того, что будущее принесет новые возможности. При реализации данного подхода оказывается, что технология, рассчитанная на обессоливание воды среднего уровня минерализации, через некоторое время уже становится неприемлемой к обессоливанию воды из данного водоисточника из-за повышения его минерализации за счет сброса высокоминерализованных стоков. Примером экономического максимализма является решение разбавления стоков до норм ПДК на конкретном энергопредприятии.

Альтернативным подходом, основанным на экологичном подходе ко всему природопользованию, является концепция повышения коэффициента водооборота на станциях [5, 6]. Согласно данной концепции необходимо осуществление полной переработки сточных вод, производящихся на объекте энергетики, с получением отдельных ценных ресурсов и воды, и последующий возврат их в производственный цикл.

К ценным ресурсам, которые могут быть сохранены и (или) извлечены при утилизации отходов объектов энергетики, относятся:

- Вода;
- Химические реагенты;
- Металлы;
- Органические вещества;
- Нефтепродукты;
- Топливо;
- Расходные материалы;
- Оборудование.

Обращение со сточными водами, направленное на их утилизацию, подобно раздельному сбору мусора, предполагает разработку определенных технологий для каждого узла, блока или подсистемы объекта энергетики, учитывающих виды, происхождение, состав, объем, экологическую опасность образующихся отходов. Такой индивидуальный подход, использующий «бессточные» методы, позволяет максимально полно разделять жидкие отходы, получать из них ценные компоненты и воду и возвращать их в цикл энергопредприятия, либо эффективно использовать, а не подвергать захоронению либо складированию на полигонах.

Ресурсосберегающие операции с утилизацией отходов, возможно, разделить на три большие группы по механизму переработки:

- Использование высокоэффективных и технологичных установок по переработке стоков и отходов «в конце» цикла;
- Использование приемов химической технологии;
- Совершенствование имеющихся схем, технологий и аппаратов.

Электромембранные технологии наилучшим образом подходят для реализации концепции экономики замкнутого цикла тепловых электрических станций в качестве ключевого оперативного инструмента достижения поставленных целей, сфокусированных преимущественно на проблеме уменьшения объемов захоронения отходов [7], в частности при создании «бессточных» и «малосточных» ТЭЦ и рациональном использовании водных ресурсов в тепло- и электроэнергетике. В этой связи электродиализные аппараты (установки) идеально встраиваются в процесс водоподготовки в «конце» цикла [8, 9].

Промышленная деминерализация и очистка сточных вод ТЭЦ являются наиболее важными направлениями применения электромембранных аппаратов в энергетическом секторе.

Одним из главных преимуществ электромембранных технологий можно считать возможность селективного удаления практически любых ионов из растворов, в том числе ионов кальция и магния, т.е. жесткости [10-13]. Следовательно, в водах, в которых отсутствуют нефтепродукты (теплосетевой, продувочной оборотной системы охлаждения, сточных с водоподготовительной установки и др.), с помощью электродиализа реально становится достижимой концепция «бессточности» с циркуляцией ценных ресурсов по замкнутому циклу [14, 15].

Одно из наиболее ценных и уникальных приложений электромембранных технологий - это возможность селективного разделения веществ. К направлениям, предназначенным исключительно для разделения компонентов смесей, производства новых соединений, концентрирования и селективного извлечения ионов или молекул из растворов и пр., относятся биполярный электродиализ, диффузионный диализ, электродиализ Доннана, селективный электродиализ, электродиализный метатезис и др. [16-19]. На ТЭЦ эти направления используются, в том числе, с целью утилизации отработанных регенерационных и отмывочных растворов ионитной водоподготовительной установки, т.е. преобразования высокоминерализованных солевых растворов в кислоту и щелочь [20]. Электродиализное концентрирование соляной кислоты из отработанных растворов Н-катионитных фильтров на электродиализной установке с получением 5% раствора было проведено в работе [24]. Этой концентрации кислоты достаточно для повторного использования при регенерации катионита. В качестве дополнительного продукта получается сильно разбавленный раствор, который легче утилизировать или повторно использовать. Диффузионный диализ применяется за рубежом в бумажной

промышленности, при обработке отходов травления алюминии. Он редко применяется для разделения щелочесодержащих растворов, в основном для разделения кислотосодержащих. Ни диффузионный диализ, ни электродиализ для разделения щелочных отработанных растворов на ТЭЦ ранее не применялись.

Энергопотребление для переработки концентрированных сточных вод с разделением их биполярным электродиализом в среднем составляет 2,5 – 2,7 кВт·ч/кг [21]. В связи с большими энергозатратами, последние исследования направлены на разработку решений, связанных с потреблением меньшего количества энергии. Например, Занг с соавторами [22] объединили диффузионный диализ, электродиализ и биполярный электродиализ, чтобы сократить время операции и снизить потребление энергии. Некоторые литературные данные показывают, как биполярный электродиализ может работать с очень низкими энергозатратами, особенно при использовании идеально проводящих и проницаемых мембран [23]. Тем не менее, при выходе с лабораторного уровня на промышленный, энергопотребление становится значительно больше за счет фактического омического сопротивления мембранного пакета, диффузионных потерь и неидеальной проницаемости гомополярных и биполярных мембран.

Несмотря на явные экологические и экономические преимущества, ресурсосберегающие приложения электродиализа сталкиваются с рядом технических и материальных трудностей. К ним относятся стоимость и неидеальные характеристики мембран (ограниченная проницаемость и электроосмос), а также проблемы, связанные с недостаточной чистотой выходящих продуктов.

Исходя из срока эксплуатации мембранных модулей, можно прийти к выводу, что данные технологии не подходят для переработки больших объемов сильно загрязненных сточных вод. Гораздо эффективнее их применять для узконаправленных целей, например, по выделению ценных компонентов либо использовать в комбинации с другими методами очистки (баромембранными, ионным обменом и др.). Такие комбинации потенцируют взаимное действие, способствуя достижению максимального эффекта очистки, с наименьшими экологическими и материальными затратами, одновременно позволяя применять все положительные эффекты совокупности задействованных методов водообработки.

Электромембранные методы показали себя в качестве эффективных технологий в области охраны окружающей среды. К неоспоримым преимуществам электромембранных технологий относится их значительное разнообразие, что дает возможность выбрать определенный метод для конкретных целей по переработке и очистке выбросов энерготехнологических комплексов и даже получать в результате переработки стоков электроэнергию [25]. В начале 1950-х годов Паттл создал концепцию способа выработки энергии за счет разности концентраций между солоноватой водой и высокоминерализованными рассолами или речной водой и морской водой – обратный электродиализ (*RED*) [26, 27]. В 2013 году появились первые лабораторные исследования по получению электроэнергии с помощью технологии *RED*. Исследователи определили *RED* как новый способ производства возобновляемой электроэнергии. В 1980-х годах проходили испытания пилотной промышленной установки *RED* на очистной установке крупного нефтеперерабатывающего завода *STANIC Industria Petrolifera* в г. Ливорно (Италия) [28], с целью изучения возможности утилизации стоков, ранее сбрасываемых в море. Было продемонстрировано, что установка *RED* эффективна для регенерации сточных вод, что позволяет их повторное использование для подачи в градирни и питания бойлерной установки. На основании полученных результатов было решено проведение строительства полномасштабной *RED* станции с производительностью 170–190 м³/ч по обессоленной воде.

Таким образом, ресурсосберегающие технологии, направленные на утилизацию сточных вод и отходов энергопредприятия, показывают значительные экологические и экономические преимущества в сравнении с методами очистки стоков без утилизации и выделения ценных ресурсов. А разработка «бессточных» и «малосточных» проектов для предприятий энергетической и промышленной сферы с использованием новых методов и их комбинаций (электро-, баромембранных, ионообменных и др.), несмотря на некоторые сложности при реализации и сопутствующие ограничения, является актуальной проблемой.

Научная новизна и практическая значимость работы заключается в развитии идеи комплексной переработки жидких отходов энергетических предприятий, выделения из них химических компонентов, что позволяет повторно использовать воду и ценные ресурсы в технологических процессах.

В связи с вышесказанным, с целью создания ресурсосберегающих малосточных систем водопользования объектов энергетики, необходимо проведение анализа и отбора водных сбросных потоков на ТЭС, пригодных для переработки «концевыми» электромембранными установками с выделением из них ценных компонентов с последующей их утилизацией и апробация предлагаемых технологий в промышленных масштабах.

Материалы и методы

Для научного описания системы применяется методический подход - системный анализ, с целью составления модели энергопроизводства, отображающей его структуру и позволяющей предсказывать те или иные свойства и показатели. Построение полной модели всего производства является сложным и трудоемким процессом, поэтому в соответствии с целями и задачами настоящей работы была составлена модель части энерготехнологической системы, включающая аппараты и связи (потоки), относящиеся к водообороту объекта энергетики.

Этапы проведения системного анализа энерготехнологической системы:

1. Выделение элементов, определяющих свойства энерготехнологической системы, изучаемых на проводимом этапе исследования и разработки технологического процесса, к которым можно отнести отдельный аппарат или их совокупность.

2. Установление зависимости выходных потоков от входных для каждого элемента, т.е. получение математической модели, и определение ее свойств и особенностей. Описание математической модели основывается на физико-химических и физических закономерностях, протекающих в них процессов.

3. Выделение связей между элементами, ответственных за проявление необходимых свойств энерготехнологической системы.

4. Исследование энерготехнологической системы – расчет показателей, определение свойств (особенностей), изучение развития, изменений для улучшения ее показателей и свойств.

В соответствии с законами сохранения массы и энергии для каждого элемента энерготехнологической системы в стационарном состоянии должны соблюдаться следующие соотношения:

Сохранения массы для потоков

$$\sum G_{j,вх} = \sum G_{l,вых} \quad (1)$$

Сохранение массы для каждого i -го компонента

$$\sum G_{ij,вх} + \sum G_{ik,ист} = \sum G_{il,вых} \quad (2)$$

Сохранение энергии

$$\sum Q_{j,вх} + \sum Q_{k,ист} = \sum Q_{l,вых}, \quad (3)$$

где $G_{j,вх}$, $G_{l,вых}$ – массы входящих и выходящих потоков;

$G_{ij,вх}$, $G_{il,вых}$ – массы i -го компонента во входящих и выходящих потоках;

$G_{ik,ист}$ – источники i -го вещества внутри системы в результате, в основном, химических превращений (для образующихся веществ $G_{ik,ист} > 0$, для расходуемых - $G_{ik,ист} < 0$, для нереагирующих - $G_{ik,ист} = 0$);

$Q_{j,вх}$, $Q_{l,вых}$ – теплота входящих и выходящих потоков;

$Q_{k,ист}$ – источники теплоты внутри системы, которыми могут быть химические реакции, фазовые превращения, изменения импульса потока (сжатие, расширение).

Предлагаемые ресурсосберегающие технологии разрабатывались и экспериментально отработывались на специально сконструированных для этих целей аппаратах и установках различного уровня инженерно-конструкторского воплощения - лабораторном, макетном, опытно-промышленном, промышленном. Для исследований лабораторного уровня была создана электромембранная ячейка, в которой общее количество рабочих камер не превышало 5 (рис. 2).

Для проведения испытаний по электромембранной переработке модельных и промышленных растворов действующей ТЭС макетного уровня был разработан лабораторный электромембранный стенд (рис. 3), представленный электродиализатором с общим количеством камер 120, и максимальной производительностью по одному тракту до 1000 дм³/час.



Рис. 2. Лабораторная электромембранная ячейка с тремя камерами

Fig. 2. Laboratory electromembrane cell with three chambers



Рис. 3. Лабораторный электромембранный стенд
Fig. 3. Laboratory electromembrane stand

Отработка промышленного уровня апробации технологий проводилась на Нижнекамской ТЭЦ-1. В химцехе была построена экспериментальная опытно-промышленная установка, в которой количество камер составило 200 штук, было осуществлено чередование катион-, анионообменных мембран, а способность перерабатывать высокоминерализованные растворы составила 1,5 м³/час по сточным водам (рис. 4).

На Казанской ТЭЦ-3 опытно-промышленная электромембранная установка по переработке и утилизации продувочных вод испарительного водоподготовительного комплекса включала блок электромембранных аппаратов. В каждом аппарате количество рабочих камер составляло 200. Производительность установки по переработке высокоминерализованных растворов сточных вод составляла 0,5 м³ в час (рис. 5).



Рис. 4. Устройство и состав оборудования электромембранной установки переработки высокоминерализованных отходов ионитной водоподготовительной установки Нижнекамской ТЭЦ-1.

Fig. 4. The device and composition of the electromembrane plant equipment for the processing of highly mineralized waste of the ion-exchange water treatment plant of the Nizhnekamsk CHPP-1.



Рис. 5. Устройство и состав оборудования электромембранной установки переработки высокоминерализованных отходов испарительной водоподготовительной установки Казанской ТЭЦ-3.

Fig. 5. The device and composition of the electromembrane plant equipment for the processing of highly mineralized waste from the evaporative water treatment plant of Kazan CHPP-3.

Результаты

Отработавшие в водном цикле энергопредприятия растворы содержат ценные компоненты и/или являются потенциальным источником чистой воды, но в большинстве случаев повторный ввод в оборот уже однократно использованных растворов осложняется их значительной загрязненностью. Необходима предварительная коррекция их состава для возможности повторного включения в водооборотный цикл энергопроизводства.

Для энергопредприятий наибольший потенциал с экономической точки зрения имеют жидкие щелочные отходы в связи с рядом причин: высокой ценой на щелочь, большими объемами концентрированных щелочных стоков с разных узлов и аппаратов, возможностью выделения отдельно натриевой щелочи, а не щелочной смеси, как в случае с разделением кислот.

По результатам анализа различных типов щелочных отходов, образующихся при работе ТЭЦ наиболее перспективными для утилизации являются отработанные регенерационные растворы ОН фильтров и продувочные воды испарительных установок.

На Казанской ТЭЦ-3 была разработана уникальная технология и с 2011 года успешно функционировала опытно-промышленная установка по безотходной электромембранной переработке продувочной воды испарительной ВПУ с получением щелочного и умягченного солевого растворов [29]. В настоящее время процесс остановлен в связи с выводом из эксплуатации испарительной ВПУ.

При работе испарительной ВПУ образуются продувочные воды, составляющее в среднем 2% от производительности ВПУ или 0,8-1 м³/ч. Продувочная вода представляет собой высокоминерализованный раствор, содержащий в основном натриевые соли (хлориды, сульфаты) до 40 г/дм³ и большое количество малорастворимых примесей – соединений железа 1,5 мг/дм³, меди до 1,2 мг/дм³, кремния до 440 мг/дм³. В сточных водах обнаруживаются высокомолекулярные органические вещества из почвы (соединения гумуса до 150 мг/дм³). Эти примеси находятся преимущественно в коллоидном состоянии, возможен переход их в коллоидное состояние в процессе обработки воды.

Концентрация щелочи составляет 4 – 8 г/ дм³, что позволяет рассматривать продувочную воду испарителей в качестве перспективного объекта для электромембранной переработки.

Образцы отложений с испарительной установки были проанализированы методами элементного анализа и инфракрасной спектроскопии (ИК). По данным элементного анализа образцы являются преимущественно неорганическими соединениями с содержанием углерода – 9%, а золы, характеризующей неорганические вещества – 60 %.

В ИК-спектрах (рис. 6) образцов кроме полос поглощения (ПП), характерных для воды и кальцита имеется довольно сильная ПП при 1000 см⁻¹ с хорошо выраженным плечом в области ~1070 см⁻¹. Эта полоса лежит в области валентных колебаний связей Si-O. Имеются также хорошо выраженные полосы в низкочастотной области при 628, 563 и 458 см⁻¹. Кроме того, в высокочастотной области наряду с широкой полосой при 3420 см⁻¹ имеются две узкие слабые полосы при 3690 и 3650 см⁻¹, которые относятся к валентным колебаниям связей О-Н гидроксильных групп. Подобная совокупность полос характерна для минералов группы серпентина (тальк, хризолит, антигорит и т.д.). Таким образом, образцы отложений испарительной установки представляют собой смесь кальцита, минералов группы серпентина и небольшого количества органических примесей, что согласуется с результатами анализов продувочной воды испарителей.

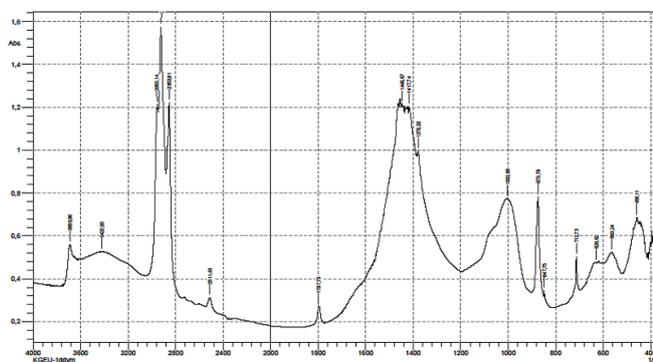


Рис. 6. ИК спектр образца отложений испарительной ВПУ (эмульсия в вазелиновом масле) Fig 6. IR spectrum of the sediment sample of the evaporative WPU (emulsion in vaseline oil)

Для утилизации продувочных вод испарительного термообессоливающего комплекса (ТОК) на Казанской ТЭЦ-3 был разработан метод, технологическая схема и создана опытно-промышленная электромембранная установка, включающая:

- Блок предварительной очистки и накопления продувочной воды;
- Блок рециркуляции рабочих растворов;
- Блок электромембранных аппаратов;
- Блок насосной группы перекачки готовых продуктов (рис. 7).

Перед электромембранным блоком подаваемый раствор проходит предочистку в виде фильтрования через двухслойный фильтр. На основном этапе проводится электромембранная двухэтапная переработка в виде отделения щелочи от исходного раствора в первом аппарате и концентрирования щелочного раствора во втором аппарате (рис. 7). Оба аппарата работают одновременно в проточном режиме.

На установку подаются продувочные воды термообессоливающего комплекса и обессоленная вода. Образуются щелочной раствор и щелоче-солевой раствор.

Первый аппарат - диффузионно-диализный экстрактор DDE (электродиализатор с одноименными катионообменными мембранами) (ЭМА-120/2) содержит 118 рабочих камер и 2 приэлектродные камеры. Второй — электродиализный концентратор EDC (электродиализатор с чередующимися анионообменными и катионообменными мембранами) (ЭМАК-120) содержит 118 рабочих камер и 2 приэлектродные камеры.

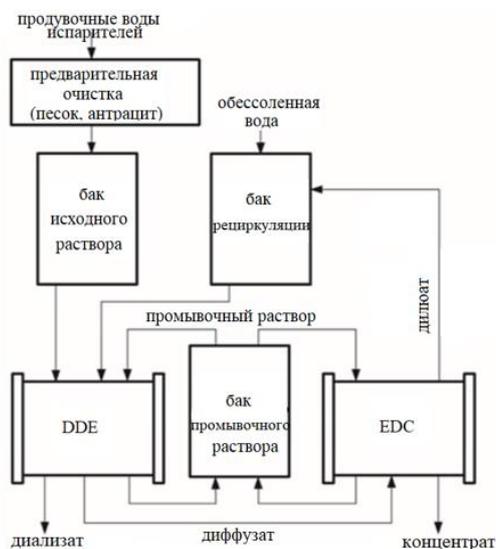


Рис. 7. Технологическая схема электромембранной утилизации продувочной воды термообессоливающего водоподготовительного комплекса Казанской ТЭЦ-3 с разделением на концентрированную щелочь и нейтральный солевой раствор в двух аппаратах

Fig. 7. Technological scheme of electromembrane utilization of purge water of the thermal desalination water treatment complex of Kazan CHPP-3 with separation into concentrated alkali and neutral saline solution in two apparatuses

Аппарат DDE необходим преимущественно для эффективного разделения, подаваемого на переработку раствора на щелочной экстракт (диффузат) и частично обессоленную воду (диализат). При работе аппарата отмечается интересный факт повышения степени разделения продуктов без наложения электрического поля, что дает отсылку на технологию RED. При подаче напряжения на аппарат DDE возрастает скорость процесса разделения.

При диффузионно-диализной переработке продувочной воды испарителей происходит эффективное отделение щелочи, количество которой в диффузате составляет до 60 % от ее содержания в исходном растворе. Другие соединения натрия (соли) переходят в диффузат медленнее щелочи. Степень разделения щелочи и других соединений натрия возрастает с течением времени и показана на рисунке 8.

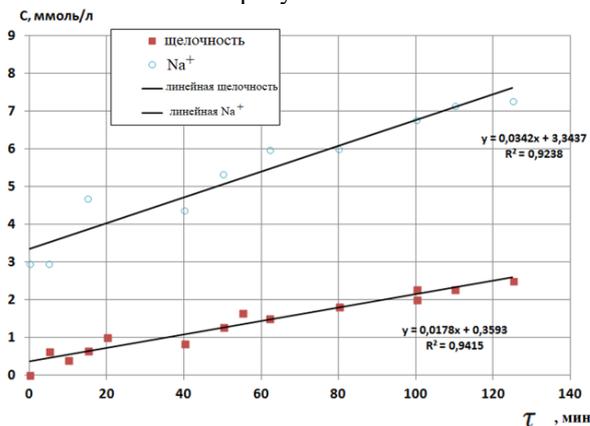


Рис. 8. Зависимость изменения концентрации соединений натрия (щелочи и солей) и щелочи от времени диффузионного диализа

Fig. 8. Dependence of changes in the concentration of sodium compounds (alkali and salts) and alkali on the time of diffusion dialysis

Второй аппарат *EDC* в технологической схеме электромембранной утилизации продувочной воды термообессоливающего водоподготовительного комплекса Казанской ТЭЦ-3 применяется для ускорения процесса получения частично обессоленной воды (дильоат) и щелочного концентрата, пригодных для использования в технологическом цикле ТЭЦ (рис. 9).

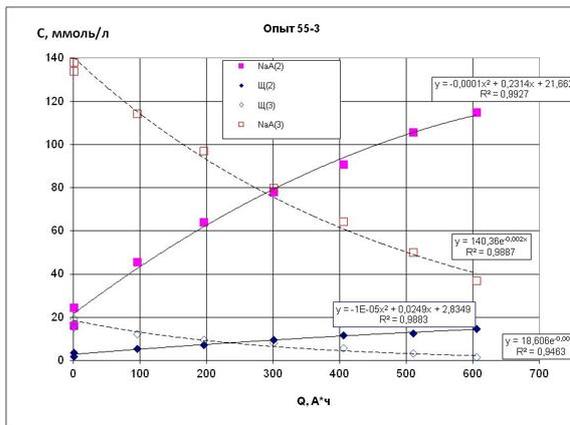


Рис. 9. Зависимость изменения концентрации растворов от количества электричества, прошедшего через аппарат. Щ (2), Щ(3) – концентрация щелочи в линиях концентрата (2) и дильоата (3); NaA(2), NaA(3) – концентрация натриевых солей в линиях концентрата (2) и дильоата (3)

Fig 9. Dependence of the change in the concentration of solutions on the amount of electricity that has passed through the apparatus. Shch (2), Shch(3) – alkali concentration in lines of concentrate (2) and diluate (3); NaA(2), NaA(3) – concentration of sodium salts in the lines of concentrate (2) and diluate (3).

Гидроксид-ионы более подвижны и легче переносятся через заряженные мембраны в сравнении с сульфат- и хлорид-ионами, что обуславливает движущую силу процесса. Селективность процесса *EDC* значительно ниже *DDE*, однако скорость выше, поэтому второй этап протекает быстрее первого, но со снижением качества разделения. Таким образом, получаемый щелочной раствор содержит некоторое количество солей исходного раствора.

Суммарно при одновременной работе двух аппаратов селективность и скорость электромембранного разделения возрастает во времени, что связано с заменой в мембранах противоионов второго порядка на OH^- ионы.

В результате работы электромембранной установки в проточном режиме с рециклом и последовательным переключением аппаратов по гидравлической схеме *DDE - EDC* конечным продуктом является практически бесцветный щелочной раствор с pH 13,86 и концентрацией OH^- ионов до 4%, что на порядок превосходит содержание их в подаваемом на установку растворе. В щелочном концентрате в допустимых пределах присутствуют загрязняющие вещества (органические компоненты, железо). Солесодержание представлено сульфатами и хлоридами натрия, без ионов жесткости, и не превышает 2% по массе.

По результатам химического анализа показано, что образующийся щелочной концентрат соответствует требованиям по степени очистки для повторного использования в цикле станции в качестве регенерационного раствора анионитных фильтров I ступени. Второй продукт электромембранной установки солевой раствор средней минерализации, не содержащий ионов жесткости, может подаваться на подпитку теплосети.

Электромембранная двухступенчатая установка перерабатывает за час $0,5 \text{ м}^3$ щелочных отходов термообессоливающего водоподготовительного комплекса. Продуктами переработки являются $0,05 \text{ м}^3$ щелочного концентрата и $0,45 \text{ м}^3$ среднеминерализованного солевого раствора. Удельный расход электроэнергии составляет 6 кВт*ч на 1 м^3 продувочной воды. Отношение щелочного концентрата к среднеминерализованному солевому раствору составляет 1/9. Экологичность процесса разработанной электромембранной технологии связана с полным отсутствием отходов и безреагентным процессом утилизации продувочных вод.

Щелочные отработанные регенерационные растворы (ЩОРР) и отмывочные воды после регенерации анионитных фильтров водоподготовительной установки также являются перспективными для электромембранной утилизации в связи с высоким содержанием щелочи и отсутствием ионов жесткости.

Для определения возможности использования электромембранной переработки и утилизации щелочных отработанных регенерационных растворов (ЩОРР) и промывочных вод был проведен предварительный анализ их качественного и количественного состава. Поскольку теоретически предсказать результат трудно из-за недостаточности изученности вопроса, были выполнены прямые эксперименты. В ходе ряда регенераций на четырех различных «полуцепочках» были проведены замеры химического состава на входе/выходе анионитовых фильтров. Регенерация анионитных фильтров осуществляется совместно по схеме ЩРР- А_{II}- А_I-бак нейтрализатор (табл. 2).

Таблица 2

Баланс расхода щелочного регенерационного расхода (ЩРР) при регенерации анионитовых фильтров «полуцепочек» водоподготовительной установки Нижнекамской ТЭЦ-1

№	№«полу- цепочки»	Концентрация щелочи в ЩРР, масс. %	Расход ЩРР, т/ч	Расход щелочи на регенерацию А _{II} , % от исх.	Расход щелочи на регенерацию А _I , % от исх.	Избыток щелочи, % от исх.
1	18	2,9	45	11,6	39,8	48,5
2	18	2,4	37	5,0	45,4	49,6
3	14	2,2	37	8,6	53,6	37,7
4	13	3,6 - 0,8	47	-1,5	52,1	49,3
	среднее			6,0	47,8	46,3

По проведенным расчетам на регенерацию фильтров А_{II} расходуется 6 ± 3% от исходного количества подаваемой на регенерацию щелочи. Основное количество подаваемой щелочи (до 50 %) расходуется на регенерацию фильтров А_I. Коэффициент использования щелочи непосредственно на регенерацию - чуть более 50 %, удельный расход щелочи – около 80 г/моль-эквивалент анионов или 2 моль-экв/моль-экв). Потери щелочи, отправляемой на нейтрализацию, составляют около 50 % от суммарного расхода на регенерацию. Учитывая большой годовой расход щелочи на всю станцию, а это в денежном выражении более 200 млн. рублей, борьба за экономию щелочи экономически целесообразна.

Следующая группа вопросов связана с химическим составом избыточных щелочных растворов, их чистотой, наличием примесей, возможностью очистки (если необходимо) и перспективам повторного использования в цикле станции. Ниже представлены результаты по входным/выходным концентрациям примесей в ЩОРР и отмывочных водах «полуцепочек» при регенерации и их анализ. Поскольку избыток щелочи на сброс (нейтрализацию) отправляется после А_I будем считать состав на выходе с А_I соответствующим входному составу. На рисунке 10 приведены типичные выходные концентрационные кривые с А_I при регенерации. Кривые нормированы для лучшего восприятия - концентрации щелочи и хлоридов уменьшены в 10 раз.

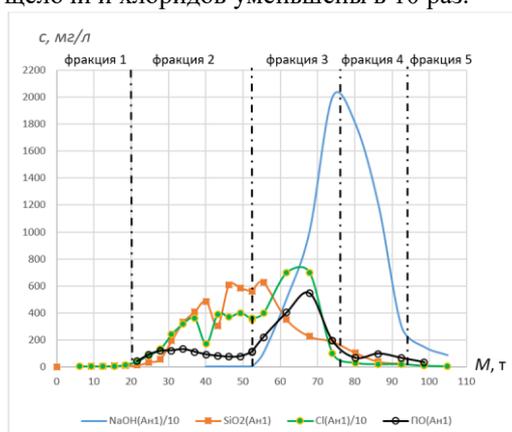


Рис. 10. Выходные концентрационные кривые с А_I при регенерации «полуцепочки» № 14 водоподготовительной установки Нижнекамской ТЭЦ-1

Fig. 10. Output concentration curves with A_I during regeneration of "half-chain" No. 14 of the water treatment plant of Nizhnekamsk CHPP-1

Видно, что вода с А_I выходит с переменным составом (по фракциям). Сначала – до 20 т (или 30 – 35 мин.) выходит практически чистая, нейтральная вода (фракция 1, «чистая» вода). Это остатки отмывочных вод, вытесняемых с фильтров. Далее, выходят 30 – 35 т (или следующие 50 мин.) нейтрального солевого раствора. Это в основном натриевые соли анионов сильных кислот (серной и соляной) с примесями в основном «кремневки» (фракция

2, нейтральный «мягкий» раствор). Далее на выходе появляется щелочь в объеме примерно 20 т (или 30 мин. прохода фракции) так называемой «грязной» щелочи. Это щелочной раствор черного цвета, сильно загрязненный «снятыми» с фильтров примесями – анионами сильных кислот и органическими веществами (фракция 3, «грязная» щелочь). После этого содержание примесей резко снижается, а концентрация щелочи возрастает. Начинает выходить фракция «условно чистой» щелочи примерно 20 т (по времени минут 30). Это фракция 4, «чистая» щелочь.

И последняя фракция (фракция 5, ЩОВ) – щелочные отмывочные воды с низким содержанием и примесей и щелочи.

Доля щелочи в 4-ой фракции («чистая» щелочь) составляет порядка 30 % от исходного количества щелочи, подаваемой на регенерацию, а концентрация в ней примесей составляет не более 5 масс. %. Также интересно отметить, что относительная чистота щелочи в щелочных отмывочных водах (фракция 5) получилась меньше, чем в «чистой» щелочи (фракция 4).

Таким образом, вода после (в ходе) регенерации анионитовых «полупечочек» выходит с An_1 в виде примерно равных по объему отдельных фракций с характерным химическим составом:

- 1 – «чистая» вода,
- 2 – нейтральный солевой («мягкий») раствор,
- 3 – «грязный» щелочной раствор,
- 4 – «чистая» щелочь,
- 5 – щелочные отмывочные воды.

Учитывая химический состав, все фракции после блочной регенерации анионитовых фильтров имеют перспективы для повторного использования. Первую фракцию возможно вернуть в «голову» обессоливающей водоподготовительной установки, например, в бак осветленной воды после осветлителя. Фракция №2 (нейтральные «мягкие» соленые воды) можно использовать в процессе предрегенерации предвключенного Н-катионитного фильтра обессоливающей водоподготовительной установки для перевода катионита в Na-форму или для регенерации Na-катионитовых фильтров установки умягчения воды при ее наличии на ТЭЦ. Фракцию №3 («грязная» щелочь) на ТЭЦ, как правило, сбрасывают. Но возможно повторное использование при условии очистки от вредных примесей, прежде всего органических. Фракция №4 и 5 (соответственно, крепкие и слабые щелочные воды) на некоторых ТЭЦ собирают отдельно и используют повторно только для предрегенерации An_1 , несмотря на присутствие некоторого количества загрязнений. Основная проблема с утилизацией и повторным использованием ЩОРР и ЩОВ связана с наличием загрязнений, среди которых наиболее опасные для материала анионита – органические, кремний- и железосодержащие.

Доля щелочи в 4-ой фракции («чистая» щелочь) составляет порядка 30 % от исходного количества щелочи, подаваемой на регенерацию, а концентрация в ней примесей не более 5 масс. %

По результатам проведенных анализов фракций ЩОРР электромембранному разделению подвергали наиболее концентрированные щелочные фракции (№3, 4, 5), содержащие до 20 г/л щелочи.

По результатам проведенного системного анализа разработан метод электромембранной утилизации ЩОРР по технологии электродиализации, разработана технологическая схема и сконструирована экспериментальная опытно-промышленная установка. В химическом цехе №2 Нижнекамской ТЭЦ-1 была смонтирована экспериментальная опытно-промышленная установка с аппаратом ЭМА 200/2Т, с количеством камер 200, с чередованием катион-, анионообменных мембран для переработки щелочных отработанных регенерационных растворов. Мембраны использовались химически стойкие катионообменные с сильнокислотным катионитом и анионообменные с сильноосновным анионитом. Производительность электромембранной установки составляет до 1,5 м³/час.

Для определения селективности и скорости диализа компонентов был рассчитан полный материальный баланс для линий диализата и концентрата (табл. 3). Кратность разделения определяет пропорции компонентов электролита в концентрате. Кратность концентрирования характеризует отношение концентрации анализируемого компонента в концентрате к его концентрации в диализате, т.е. накопление за единицу времени. Кратность снижения показывает остаточное соотношение компонентов в линии диализата после периода электродиализа. Удельная энергоёмкость диализа характеризует эффективность электропереноса, т.е. энергозатраты при проведении электродиализа,

необходимые на перенос вещества электролита из линии диализата в линию концентрата за единицу времени.

Таблица 3

Рассчитанные индексы (показатели) соотношений разделения, селективности, снижения, электропереноса компонентов промышленных отходов анионитных фильтров (фракция № 4) через мембранную пару. S_k – концентрация анализируемого компонента в концентрате, S_d – концентрация анализируемого компонента в диализате, $S_{исх}$ – исходная концентрация анализируемого компонента в диализате

Показатель	Кратности			Удельная энергоёмкость диализа (моль-экв/Ф за 1 час)
	Разделения, $K_p = S_k/S_d$ через 1,5 часа	Концентрирования, $K_k = S_k/S_{исх}$ через 1,5 часа	Снижения, $K_s = S_{исх}/S_d$ через 1,5 часа	
ОСС	10,4	3,09	3,38	
Na ⁺	9,4	2,87	3,27	0,76
Щф/ф	8,5	2,85	3	0,76
Cl ⁻	3,45	1,5	2,28	0,23
SO ₄ ²⁻	1,65	1,3	1,25	0,012
SiO ₃ ²⁻	1,25	0,62	2,02	0,004
ОВ	0,59	0,47	1,24	0,0012
Fe ²⁺	0,6	0,52	1,15	0,0006

Селективность переноса однозарядных ионов из диализата в концентрат при превышает таковую для двухзарядных и существенно превышает селективность переноса основных загрязняющих компонентов – органических, кремне- и железосодержащих соединений (табл. 4). Следовательно, во время электромембранной переработки отмечается относительное снижение содержания органических, кремне- и железосодержащих соединений в концентрате. На выходе из аппарата образуется щелочной раствор, в котором содержание загрязняющих веществ в 10 раз меньше, чем в подаваемых на аппарат щелочесодержащих отходах ионитной водоподготовительной установки.

Итогом электродиализной переработки являются щелочной концентрат - 3,1 % щелочной раствор и дилуат – щелоче-солевой раствор в пропорции 1:4. Щелочной раствор в зависимости от условий содержит 20-60 г/л NaOH и до 10 % солей. Дилуат состоит из раствора исходных солей и остатков щелочи и не содержит ионов жесткости.

Таблица 4

Селективность переноса ионов при электромембранной переработке
 S_0 = концентрация компоненты/общее солесодержание

компонента	S_0
ОСС	1
Cl ⁻	1,5±0,2
Na ⁺	1±0,1
OH ⁻	1±0,1
SO ₄ ²⁻	0,3±0,05
CO ₃ ²⁻	0,25±0,05
SiO ₃ ²⁻	0,25±0,05
Орг. вещества	0,2±0,05
Fe ⁿ⁺	0,15±0,03

Электромембранная установка перерабатывает 1,5 тонны в час щелочных отходов химобессоливающей водоподготовительной установки. Производительность установки составляет 4 кг 100 % щелочи/час, что соответствует 0,1 тонне 4% щелочного раствора. Удельный расход электроэнергии электромембранной установки - 4 кВт·ч на 1 м³ сточных вод. Работа установки характеризуется полным отсутствием отходов, безреагентным процессом утилизации сточных вод.

Таким образом, возврат регенерированных растворов щелочи и умягченной воды в производственный цикл позволяет получить значительное улучшение показателей, характеризующих экологичность и ресурсосбережение.

Выводы

1. Среди всех социальных и промышленных потребителей Республики Татарстан энергосистема занимает лидирующие позиции: потребление природной воды составляет

35,4%, сброс сточных вод составляет 39 %, загрязненных сточных вод - около 7%, что оказывает негативное влияние на экологию региона. В системе водопользования энергообъектов наибольший вклад в общий сток станции вносят отходы водоподготовительных установок.

2. В работе представлена методология и проведен системный анализ структуры водооборота объектов энергетики Республики Татарстан. На основе разработанной методологии определены источники, объем и состава жидких отходов узлов и установок технологического водопользования. По результатам системного анализа структуры водооборота энерготехнологических систем республики Татарстан определены основные проблемы и необходимость создания и применения технических решений для водо- и ресурсосбережения.

3. Для создания ресурсосберегающих малоотходных энерготехнологических систем применены «концевые» установки на циклах водооборота энергопредприятия. В качестве «концевых» установок предлагаются электромембранные в различных вариантах исполнения.

4. Для утилизации продувочных вод испарительной водоподготовительной установки разработана безотходная электромембранная технология по схеме последовательного соединения аппаратов диффузионного диализа и электродиализа для эффективного извлечения и концентрирования щелочного продувочного раствора. Полученные продукты электромембранной переработки щелочной концентрат и умягченный солевой раствор возможно повторно использовать в цикле станции.

5. Для утилизации щелочных отработанных и отмывочных вод ионитной водоподготовительной установки разработана электромембранная технология в варианте традиционного электродиализа, которая позволяет извлекать, концентрировать щелочь из жидких отходов аппаратов. Результатом электродиализной переработки являются щелочной концентрат и частично обессоленная вода, которые могут быть повторно использованы в технологическом цикле объекта энергетики.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта «Проведение фундаментальных научных исследований малыми отдельными научными группами» № 22-29-01300.

Литература

1. Росводресурсы [Электронный ресурс]. Доступно по : <https://voda.gov.ru/>
2. Долматов И.А. Обоснование уровня ставок платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности, для ТЭЦ, использующих прямоточные системы технического водоснабжения: отчет о НИИР. Москва: Высшая школа экономики, 2018. 112 с.
3. Печников А.Ф, Шупарский А.И. Образование и утилизация токсичных отходов тепловых электростанций // Электрические станции. 2001. №4. С. 19-20.
4. Zhang C., Zhong L., Fu X., Wang J., Wu Z. Revealing water stress by the thermal power industry in China based on a high spatial resolution water withdrawal and consumption inventory // Environ. Sci. Technol. 2016. №50 (4). P. 1642–1652.
5. Бойко Н.И., Одарюк В.А., Сафонов А.В. Основные направления безотходных и малоотходных технологий // Технологии гражданской безопасности. 2015. Т.12. № 1 (43). С. 68-72.
6. Salgot M., Folch M. Wastewater treatment and water reuse // Curr. Opin. Environ. Sci. Heal. 2018. №2. P. 64–74.
7. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review // Science of the total environment. 2019. №681. P. 551 –563.
8. Закиров И.А., Королев А.Г., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М., Паймин С.С. Ресурсосберегающие технологии при создании замкнутых систем водопользования на ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 55-60.
9. Филимонова А.А. Электромембранные технологии в теплоэнергетике и промышленности // Мембраны и мембранные технологии. 2020. Т. 10. № 4. С. 237-248.
10. Handojo L. Electro-membrane processes for organic acid recovery // RSC Adv. 2019. № 9. P. 7854 –7869.
11. Reig M. Selectrodialysis and bipolar membrane electrodialysis combination for industrial process brines treatment: monovalent-divalent ions separation and acid and base production // Desalination. 2016. №399. P. 88–95.
12. Scarazzato T. Water reclamation and chemicals recovery from a novel cyanide-free copper plating bath using electrodialysis membrane process // Desalination. 2018. №436. P. 114–124.
13. Ward A.J. Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis // Water Res. 2018. №135. P. 57–65.

14. Патент 2666425 С2 РФ. Способ снижения карбонатной жесткости воды и устройство для этого / А.М. Фридкин, Н.Р. Гребенщиков, А.В. Пименов, В.М. Сафин, М.М. Бубнов, М.И. Серушкин // Изобретения. Полезные модели. 2018. №25.
15. Антонов А.А., Михайленко В.Г. Очистка промышленных стоков методом электромембранного умягчения // В сборнике: Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов. Сборник докладов III Международной молодежной научной конференции. Белгород, 2015. С. 17-19.
16. Breytus A. Ion exchange membrane adsorption in Donnan dialysis // Separation and Purification Technology. 2019. №226. P. 252–258.
17. Camacho L.M. Optimization of electrodialysis metathesis (EDM) desalination using factorial design methodology // Desalination. 2017. №403. P. 136–143.
18. Pedersen-Bjergaard S. Electromembrane extraction—Recent trends and where to go // Journal of pharmaceutical analysis. 2017. №7. P. 141–147.
19. Zhang Y.F., Liu L., Du J., Fu R., Van der Bruggen B., Zhang Y. Fracsis: ion fractionation and metathesis by a NF-ED integrated system to improve water recovery // J. Membr. Sci. 2017. №523. P. 385–393.
20. Davis J.R., Chen Y., Baygents J.C., Farrell J. Production of acids and bases for ion exchange regeneration from dilute salt solutions using bipolar membrane electro dialysis // ACS Sustainable Chem. Eng. 2015. №3 (9). P. 2337–2342.
21. Tian W., Wang X., Fan C., Cui Z. Optimal treatment of hypersaline industrial wastewater via bipolar membrane electro dialysis // ACS Sustainable Chem. Eng. 2019. №7. P. 12358–12368.
22. Zhang J., Niu D., Zhang X., Hu S. An economical process to recover sulfuric acid and tetrabutylammonium ions from acidic saline wastewater with organics // Desalin. Water Treat. 2018. №129. P. 149–159.
23. Koter S. Transport of simple electrolyte solutions through ion-exchange membranes – the capillary model // J. Membr. Sci. 2002. № 206 (1-2). P. 201-215.
24. Bejanidze I., Pohrebennyk V., Kharebava T., Koncelidze L., Jun S. Correction of the chemical composition of the washing waters received as a result of H- cation exchange of ion-exchange resin // International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM, Sofia. 2019. №19. P. 133-140.
25. Филимонова А.А., Чичиров А.А., Чичирова Н.Д. Утилизация жидких высокоминерализованных отходов химобессоливающей водоподготовительной установки ТЭС с генерацией электроэнергии методом обратного электро диализа // Мембраны и мембранные технологии. 2021. Т. 11. № 5. С. 382-390.
26. Mei Y., Tang C.Y. Recent developments and future perspectives of reverse electro dialysis technology: A review // Desalination. 2018. №425. P. 156–174.
27. Rijnaarts T., Moreno J., Saakes M., deVos W.M., Nijmeijer K. Role of anion exchange membrane fouling in reverse electro dialysis using natural feed waters // Colloids and Surfaces A. 2019. № 560. P. 198–204.
28. Gioli P., Silingardi G.E., Ghiglio G. High quality water from refinery waste // Desalination. 1987. №67. P. 271-282.
29. Вафин Т.Ф., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Закиров И.А. Технологические схемы утилизации стоков водоподготовительных испарительных установок с использованием электромембранных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1-2. С. 182-186.
30. Седлов А.С. Исследование и отработка процесса использования продувочной воды многоступенчатой испарительной установки в цикле водоподготовки // Теплоэнергетика. 1991. №7. С. 22-26.

Авторы публикации

Чичиров Андрей Александрович – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия и водородная энергетика», Казанский государственный энергетический университет.

Филимонова Антонина Андреевна – канд. мед. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика», Казанский государственный энергетический университет.

Чичирова Наталия Дмитриевна – д-р химич. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

Минибаев Азамат Ильшатович – старший преподаватель кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Rosvodresursy [Electronic resource]. Available at: <https://voda.gov.ru/>
2. Dolmatov I.A. Justification of the level of fees for the use of federally owned water bodies for CHPPs using direct-flow service water supply systems: NIIR report. Moscow: Higher School of Economics. 2018. 112 p.
3. Pechnikov A.F., Shuparsky A.I. Formation and utilization of toxic wastes of thermal power plants // *Electric stations*. 2001;4:19-20.
4. Zhang C., Zhong L., Fu X., Wang J., Wu Z. Revealing water stress by the thermal power industry in China based on a high spatial resolution water output and consumption inventory // *Environ. sci. Technol.* 2016;50 (4):1642–1652.
5. Boyko N.I., Odaryuk V.A., Safonov A.V. The main directions of non-waste and low-waste technologies // *Civil Security Technologies*. 2015;12;1(43):68-72.
6. Salgot M., Folch M. Wastewater treatment and water reuse // *Curr. Opin. Environ. sci. Heal.* 2018;2:64–74.
7. Yaqub M., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review // *Science of the total environment*. 2019;681:551–563.
8. Zakirov I.A., Korolev A.G., Chichirova N.D., Chichirov A.A., Vlasov S.M., Paimin S.S. Resource-saving technologies in the creation of closed water use systems at thermal power plants // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2013; 11-12: 55-60.
9. Filimonova A.A. Electromembrane technologies in heat power engineering and industry // *Membranes and membrane technologies*. 2020;4:237-248.
10. Handojo L. Electro-membrane processes for organic acid recovery // *RSC Adv.* 2019; 9:7854–7869.
11. Reig M. Selectrodialysis and bipolar membrane electrodialysis combination for industrial process brines treatment: monovalent-divalent ions separation and acid and base production // *Desalination*. 2016;399:88–95.
12. Scarazzato T. Water reclamation and chemicals recovery from a novel cyanide-free copper plating bath using electrodialysis membrane process // *Desalination*. 2018;436:114–124.
13. Ward A.J. Nutrient recovery from wastewater through pilot scale electrodialysis // *Water Res.* 2018;135:57–65.
14. Patent 2666425 C2 RF. A method for reducing the carbonate hardness of water and a device for this / A.M. Fridkin, N.R. Grebenschikov, A.V. Pimenov, V.M. Safin, M.M. Bubnov, M.I. Serushkin. Inventions. Useful models. 2018;25.
15. Antonov A.A., Mikhailenko V.G. Purification of industrial wastewater by the method of electromembrane softening // In the collection: Ecology and rational environmental management of agro-industrial regions. Collection of reports of the III International Youth Scientific Conference. Belgorod, 2015;17-19.
16. Breytus A. Ion exchange membrane adsorption in Donnan dialysis // *Separation and Purification Technology*. 2019;226:252–258.
17. Camacho L.M. Optimization of electrodialysis metathesis (EDM) desalination using factorial design methodology // *Desalination*. 2017;403:136–143.
18. Pedersen-Bjergaard S. Electromembrane extraction—Recent trends and where to go // *Journal of pharmaceutical analysis*. 2017;7:141–147.
19. Zhang Y.F., Liu L., Du J., Fu R., Van der Bruggen B., Zhang Y. Fracsis: ion fractionation and metathesis by a NF-ED integrated system to improve water recovery. *J. Membr. sci.* 2017;523:385–393.
20. Davis J.R., Chen Y., Baygents J.C., Farrell J. Production of acids and bases for ion exchange regeneration from dilute salt solutions using bipolar membrane electrodialysis // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2015;3(9):2337–2342.
21. Tian W., Wang X., Fan C., Cui Z. Optimal treatment of hypersaline industrial wastewater via bipolar membrane electrodialysis. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2019;7:12358–12368.
22. Zhang J., Niu D., Zhang X., Hu S. An economical process to recover sulfuric acid and tetrabutylammonium ions from acidic saline wastewater with organics // *Desalin. water treatment*. 2018;129:149–159.
23. Koter S. Transport of simple electrolyte solutions through ion-exchange membranes – the capillary model. *J. Memb. sci.* 2002;206(1-2):201-215.
24. Bejanidze I., Pohrebennyk V., Kharebava T., Koncelidze L., Jun S. Correction of the chemical composition of the washing waters received as a result of H-cation exchange of ion-exchange resin. International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM, Sofia. 2019;19:133-140.

25. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D. Utilization of highly mineralized liquid wastes of a chemically desalinated water treatment plant at a thermal power plant with electricity generation by reverse electro dialysis. *Membrans and membrane technologies*. 2021;5:382-390.

26. Mei Y., Tang C.Y. Recent developments and future perspectives of reverse electro dialysis technology: A review. *Desalination*. 2018;425:156–174.

27. Rijnaarts T., Moreno J., Saakes M., deVos W.M., Nijmeijer K. Role of anion exchange membrane fouling in reverse electro dialysis using natural feed waters. *Colloids and Surfaces A*. 2019;560:198–204 .

28. Gioli P., Silingardi G.E., Ghiglio G. High quality water from refinery waste. *Desalination*. 1987;67:271-282.

29. Vafin T.F., Chichirova N.D., Chichirov A.A., Zakirov I.A. Technological schemes for the utilization of wastewater from water treatment evaporative plants using electromembrane devices. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2012;1-2:182-186.

30. Sedlov A.S. Research and development of the process of using blowdown water of a multistage evaporation plant in the water treatment cycle. *Thermal Engineering*. 1991; 7:22-26.

Authors of the publication

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University.

Antonina A. Filimonova – Kazan State Power Engineering University.

Natalya D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University.

Azamat I. Minibaev – Kazan State Power Engineering University.

Получено

02.06.2022г.

Отредактировано

06.06.2022г.

Приято

06.06.2022г.



ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ РОТОРА САВОНИУСА

Гусева Ю.В., Кострюков С.А., Васильев А.Р.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9005-9222> , vasilevayv@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Повышение эффективности и экономичности работы электростанций на основе возобновляемых источников энергии необходимо проводить посредством совершенствования технологических, конструктивных, организационно-правовых, технико-экономических мероприятий. Даны предложения для развития подходов к оценке эффективности работы ветроэнергетических установок на основе ротора Савониуса. Обоснованы конструктивные параметры и создана физическая модель для комплексного исследования и рабочих характеристик в лабораторных условиях. МЕТОДЫ. На основе методов физического и математического моделирования конструкций и профилей лопастей ветрогенератора определены технико-экономические показатели различных профилей лопастей ротора Савониуса. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выполнено теоретическое обоснование конструкции и различных профилей лопастей ротора Савониуса. На основе комплексного исследования рабочих характеристик в лабораторных условиях установлены значения коэффициента эффективности использования энергии ветра, частоты вращения профиля ветроколеса, электрической мощности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования могут быть применены для обоснования широкого распространения и создания ветроэнергетических установок с ротором Савониуса для обеспечения качественного и надежного энергоснабжения удаленных потребителей электрической энергии, создания изолированных энергосистем и дальнейшего развития альтернативных источников энергии в отечественной электроэнергетике.

Ключевые слова: энергетическая эффективность; возобновляемые источники энергии; ветроэнергетическая установка; ротор Савониуса.

Для цитирования: Гусева Ю.В., Кострюков С.А., Васильев А.Р. Приемы системного анализа и ресурсосберегающие электрообъемные технологии при создании малосточной системы водопользования объектов энергетики Республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 83-90. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-83-90.

LABORATORY MODEL OF THE SAVONIUS ROTOR

YuV. Guseva, SA. Kostryukov, AR. Vasilev

Volzhsy Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute», Russia

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453> , vasilevayv@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Increasing the efficiency and efficiency of power plants based on renewable energy sources should be carried out by improving technological, constructive, organizational, legal, technical and economic measures. Proposals are given for the development of approaches to assessing the efficiency of wind power plants based on the Savonius rotor. The design parameters are substantiated and a physical model is created for a comprehensive study and performance characteristics in laboratory conditions. METHODS. Based on the methods of physical and mathematical modeling of structures and profiles of wind turbine blades, the technical and economic indicators of various profiles of the blades of the Savonius rotor are determined. RESULTS. The theoretical substantiation of the design and various profiles of the blades of the Savonius rotor is carried out. On the basis of a comprehensive study of performance characteristics in laboratory conditions, the values of the wind energy efficiency coefficient, the rotation frequency of the wind wheel profile, and electric power were established. CONCLUSION.

The results of the study can be applied to substantiate the widespread use and creation of wind power plants with a Savonius rotor to ensure high-quality and reliable power supply to remote consumers of electric energy, the creation of isolated power systems and the further development of alternative energy sources in the domestic electric power industry.

Keywords: energy efficiency; renewable energy sources; wind power plant; Savonius rotor.

For citation: Guseva YuV., Kostryukov SA., Vasilev AR Laboratory model of the savonius rotor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):83-90. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-83-90.

Введение

Развитие отечественной электроэнергетики базируется на энергетической стратегии энергетики России до 2035 года. В соответствии со структурой выработки электрической энергии на долю электрических станций на основе использования энергии ветра приходится 0,13%, что в абсолютном выражении установленной мощности соответствует значению 1381 МВт. Необходимость развития ветроэнергетики в нашей стране обусловлена в первую очередь наличием большого ветроэнергетического потенциала, потребителей энергии, удаленных от централизованных сетей, исполнением условий экологической программы развития регионов, научно-техническими и производственными разработками. Таким образом, развитие альтернативной энергетики с целью сокращения потребления органического топлива и снижения углеродного следа от процесса выработки электрической энергии, посредством создания эффективных ветроэнергетических установок с вертикальным расположением ротора, представляет собой актуальную задачу исследования [1 – 3].

В настоящее время широкое распространение получили два основных типа ветроэнергетических установок: с горизонтальной и вертикальной осями вращения ротора. Для обеспечения технических нужд выгодно использовать вертикально-осевые установки малой мощности, например с ротором Савониуса с S-образным профилем лопастей. Для данного типа ветрогенератора характерны большие пусковые крутящие моменты, работа при низких скоростях ветрового потока и высокая технологичность и простота исполнения. Основными недостатками ветрогенератора с ротором Савониуса являются большой расход материала и низкий коэффициент использования энергии ветра. В работах [4 – 6] авторами выполнен вычислительный гидродинамический прогноз модифицированной ветротурбины с вертикальным расположением ротора с новыми формами лопастей. Рассмотрена проблема возникновения подсинхронного резонанса, оценки и прогнозирования энергетической эффективности ветроэнергетических установок. При этом отсутствует комплексный подход к практической проверке рабочих характеристик ветрогенераторов с различными профилями ветроколеса и климатическими условиями их эксплуатации.

Анализ работ [7– 9] показывает, что авторами рассматриваются методические подходы к обобщению статистических данных для создания логистического распределения в динамической модели направления ветра для выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции, а также комплексного обоснования конструктивных параметров и создания физической модели ветрогенератора для исследования рабочих характеристик. Однако, следует отметить, что при разработке профилей лопастей ветрогенератора необходимо учитывать влияние различных конструктивных и режимных факторов на рабочие характеристики генерирующего оборудования, в том числе для обеспечения заданных рабочих характеристик лопастей ротора при низких скоростях набегающего потока воздуха на малых моделях ветрогенераторов.

В этой связи для устранения вышеуказанных недостатков необходимо выполнить основные задачи исследования:

1. Выполнить теоретическое обоснование конструкции ветрогенератора на основе ротора Савониуса.
2. Создать физическую модель ветрогенератора с ротором Савониуса для комплексного исследования рабочих характеристик генерирующей установки.
3. Усовершенствовать подход к определению энергетической эффективности использования ветрогенератора с ротором Савониуса.

В связи с этим, целью работы является обоснование конструктивных параметров и создание физической модели для комплексного исследования рабочих характеристик ветрогенератора с ротором Савониуса в лабораторных условиях.

Научная новизна работы состоит в том, что на основании выполненных лабораторных исследований получены новые данные о влиянии различных профилей ветроколеса с вертикальным расположением ротора на изменение значения коэффициента эффективности использования энергии ветра, частоты вращения профиля ветроколеса, электрической мощности. Практическая значимость заключается в проведении лабораторных исследований различных профилей ветроколеса с целью повышения эффективности использования энергии ветра и широкого распространения (масштабирование) ветроэнергетики в районах с предрасполагающими климатическими факторами и наличием потребителей энергии (на примере климатических условий Волгоградской области) в условиях цифровизации электроэнергетики.

Материалы и методы

Для построения модели ветрогенератора с ротором Савониуса использован принцип математической спирали с учетом рекомендаций [1 – 3]. На рисунке 1 представлена схема построения модели профиля лопастей ветрогенератора на основе «золотого» сечения.

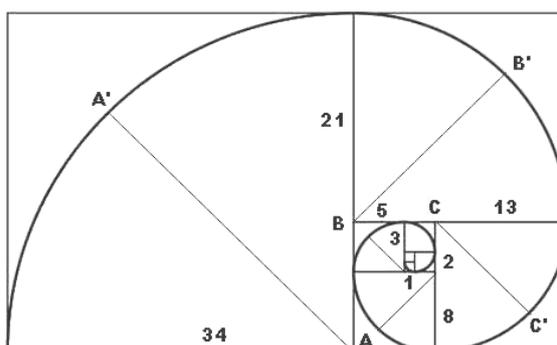


Рис. 1. Схема построения модели профиля лопастей ветрогенератора

Fig. 1. Diagram of building a profile model of wind turbine blades

По дуге $A' - B'$ математической спирали строится каждая из двух лопастей крыльчатки, совместно они образуют поверхность близкую к форме цилиндра. Спираль строится на основе «золотого» сечения. Две лопасти образуют угол между осями в 180° , как это показано на рисунке 1.

Таким образом для решения поставленной задачи исследования в работе выполнено построение профиля лопасти ротора ветрогенератора. Профиль лопасти ротора ветрогенератора представлен на рисунке 2.

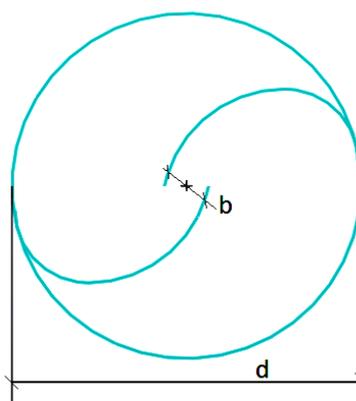


Рис. 2. Профиль лопасти ротора ветрогенератора

Fig. 2. The profile of the rotor blade of the wind generator

Лопасты соединяются с зазором b , причем $b=(0,15\div 0,3)d$, для обеспечения проникновения воздушных масс в межлопастное пространство с целью обеспечения стабильности крутящего момента. Такой принцип действия позволяет ротору Савониуса работать даже при слабом ветре при скорости ветра менее 1 м/с.

Модель профиля ротора Савониуса, исследуемая в работе, выполнена в программе Компас 3D и изготовлена на 3D-принтере из полимерного материала. Модель ротора Савониуса представлена на рисунке 3.

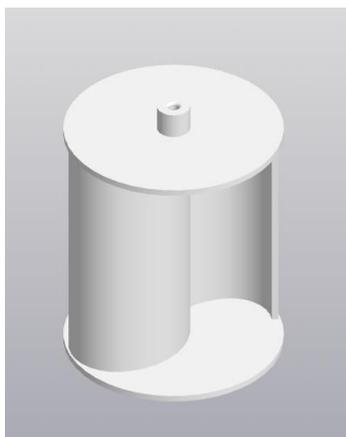


Рис. 3. 3D- модель ротора Савониуса

Fig. 3. 3D model of the Savonius rotor

Следует отметить, что при профилировании лопастей ротора Савониуса учитывалось, что скорость воздуха в створе ветроколеса составляет 1/3 от скорости набегающего потока воздуха.

Расчет коэффициента мощности выполнен на основе зависимости с учетом [2, 3]:

$$C_p = 2C_x \left(1 - \frac{u}{v}\right)^2 \frac{u}{v}, \quad (1)$$

где C_x – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления; v – скорость набегающего потока воздуха, м/с; $u = 2\pi r \nu$ – скорость воздуха в створе ветроколеса, м/с; ν – частота вращения ротора, Гц; r – радиус ветроколеса, м.

Мощность ветрогенератора определяли по формуле [2, 3]:

$$P = C_x \rho r h (v - u)^2 u, \quad (2)$$

здесь h – высота ветроколеса, м.

Расчетные значения коэффициента мощности и электрической мощности модельной установки ветрогенератора для исследуемого профиля лопасти представлены на рис. 4 – рисунке 6.

Обсуждение результатов

На основании проведенных исследований предложена конструкция лабораторного стенда для исследования рабочих характеристик ветрогенератора в лабораторных условиях. Принимая за основу особенность климата степей Нижнего Поволжья - активный ветровой режим в течение всего года со среднегодовой скоростью ветра от 3,3 м/с до 6,3 м/с в модельной установке в качестве источника ветра используется нагнетатель с расходом 180 м³/ч. Нагнетаемый поток воздуха проходит через трубу с внутренним диаметром 125 мм, что создает направленный поток ветра со скоростью 4,1 м/с. Внутри трубы помещена разработанная модель ветрогенератора с ротором Савониуса, представленная на рисунке 3. Общий диаметр ветрогенератора 65 мм, высота 74 мм. Фиксация и центрирование модели ветроэнергетической установки осуществляется с помощью валов и подшипников скольжения. Подшипники с внутренним диаметром 3 мм фиксируются в обводном хомуте аэродинамической трубы. Поэтому конструкция является мобильно заменяемой, что удобно для исследования различных профилей лопастей ветрогенераторов. В предлагаемой системе контроля частоты вращения на вал ветрогенератора прикреплен неодимовый магнит. Датчик Холла отслеживает изменение магнитного поля в определенной области и генерирует сигнал, который поступает на микроконтроллер, затем сигнал обрабатывается и передается на персональный компьютер. Для регулирования скорости воздушного потока в трубе применен резистор переменного сопротивления для нагнетателя воздуха.

Результаты измерения частоты вращения ротора ветрогенератора используются для расчета коэффициента эффективности использования энергии ветра и мощности генерирующей установки по уравнениям (1), (2).

Результаты оценки рабочих характеристик ветроколеса, имитирующего работы на начальном (разгонном) участке времени представлены на рисунке 4. Следует отметить, что продолжительность разгона ветроколеса до выхода на установившийся режим составляет порядка 10 с.

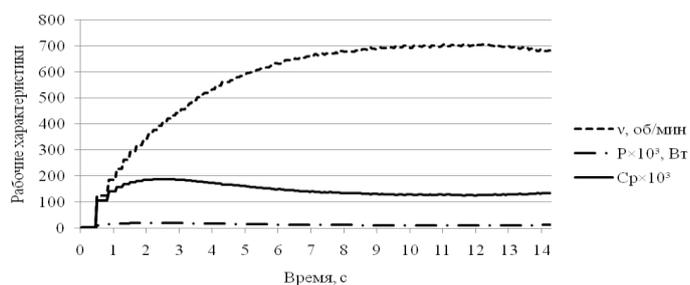


Рис.4. Рабочие характеристики ветроколеса на начальном (разгонном) участке времени *Fig.4. Operating characteristics of the wind wheel at the initial (acceleration) time interval*

В ходе расчетов установлено, что для обеспечения заданных рабочих характеристик лопастей ротора скорость набегающего потока воздуха на малых моделях ветрогенераторов значения Re должны находиться в диапазоне $(3 \div 5) \cdot 10^5 [6 - 9]$.

В соответствии с этим, для модельной установки экспериментально полученные значения частоты вращения в номинальном режиме работы составляют 600 об/мин., электрической мощности 16 мВт, коэффициента мощности 0,182, что соответствует расчетным данным. Значения коэффициента мощности соответствуют данным, приведенным в научно-технических источниках [9 – 12].

На рисунке 5 и 6 представлены рабочие характеристики профилируемой модели ветроколеса на установившемся режиме и в процессе регулирования скорости набегающего потока воздуха.

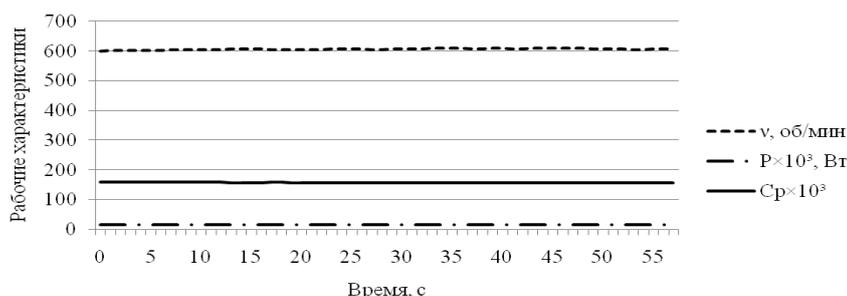


Рис.5. Рабочие характеристики ветроколеса на установившемся режиме *Fig.5. Operating characteristics of the wind wheel in steady-state mode*

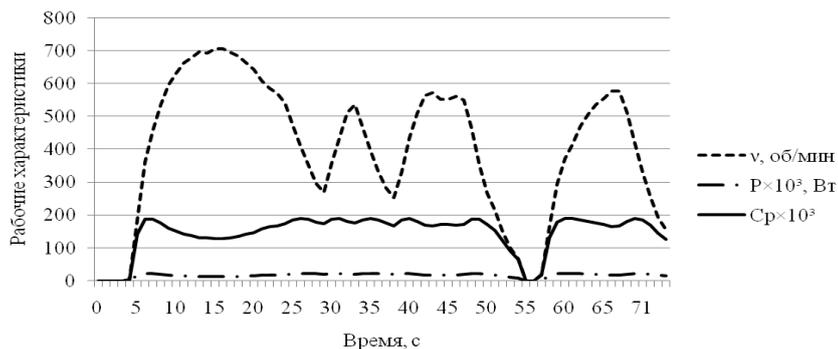


Рис.6. Рабочие характеристики ветроколеса в процессе регулирования скорости набегающего потока воздуха *Fig.6. Operating characteristics of the wind wheel in the process of regulating the speed of the incoming air flow*

При осуществлении регулирования скорости набегающего потока воздуха практически во всем диапазоне управления ротором стабильно поддерживается коэффициент использования энергии ветра на уровне 0,169 – 0,189, за исключением участка времени от 50 до 60 с на котором скорость потока воздуха равна нулю, как это показано на рисунке 6. При этом на начальном участке коэффициент использования энергии ветра принимает значения от 0,128 до 0,187.

Анализ полученных расчетных значений показывает, что при профилировании моделей лопастей ветрогенераторов необходимо учитывать обратные вихри, возникающие

в разреженной зоне после прохождения потоком воздуха створа ветроколеса, которые в свою очередь оказывают значительное влияние на эффективность использования энергии ветра конкретной моделью ветрогенератора [12, 13].

В дальнейшем планируется развитие работы с разработкой новых профилей лопастей и вариацией скорости воздушного потока с целью поиска оптимального варианта модели ветрогенератора для использования в Волгоградской области. Также планируется проведение лабораторных испытаний на модели больших размеров, созданной по оптимальным значениям параметров [14, 15].

Выводы

В результате проведенного исследования выполнено теоретическое обоснование создания конструкции ветрогенератора на основе ротора Савониуса, учитывающая особенности кинематического обтекания ветроколеса набегающим потоком воздуха. Таким образом, усовершенствован подход к определению энергетической эффективности использования ветрогенератора с ротором Савониуса.

Создана физическая модель ветрогенератора с ротором Савониуса для комплексного исследования рабочих характеристик генерирующей установки в лабораторных условиях.

Проведены лабораторные испытания созданной физической модели. Получены новые опытные данные коэффициента мощности и электрической мощности модельной установки ветрогенератора с ротором Савониуса.

Литература

1. Шерязов С. К., Исенов С. С., Исаков Р. М., и др. Основные типы ветротурбин-генераторов в системе электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. №5. С. 24 - 33.
2. Templin R. J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine // National Research Council of Canada. Rep. LTR 160. 1974; 185.
3. Янсон Р. А. Ветроустановки. М.: 2007. 36 с: ил.
4. Tian W., Song B., Van Zwieten J. H., et al. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes // Energies. 2015. Т. 8. № 8. С. 7915 - 7929.
5. Елаев М. В., Хальясмаа А. И., Самойленко В. О. Проблема подсинхронного резонанса в ветроэнергетических установках и системах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. Т. 12. № 3(47). С. 57-71.
6. Капанский А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2(42). С. 103-115.
7. Лаврик А. Ю., Жуковский Ю. Л., Лаврик А., и др. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 10-17.
8. Кострюков С.А., Васильев А.Р., Гусева Ю.В. Обоснование конструктивных параметров и создание физической модели ветрогенератора для комплексного исследования рабочих характеристик в лабораторных условиях // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Энергетика в условиях цифровой трансформации. Наука. Технологии. Инновации». 2022. С. 142-146.
9. Kaplya E.V. Generalization of the logistic distribution in the dynamic model of wind direction // Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics. 2016. Т. 52. № 7. С. 760-767.
10. Kaplya E.V. Energy-efficient termination control of the servo drives of modules of a solar-power plant // Russian Electrical Engineering. 2017. Т. 88. № 1. С. 40-43.
11. Капля Е.В. Обобщение закона гиперболического секанса и логистического закона распределения в единый закон распределения с варьируемым коэффициентом эксцесса // Дальневосточный математический журнал. 2020. Т. 20. № 1. С. 74-81.
12. Kaplya V.I., Silaev A.A., Kaplya E.V. Identification of the transient response of a capacitive relative humidity sensor // Measurement Techniques. 2020. Т. 62. № 12. С. 1099-1105.
13. Ruban N., Askarov A., Razzhivin I., et al. Wind power plants influence on out-of-step operation mode parameters of the power system // Electrotehnica, Electronica, Automatica. 2020. Т. 68. № 4. С. 5-10.
14. Kulyk M., Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage // Studies in Systems, Decision and Control. 2020. Т. 298. С. 231-245.

15. Mahkamadzhanov B.M., Mukhammadiev M.M., Zakhidov R.A., et al. Technological model of a combined power system based on solar, wind, and hydraulic low-power plants // *Applied Solar Energy*. 2004. Т. 39. № 3. С. 84-91.

Автор публикации

Гусева Юлия Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Фундаментальные дисциплины филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: vasilevayv@yandex.ru.

Кострюков Сергей Александрович – студент филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: kostryukovsa@mail.ru.

Васильев Андрей Романович – студент филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: vasilev.anr@yandex.ru.

References

1. Sher'yazov SK, Isenov SS, Iskakov RM, i dr. Osnovnye tipy vetroturbin-generatorov v sisteme elektrosnabzheniya. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021; 5: 24 - 33.
2. Templin RJ. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine. *National Research Council of Canada*. Rep. LTR 160. 1974; 185.
3. Yanson RA. *Vetroustanovki*. М.: 2007; 36. il.
4. TianW, Song B, Van Zwieten JH, et al. Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*. 2015; 8: 7915 - 7929.
5. Elaev MV, Khal'yasmaa AI, Samoilenko VO. Problema podsinkhronnogo rezonansa v vetroenergeticheskikh ustanovkakh i sistemakh. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2020; 3(47): 57-71.
6. Kapanskii A. A. Metody resheniya zadach otsenki i prognozirovaniya energeticheskoi effektivnosti. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019; 2(42): 103-115.
7. Lavrik AYu, Zhukovskii YuL, Lavrik A, i dr. Osobennosti vybora optimal'nogo sostava vetro-solnechnoi elektrostantsii s dizel'nymi generatorami. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020; 1: 10-17.
8. Kostryukov SA, Vasil'ev AR, Guseva YuV. Obosnovanie konstruktivnykh parametrov i sozdanie fizicheskoi modeli vetrogeneratora dlya kompleksnogo issledovaniya rabochikh kharakteristik v laboratornykh usloviyakh. *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika v usloviyakh tsifrovoi transformatsii. Nauka. Tekhnologii. Innovatsii»*. 2022; 142-146.
9. Kaplya EV. Generalization of the logistic distribution in the dynamic model of wind direction. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016; 7: 760-767.
10. Kaplya EV. Energy-efficient termination control of the servo drives of modules of a solar-power plant. *Russian Electrical Engineering*. 2017; 1: 40-43.
11. Kaplya EV. Obobshchenie zakona giperbolicheskogo sekansa i logisticheskogo zakona raspredeleniya v edinyi zakon raspredeleniya s var'iruемым koeffitsientom ekstsessa. *Dal'nevostochnyi matematicheskii zhurnal*. 2020; 1: 74-81.
12. Kaplya VI, Silaev AA, Kaplya EV. Identification of the transient response of a capacitive relative humidity sensor. *Measurement Techniques*. 2020; 12: 1099-1105.
13. Ruban N, Askarov A, Razzhivin I, et al. Wind power plants influence on out-of-step operation mode parameters of the power system. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*. 2020; 4: 5-10.
14. Kulyk M, Zgurovets O. Modeling of power systems with wind, solar power plants and energy storage. *Studies in Systems, Decision and Control*. 2020; 298: 231-245.
15. Mahkamadzhanov BM, Mukhammadiev MM, Zakhidov RA, et al. Technological model of a combined power system based on solar, wind, and hydraulic low-power plants. *Applied Solar Energy*. 2004; 3: 84-91.

Author of the publication

Yulia V. Guseva – «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Sergey A. Kostryukov –« Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Andrey R. Vasiliev – « Moscow Power Engineering Institute» (MPEI) in Volzhsky.

Получено ***25.05.2022г.***

Отредактировано ***30.05.2022г.***

Принято ***30.05.2022г.***

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ГРЕБНЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

А.Е. Савенко, П.С. Савенко

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия

Savenko-70@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть вопрос наличия искажений формы синусоидального напряжения и тока в автономных судовых электротехнических комплексах с гребными электрическими установками, построенных по принципу единой электроэнергетической системы. Сравнить результаты исследования искажений напряжения для электротехнических комплексов с гребными электрическими установками различной структуры и дать рекомендации по их применению. *МЕТОДЫ.* Для проведения исследований рассмотрены единые электроэнергетические системы с гребными электрическими установками постоянного тока на пароме «Ейск» и переменного тока на асимметричном ледоколе «Балтика». Проанализированы возможности программирования при частотном управлении современными приводами винторулевых колонок с двигателями переменного тока. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены осциллограммы напряжений и токов генераторов при использовании тиристорных преобразователей и инверторов для управления гребными электрическими установками в различных режимах. Отмечены значительные пульсации и искажения синусоидального напряжения и токов генераторов при применении тиристорных преобразователей для питания гребных электрических двигателей постоянного тока. Также зафиксированы небольшие отклонения от синусоидальной формы напряжения судовой сети при использовании инверторов при управлении гребными двигателями переменного тока в составе винторулевых колонок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Вопрос обеспечения качества производимой электроэнергии в автономных электротехнических комплексах морских судов имеет большую актуальность и значимость. Для обеспечения наилучших результатов целесообразно применение азимутальных винторулевых колонок с электрическими двигателями переменного тока, управление скоростью вращения которых реализуется инверторными преобразователями частоты со звеном постоянного тока.

Ключевые слова: *качество электроэнергии; параллельная работа; судовой электротехнический комплекс; генераторный агрегат; гребная электрическая установка; азимутальная винторулевая колонка.*

Для цитирования: Савенко А.Е., Савенко П.С. Особенности работы судовых электротехнических комплексов с гребными электрическими установками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 91-100. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100.

FEATURES OF OPERATION OF SHIP ELECTRICAL POWER SYSTEMS WITH ELECTRICAL PROPULSION SYSTEMS

AE. Savenko, PS. Savenko

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia

Savenko-70@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the issue of the presence of distortions in the form of

sinusoidal voltage and current in autonomous electrical power systems with electrical propulsion systems, built on the principle of the unified electric power system. Compare the results of the study of voltage distortion for electrical power systems with electrical propulsion systems of various structures and give recommendations for their application. METHODS. For research, unified electric power systems with DC electrical propulsion systems on the Yeysk ferry and alternating current on the asymmetric icebreaker Baltika are considered. The possibilities of programming with frequency control of modern drives of rudder propellers with AC motors are analyzed. RESULTS. Oscillograms of voltages and currents of generators were obtained using thyristor converters and inverters to control electrical propulsion systems in various modes. Significant ripples and distortions of the sinusoidal voltage and generator currents were noted when thyristor converters are used to power DC propulsion electric motors. Also, small deviations from the sinusoidal form of the ship's network voltage were recorded when inverters were used to control AC propulsion motors as part of rudder propellers. CONCLUSION. The issue of ensuring the quality of electricity produced in autonomous electrical power systems of sea vessels is of great relevance and importance. To ensure the best results, it is advisable to use azimuthing podded drive with AC electric motors, the rotation speed of which is implemented by inverter frequency converters with a DC link.

Keywords: *power quality; parallel operation; ship electric power system; generating set; marine propulsion system; azimuth rudder.*

For citation: Savenko AE., Savenko PS. Features of operation of ship electrical power systems with electrical propulsion systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3):91-100. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-91-100.

Введение

Одним из наиболее ответственных и мощных электрических приводов на морском судне может являться гребной электрический двигатель, приводящий во вращение гребной винт [1-3]. Структура такой установки может иметь различную конфигурацию по количеству гребных электрических двигателей, роду тока, взаимосвязи с другими потребителями электрической энергии на судне, типу движителя и т.д. [4-6]. Наиболее удачной считается единая электроэнергетическая система с гребной электрической установкой, когда одни и те же генераторные агрегаты вырабатывают электрическую энергию для всех судовых потребителей, то есть нет специализации или разделения источников электроэнергии по ее потребителям [7-9]. Единая система превосходит другие варианты по надежности, безопасности и экономичности [10, 11]. В настоящее время практически все судовые электростанции по роду тока основываются на переменном токе, используются дизель генераторные агрегаты переменного тока и большинство потребителей также переменного тока. Однако, некоторые электроприводы имеют в своем составе двигатели постоянного тока [12,13]. Изначально в гребных электрических установках преобладали двигатели постоянного тока из-за возможности плавной регулировки их частоты вращения [14]. Двигатели переменного тока также применялись, но значительно реже. Широкое применение гребных электрических установок на основе асинхронных и синхронных двигателей началось после появления цифровых преобразователей частоты. Сильный толчок для применения электродвигателей переменного тока в судовом электродвижении произошел после изобретения и применения новой структуры, основу которой составляют азимутальные винторулевые колонки типа *Azipod (azimuthing podded drive)* [15].

Научная значимость работы заключается в проведении исследований, направленных на сравнение качества электрической энергии в автономных судовых электротехнических комплексах с гребными электрическими установками с различной структурой на основе реальных данных, полученных на морских судах. Особый интерес представляют осциллограммы синусоидальных напряжений и токов судовых генераторов, полученные при работе гребных двигателей на судах. Для исследований намерено выбраны суда, построенные в разное время и имеющие на борту единую электроэнергетическую систему, но с разной конфигурацией, техническими решениями и элементной базой.

Практическая значимость исследования влияния тиристорных преобразователей напряжения и инверторных преобразователей частоты с звеном постоянного тока на форму синусоиды напряжения и тока генераторов заключается в том, что результаты исследования можно использовать при разработке электротехнических комплексов с гребными электрическими установками новых судов. Также результаты данной работы позволяют продолжить эксплуатацию существующих судов с гребными электрическими установками с учетом выявленных искажений синусоидального напряжения и токов генераторов.

Материалы и методы

Морской паром «Ейск» построен в декабре 1989 года и имеет на борту единую электроэнергетическую систему (рис. 1) переменного тока с двумя гребными электрическими двигателями постоянного тока типа МП2-М-630-152-8М3, 710 кВт, 440 В, 370...500 об/мин [11]. Для питания каждого их гребных электрических двигателей установлены индивидуальные статические тиристорные выпрямительные агрегаты типа КТЭ 1600/460 ЕВО, номинальный выпрямленный ток 1600 А, с плавным регулированием напряжения 460-0-460 В [11]. Электрическую энергию вырабатывают три главных дизеля 6VD26/20-AL-2 с генераторами S450MG 800кВА, 390В, 50Гц, $\cos \phi = 0.8$, 1184А и один вспомогательный дизель-генератор S350SB 200кВА, 390В, 50Гц, $\cos \phi = 0.8$ [11].

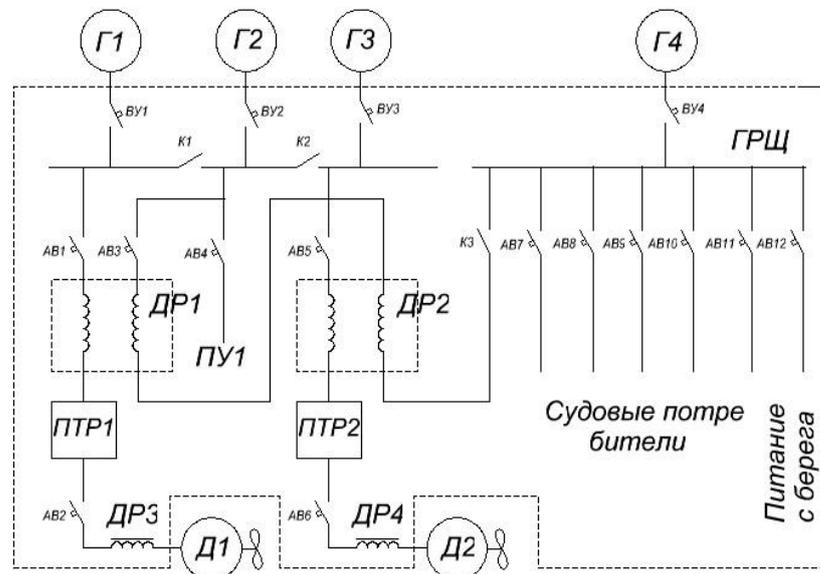


Рис.1. Схема единой электроэнергетической системы парома «Ейск».

Fig.1. Scheme of the unified electric power system of the ferry «Eisk».

Для устранения искажений синусоидального напряжения при коммутации силовых тиристорных блоков потребовалась установка реакторов, предполагалось, что они должны ограничить искажения 10 процентами.

Ледокол «Балтика» с ассиметричным корпусом построен в 2014 году и представляет суда нового поколения. Судно имеет на борту единую электроэнергетическую систему (рис. 2) переменного тока с тремя синхронными генераторами AMG 0630MP06 LSA, 3300 кВа, 690 В, 50 Гц, $\cos \phi = 0.9$, 2761 А. Для питания трех гребных электродвигателей переменного тока АМІ 560L6L, 2500 кВт, 630 В, 700... 950 об/мин установлены три инверторных преобразователя частоты ACS800-07LC-3970-7, мощностью 3970 кВа, напряжением 690/630 В переменного тока, номинальный ток 3324 А. Для устранения искажений синусоиды напряжения судовой сети установлены два фильтра 5-й гармоники. Гребные электрические установки имеют структуру азимутальных винторулевых колонок типа *Azipod* с системой управления приводом ACS800, имеющей широкие возможности управления пропульсивной установкой, которые определяются программированием. Управление приводом осуществляется по линии связи fieldbus и возможно через программу *DriveWindow* через персональный компьютер.

Предусмотрено программное управление системой в дистанционном и местном режимах. Функция «ручное/авто» пригодна для приложений, требующих возможности

выбора между управлением по последовательной линии связи и управлением входами/выходами. Для изменения пункта управления может быть выбран цифровой вход. С одним приводом можно использовать два интерфейса последовательной связи. Все блоки расширения входов/выходов, присоединяемые к каналу CH1 линии связи DDCS, подключаются по схеме «кольцо». Канал CH1 действует в линии связи как ведущий. Текущим главным устройством линии связи является плата RMIO. Каждый блок ввода/вывода имеет индивидуальный адрес, устанавливаемый с помощью DIP-переключателей на этом блоке. Перед использованием каждый блок ввода/вывода необходимо активизировать.

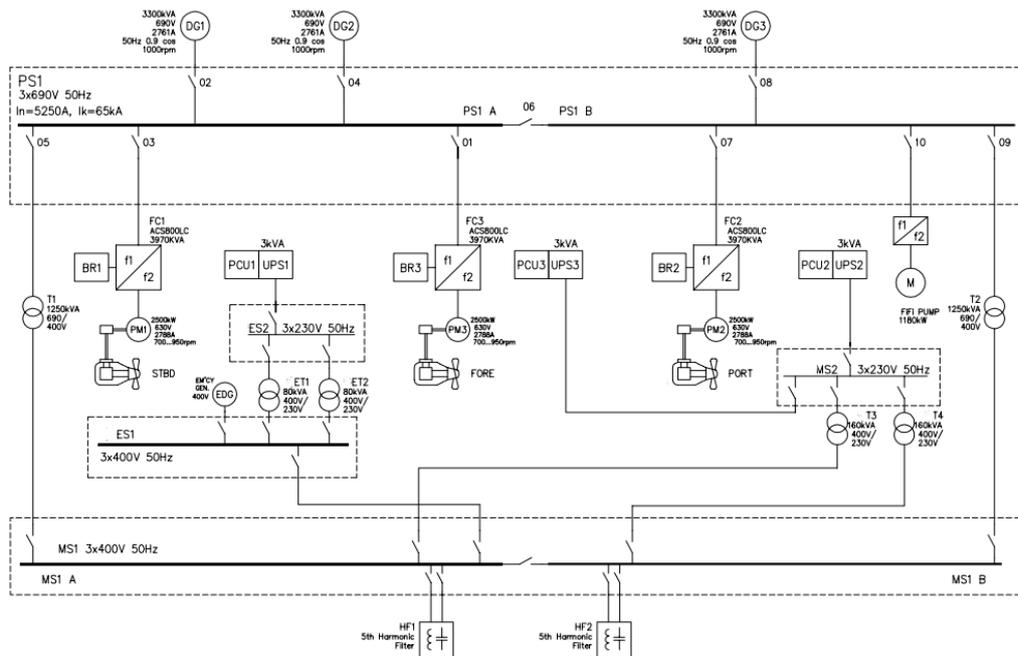


Рис.2. Схема единой электроэнергетической системы ледокола «Балтика».. *Fig.2. Diagram of the unified electric power system of the ice-breaker «Baltica».*

При работе привода в режиме местного управления, управляющие команды подаются с клавиатуры панели управления или от персонального компьютера с установленной на нем программой *DriveWindow*. Если используется панель управления, о работе в режиме местного управления свидетельствует буква *L* на дисплее панели.

Контроль перенапряжения промежуточного звена постоянного тока необходим в случае двухквadrантных преобразователей на стороне сети, когда двигатель работает в генераторном квадранте. Во избежание возрастания напряжения постоянного тока сверх допустимого предела, контроллер перенапряжения автоматически снижает тормозной момент в генераторном режиме, когда этот предел достигается.

Автоматический перезапуск привода применяется после кратковременного отказа питания (не более 5 секунд) с помощью функции «автоперезапуск», если: плата *RMIO* питается от системы бесперебойного питания (*UPS*); цепь цифрового входа *DI2* во время отказа питания остается замкнутой; допускается работа инвертора в течение периода продолжительностью до 5 секунд без вентиляторов инверторов. Максимальную длительность отказа питания для функции автоматического перезапуска можно регулировать. Заводская настройка равняется 5 секундам.

Аппаратные средства *ACS800* и программа управления системой выполняют аварийный останов следующих классов: немедленное отключение питания, управляемый аварийный останов.

Функция безопасного отключения крутящего момента отключает управляющее напряжение от силовых полупроводниковых приборов инвертора, т.е. выключается выходное напряжение привода.

Функция демпфирования колебаний гасит механические колебания или колебания напряжения постоянного тока в промежуточной цепи. В качестве источника колебаний выбирается ошибка скорости или напряжение постоянного тока. Результатом выполнения алгоритма демпфирования колебаний является синусоида. Эта синусоида может

суммироваться с заданием крутящего момента с надлежащим коэффициентом усиления и фазовым углом.

Измеряемая скорость всегда имеет небольшие пульсации, обусловленные механической интерференцией и механическими связями. Небольшие пульсации допустимы до тех пор, пока они не влияют на контур регулирования скорости. Снижение пульсаций с помощью фильтров может затруднить настройку. Большая постоянная времени фильтра и малое время разгона противоречат друг другу. Если измерение скорости обнаруживает быстрые колебания, их можно отфильтровать с помощью фильтра ошибки скорости и путем установки постоянной времени фильтра текущей скорости первого порядка.

Работе привода можно воспрепятствовать с помощью функции блокировки. Если эта функция активна, пуск двигателя предотвращается, а если двигатель уже работает, то он останавливается.

С помощью разветвительного блока *APBU* можно соединить параллельно от 2 до 12 инверторов. Плата *AINT 1* подключается к каналу *CH1* блока *APBU*, плата *AINT 2* - к каналу *CH2* и т.д. Функция пониженного режима работы предусмотрена для случая параллельного соединения 2 – 12 инверторных модулей типоразмера *R8i*. Эта функция позволяет продолжить работу с ограниченным током в случае выхода из строя одного или нескольких инверторных модулей.

Результаты

Исследования проведены на пароме «Ейск» при параллельной работе двух дизель-генераторов мощностью 800 кВА на судовую сеть и двух работающих гребных двигателях на винты регулируемого шага. При этом зафиксированы значительные искажения формы напряжения судовой сети 400 В и токов генераторов, искажения достигают 80%. Осциллограммы снимались при начале работы гребных двигателей через тиристорные преобразователи (рис. 3), в ходовом режиме (рис. 4) и при швартовке к причалу (рис. 5).

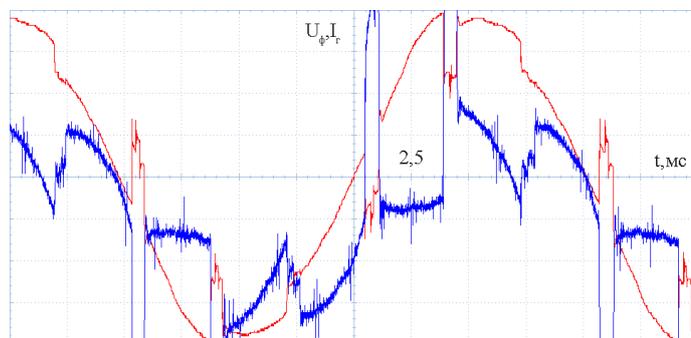


Рис. 3. Начало работы гребных двигателей, напряжение и ток дизель-генератора. *Fig. 3. Start of combustion engines, voltage and current of diesel generator.*

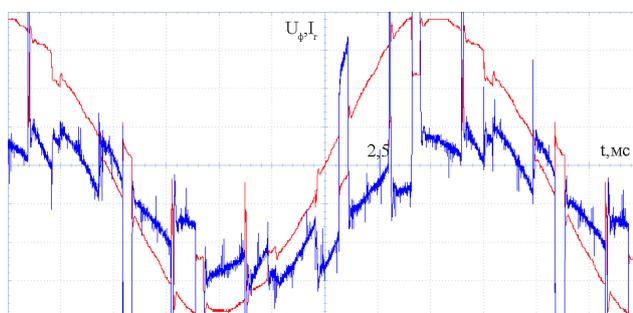


Рис. 4. Ходовой режим работы гребных установок, напряжение и ток дизель-генератора. *Fig. 4. Propulsion mode, voltage and current of diesel generator.*

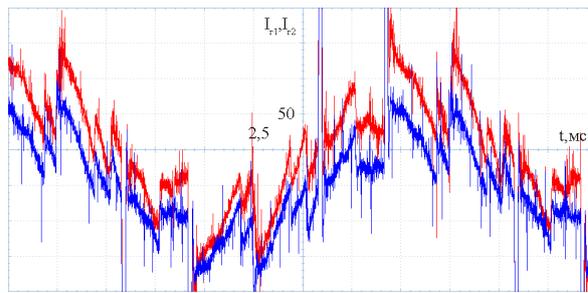


Рис. 5. Швартовка к причалу, токи генераторов при параллельной работе.

Fig. 5. Mooring to the dock, generator currents in parallel operation.

На ледоколе «Балтика» проведены исследования качества напряжения судовой сети во время работы гребных электрических установок. В рабочем режиме 1, соответствующем полной мощности, подключены три генератора мощностью 3 300 кВА, работают три 6-импульсных пропульсивных привода мощностью 2 500 кВт каждый, один низковольтный трансформатор, питающий нагрузку 700 кВт при коэффициенте мощности 0,80, два фильтра 5-й гармоники подключены к цепи 400 В переменного тока MS1. При этом суммарные гармонические искажения $THDu = 14,3\%$ в сети 690 В переменного тока PS01 и $THDu = 6,4\%$ в 400 В переменного тока MS1. Формы сигналов напряжения и спектры напряжения показаны на рисунках 6 и 7.

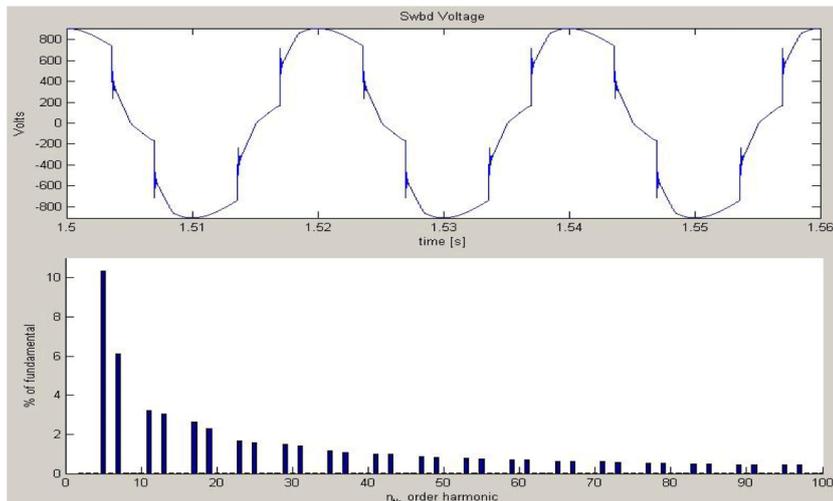


Рис. 6. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 690 В переменного тока PS01 (режим 1).

Fig. 6. Waveform of linear voltage and spectra at 690 V AC PS01 (mode 1).

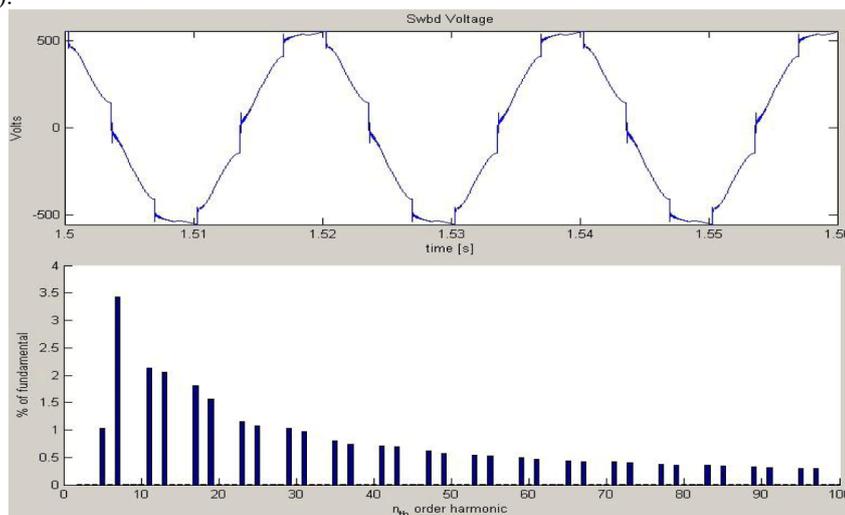


Рис. 7. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 400 В переменного тока MS1 (режим 1).

Fig. 7. Waveform of linear voltage and spectra at 400 V AC MS1 (mode 1).

В рабочем режиме 2, соответствующем работе с двумя генераторами, подключены два генератора по 3 300 кВА, работают два 6-импульсных пропульсивных привода мощностью 2 500 кВт каждый, один низковольтный трансформатор, питающий нагрузку 400 кВт при коэффициенте мощности 0,80, два фильтра 5-й гармоники подключены к цепи 400 В переменного тока MS1. При этом суммарные гармонические искажения THDu = 13,4 % в сети 690 В переменного тока PS01 и THDu = 6,1 % в 400 В переменного тока MS1. Формы сигналов напряжения и спектры напряжения показаны на рисунках 8 и 9.

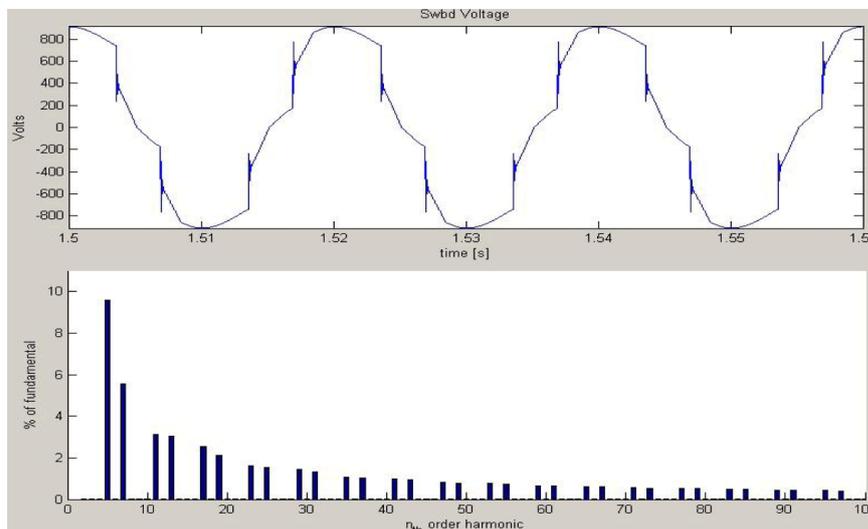


Рис. 8. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 690 В переменного тока PS01 (режим 2). *Fig. 8. Waveform of linear voltage and spectra at 690 V AC PS01 (mode 2).*

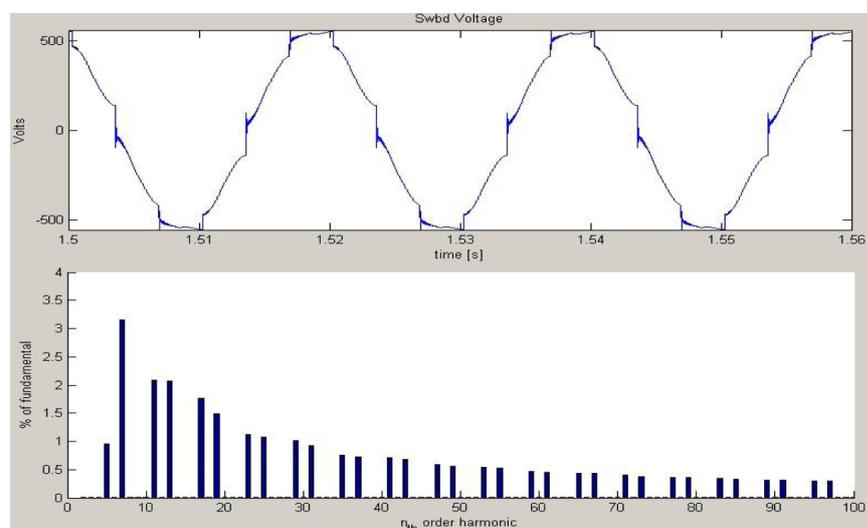


Рис. 9. Форма сигнала линейного напряжения и спектры при 400 В переменного тока MS1 (режим 2). *Fig. 9. Waveform of linear voltage and spectra at 400 V AC MS1 (mode 2).*

Обсуждение

В результате проведенных исследований доказано существование значительных искажений синусоидальной формы напряжений судовой сети на пароме «Ейск» во время работы тиристорных преобразователей напряжения для питания гребных электрических двигателей постоянного тока. Принятые заводом изготовителем меры в виде установки сглаживающих реакторов не позволяют обеспечить ограничение искажений в заявленные 10 %. Результаты исследования работы судового электротехнического комплекса ледокола «Балтика» во время работы гребных электрических двигателей переменного тока так же продемонстрировали отклонение формы напряжения судовой сети от синусоидальной, однако в гораздо меньших пределах. Очевидно, лучшее качество электрической энергии на ледоколе «Балтика» обеспечивается совершенно иной структурой электротехнического комплекса судна в сравнении с паромом «Ейск». На

обоих судах установлены синхронные бесщеточные генераторы переменного тока. Однако, применение в составе винторулевых колонок ледокола «Балтика» двигателей переменного тока, частота вращения которых управляется частотой питающего напряжения при помощи инверторных блоков показало лучшие результаты, чем управление тиристорными преобразователями двигателями постоянного тока на пароме «Ейск». Также, большой вклад в обеспечение качества электрической энергии судовой сети ледокола «Балтика» вносят более современные системы автоматического управления электротехническим комплексом, а именно возможности программирования привода ACS800 и цифровая система управления возбуждением генераторов от компании *Basler DECS-100*. Функциональные свойства *DECS-100* включают четыре режима функционирования, четыре защитные функции, средства обеспечения запуска, компенсацию реактивного падения, компенсацию пониженной частоты и дополнительное согласование напряжения. В режиме автоматического регулятора напряжения (*AVR*) *DECS-100* регулирует среднеквадратическое выходное напряжение генератора. Он выполняет это, считывая выходное напряжение генератора и подстраивая выходной постоянный ток возбуждения для поддержания напряжения на заданном значении регулирования.

Заключение

Вопрос обеспечения качества производимой электроэнергии в автономных электротехнических комплексах морских судов имеет большую актуальность и значимость. Особую сложность и влияние на работу электротехнического комплекса имеет синусоидальная форма напряжения для судов с гребными электрическими установками. Гребные электрические установки являются наиболее мощными судовыми потребителями электроэнергии и требуют управления скоростью вращения, что оказывает наибольшее воздействие на синусоидальность кривой напряжения судовой сети.

Известные из литературы исследования работы автономных электротехнических комплексов с гребными электрическими установками посвящены в основном развитию их конструкции и элементной базы с целью улучшения ходовых характеристик судна и установлению преимуществ по отношению к судам, на которых для вращения гребных винтов служат дизельные двигатели. В отличие от рассмотренных в литературном обзоре результатов данное исследование заключается в получении реальных экспериментальных данных электротехнических комплексов разной структуры на морских судах с гребными электрическими установками и в их сравнении и анализе с точки зрения искажения формы синусоидального напряжения и токов генераторов. Для обеспечения наилучших результатов в указанном вопросе целесообразно применение азимутальных винторулевых колонок с электрическими двигателями переменного тока, управление скоростью вращения которых реализуется инверторными преобразователями частоты со звеном постоянного тока.

Литература

1. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
2. Geertsma, R. D.; Visser, K.; Negenborn, R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy, 2018, Том: 228, Стр.: 2490-2509 DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080
3. Mondejar, M. E.; Andreasen, J. G.; Pierobon, L.; Larsen, U; Thern, M.; Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, Том: 91, Стр.: 126-151 DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.
4. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), стр. 253–258.
5. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С., Кузнецов В. И., Сеньков А. П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.
6. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Том: 210, Номер статьи: 118558 DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.
7. Савенко А.Е., Савенко П.С. Колебания мощности в единых судовых электроэнергетических системах с гребными электрическими установками. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(5):172-183.
8. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing. Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon

2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering. С. 400–405.

9. Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П. Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. 2017. № 12. С. 18–23.

10. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Том: 120, Номер статьи: 109611 DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

11. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. Иваново, 2016. – 172 с.

12. Грачева Е.И., Ильясов И.И., Алимова А.Н. Сравнительный анализ и исследование методов расчета потерь электроэнергии в системах электроснабжения промышленных предприятий. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. Т.20 № 3-4. С. 62–71.

13. Ившин И.В., Низамиев М.Ф., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 109–114.

14. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.

15. Савенко А.Е., Савенко П.С. Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021;23(6):99–108.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. 298309, РФ, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе 82. Savenko-70@mail.ru

Савенко Павел Станиславович – курсант морского факультета Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.

2. Geertsma, R. D.; Visser, K.; Negenborn, R. R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. Applied energy, 2018, Book: 228, pp. 2490–2509, DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080

3. Mondejar, M. E.; Andreasen, J. G.; Pierobon, L.; Larsen, U; Thern, M.; Haglind, F. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, Book: 91, pp.: 126–151, DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.074.

4. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), pp. 253–258.

5. Gubanov Y. A., Kalinin I. M., Kornev A. S., Kuznetsov V. I., Sen'kov A. P. Directions of improvement for ship unified power systems. Marine Intelligent Technology, 2019, №1-1(43), pp. 103–109.

6. Zhu, Sipeng; Ma, Zetai ; Zhang, Kun ; Deng, Kangyao. Energy and exergy analysis of the combined cycle power plant recovering waste heat from the marine two-stroke engine under design and off-design conditions. Energy, 2020, Book: 210, 118558, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118558.

7. Savenko A.E., Savenko P.S. Research of current distribution by phases in asynchronous electric motor with a combined winding. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(5):172–183.

8. Savenko A.E., Savenko P.S. Analysis of Power Oscillations Parameters in Autonomous Electrical Complexes Using the Method of Customization Charts Designing.

Proceedings – 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020, Proc. 2020 Int. Ural Conf. on Electrical Power Engineering, pp. 400–405.

9. Batrak D.V., Kalinin I.M., Kuznetsov V.I., Sen'kov A.P. Assessment of supply-voltage quality in a ship's electric-power system by means of computer simulation. Russian Electrical Engineering. 2017. T. 88. № 12. С. 788-794.

10. Zhu, Sipeng; Zhang, Kun; Deng, Kangyao. A review of waste heat recovery from the marine engine with highly efficient bottoming power cycles. Renewable & sustainable energy reviews, 2020, Book: 120,109611, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109611.

11. Savenko A.E, Golubev A.N. Exchange power fluctuations in ship electrotechnical complexes. Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina. Ivanovo, 2016. 172 p.

12. Gracheva EI, Il'jasov I, Alimova AN. The comparative analysis and research of methods of calculation of losses of the electric power in the systems of electrical power supply of the industrial enterprises. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(3-4):62-71.

13. Ivshin I.V, Nizamiev M.F, Vladimirov O.V. Measuring-diagnostic complex for the diagnosis of power plants. Power engineering: research, equipment, technology. 2014;3-4:109-114. 3

14. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznecov P. V., Ship power plant with reversible shaft generator unit operating by dual-power machine scheme and variable speed diesel generator. Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta , 2021, № 3. С. 93–100.

15. Savenko A.E., Savenko P.S. Supporting the operation of the electrical power system of modern special purpose vessels with dynamic positioning. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(6):99-108.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko - Kerch State Maritime Technological University. Savenko-70@mail.ru.

Pavel S. Savenko - marine faculty cadet, Kerch State Maritime Technological University.

Поступило **30.05.2022г.**

Отредактировано **02.06.2022г.**

Принято **02.06.2022г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 697.34 .

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИЕЙ ИТП

Горинов^{1,2} Ю.А., Анисимов¹ П.Н.

¹Поволжский государственный технологический университет,

²МУП «Йошкар-Олинская ТЭЦ-1»

ORCID0000-0002-7789-2399

Резюме: ЦЕЛЬЮ работы является повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения. В статье описана актуальность темы, рассмотрены проблемы функционирования систем централизованного теплоснабжения с открытым водоразбором. Выполнен анализ технических решений модернизации индивидуальных тепловых пунктов. Разработана технологическая схема ИТП с приставкой на горячее водоснабжение. Определены основные технико-экономические и инвестиционные показатели применения разработанного технического решения. **МЕТОДЫ.** При решении поставленных задач применена методика оценки эффективности с расчетом капитальных и эксплуатационных затрат, включая расчет срока окупаемости. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты внедрения разработанного технического решения в индивидуальных тепловых пунктах многоквартирных домов г. Йошкар-Олы: снижен расход сетевой воды на 36 - 39%; снижена температура в обратном трубопроводе на 13,5%; снижено теплосодержание горячей воды с 0,168 до 0,145 Гкал/м³, обеспечена требуемая циркуляция во всех стояках системы горячего водоснабжения. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложена новая схема регулирования рециркуляции ГВС при открытом присоединении потребителей к централизованному источнику. Применение разработанного технического решения модернизации ИТП повышает эффективность централизованных систем теплоснабжения и может быть рекомендовано к внедрению в индивидуальных тепловых пунктах зданий с открытым водоразбором. Расчеты, выполненные на основании показаний общедомовых коммерческих приборов учета, показали, что срок окупаемости технического решения составляет 40 суток. Впервые выполнено экспериментальное исследование влияния совместной дополнительной установки насоса и регулирующего клапана на линии рециркуляции ГВС перед узлом смешения рециркуляции ГВС с обратной СО и перед регулятором температуры прямого действия. Результаты экспериментального исследования могут быть использованы при технико-экономическом обосновании аналогичных схемных решений модернизации систем ГВС. Предложенная схема модернизации теплового узла может быть использована в централизованных системах теплоснабжения с открытым присоединением систем ГВС с целью снижения расхода сетевой воды, снижения температуры в обратном трубопроводе и снижения тепловых потерь, улучшения циркуляции во всех стояках системы ГВС.

Ключевые слова: энергетические системы и комплексы; централизованная система теплоснабжения; открытый водоразбор; индивидуальный тепловой пункт; приставка на горячее водоснабжение; экономическая эффективность.

Для цитирования: Горинов Ю.А., Анисимов П.Н. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения модернизацией ИТП // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 101-111. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111.

INCREASING THE EFFICIENCY OF DISTRICT HEATING SUPPLY SYSTEMS BY LOCAL HEAT DISTRIBUTION STATION MODERNATION

YuA. Gorinov^{1,2}, PN. Anisimov¹

¹Pavolga State University of Technology,

MUP «Yoshkar-Olinskaya CHPP-1»

Abstract: The PURPOSE of the study is to improve the efficiency of district heating systems. To achieve this purpose, the following tasks must be completed. To consider the problems of functioning of an open heat supply system functioning. Perform an analysis of technical solutions for the modernization of local heat distribution and metering station are presented. To develop a technological scheme of local heat distribution station with a hot-water supply system. To determine the main technical, economic and investment indicators of the developed technical solution. **MATERIALS AND METHODS.** Measurements were made using the local heat metering station. When solving the set tasks, a methodology for assessing efficiency was applied with the calculation of capital and operating costs, including the calculation of the payback period. **RESULTS.** A new scheme for regulating of hot water supply system recirculation with open connection of consumers to a centralized source is proposed. The results of the implementation of the developed technical solution of local heat distribution and metering station for apartment buildings in Yoshkar-Ola city are presented. An experimental study of the effect of a joint additional installation of a pump and a control valve on the hot water supply system recirculation line before the mixing unit for hot water recirculation with return pipe and before the direct-acting temperature controller was the first to do. As a result, the consumption of district water was reduced by 36 - 39%, the temperature in the return pipeline was reduced by 13.5%; the enthalpy of the hot water was reduced from 0.168 to 0.145 Gcal/m³, the required circulation in all risers of the hot water supply system was ensured. **CONCLUSION.** The use of the developed technical solution for the modernization of local heat distribution and metering station increases the efficiency of district heating supply systems. Calculations made on the basis of the readings of automatic custody heat transfer meter showed that the payback period for the technical solution is 40 days. The proposed solution is recommended for use in local heat distribution station of open heat supply system in order to reduce water rate, lower the temperature in the return pipeline and reduce heat losses, improve circulation in all riser pipes of the hot water system.

Keywords: energy systems and complexes; district heating supply system; open heat supply system; local heat distribution and metering station; hot water supply system; economic efficiency.

For citation: Gorinov YuA, Anisimov PN. Increasing the efficiency of district heating supply systems by local heat distribution station modernation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 101-111. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-101-111.

Введение

Развитие теплоснабжения в нашей стране ориентировано на создание крупных систем централизованного теплоснабжения [1]. Российская система теплоснабжения включает в себя более 50 тыс. локальных систем теплоснабжения. Система теплоснабжения включает в себя источник тепла, систему транспорта теплоносителя (тепловые сети) и системы теплопотребления. Подключение систем теплопотребления к тепловым сетям осуществляется в тепловых пунктах [2]. Развитие централизованных систем теплоснабжения в нашей стране произошло во время советского периода. Почти 50 % всех систем теплоснабжения были открытого типа, характеризующиеся тем, что водоразбор горячей воды для нужд потребителя происходит непосредственно из теплосети, причем, водоразбор может быть как полным (тупиковая схема), так и частичным (циркуляционная схема). Остающаяся в системе сетевая вода продолжает использоваться для отопления или вентиляции [3, 4]. Преимущество открытой системы теплоснабжения заключается в ее экономической выгоде: минимальные капитальные затраты на сооружение теплотрасс, централизация очистки горячей воды. В то же время, нельзя сбрасывать со счетов то, что такая система теплоснабжения имеет и ряд существенных недостатков. Прежде всего, это невысокое санитарно-гигиеническое качество воды [5]. Отопительные приборы и трубопроводные сети придают воде специфический запах и цветность, появляются различные посторонние примеси, а также, бактерии. Переменный расход сетевой воды в системе теплоснабжения создает определенные трудности с ведением гидравлического режима работы. Располагаемый напор перед тепловым пунктом не стабилен, следовательно, невозможно обеспечить постоянный расход воды в системе отопления. В результате происходит недотоп или перетоп потребителей [6]. Требования соблюдения установленных нормативными актами ограничений минимальной температуры 60 °С и максимальной 75 °С горячей воды на водоразборном кране потребителя, привели к необходимости осуществления повышенной циркуляции в системе горячего водоснабжения [7, 13]. В

результате повышается температура воды в циркуляционном трубопроводе горячего водоснабжения, и как следствие, в обратном трубопроводе тепловой сети. Опыт эксплуатации показывает, что оптимальными температурами для системы горячего водоснабжения с учетом потерь тепловой энергии в полотенцесушителях являются 60°C в подающем и 50°C в циркуляционном трубопроводе. При этом, вначале температурного графика отпуска тепла температура воды из систем горячего водоснабжения повышает температуру сетевой воды в обратном трубопроводе, а затем после их выравнивания, понижая ее.

Согласно ст. 29 ФЗ-190 «О теплоснабжении» с 1 января 2022 года предусмотрен запрет на использование централизованных открытых систем теплоснабжения. Это требование вызвало бурное обсуждение специалистов энергетической отрасли. В частности, Правительство г. Санкт-Петербурга предложило поправки, которые сводились к тому, что срок перехода на закрытую систему устанавливается «при условии наличия в схеме теплоснабжения обоснования экономической эффективности реализации мероприятий» или «в случае нарушений требований к качеству и безопасности воды». При этом все расходы необходимо учитывать в тарифе на тепловую энергию. В настоящее время указанное требование закона изменено.

Наиболее экономически целесообразным является модернизация открытых систем теплоснабжения [11, 12, 15]. Например, в Ульяновске в качестве решения проблемы управления циркуляцией горячей воды предложена и прошла апробацию схема с установкой дроссельных диафрагм на циркуляционных линиях ГВС и термостатических клапанов. Достигнуты определенные положительные результаты по снижению фактических расходов горячей воды, снижена температура в циркуляционном трубопроводе, снижен расход тепла на подогрев [8, 9]. Но, к сожалению, в публикации не приведена технологическая схема, что несколько затрудняет восприятие работы. Таким образом, особую актуальность и большую народнохозяйственную значимость приобретает задача повышения эффективности и надежности функционирования систем теплоснабжения, требующая решения вопросов рационального использования топлива, материальных и трудовых ресурсов, энергосбережения, улучшения экологической обстановки и обеспечения на высоком уровне снабжения энергоресурсами населения. Решением проблем эксплуатации централизованных систем теплоснабжения с открытым водоразбором является модернизация существующих индивидуальных тепловых пунктов путем установки автоматики регулирования [10, 14].

Научная значимость данного исследования заключается в разработке новой схемы регулирования рециркуляции ГВС, а также в результатах экспериментального исследования влияния совместной дополнительной установки насоса и регулирующего клапана на линии рециркуляции горячего водоснабжения перед узлом смешения рециркуляции горячей воды с обратной СО и перед регулятором температуры прямого действия, впервые полученных для данной схемы.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологических решений, позволяющих обеспечить снижение расхода сетевой воды, снижения температуры в обратном трубопроводе и снижения тепловых потерь, а также улучшения циркуляции во всех стояках системы ГВС многоквартирного жилого дома.

Материалы и методы

Техническое решение модернизации теплового узла заключается в установке регулирующего клапана и насоса на циркуляционном трубопроводе горячего водоснабжения. Схема теплового узла до модернизации приведена на рисунке 1, после модернизации на рисунке 2.

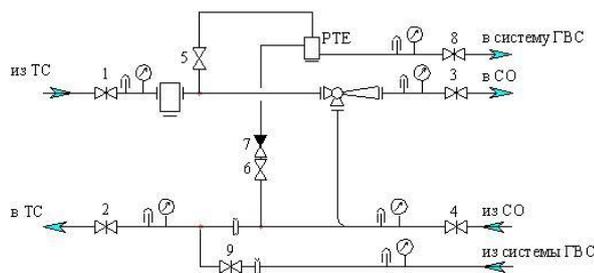


Рис. 1. Схема теплового узла до модернизации: Fig. 1. Schematic diagram of the local heat distribution station before modernization: 1,2,3,4,5,6,8,9 – запорная арматура; 7 – обратный клапан. 1,2,3,4,5,6,8,9 – stop valves; 7 – check valve.

Для анализа результатов внедрения технического решения использованы показания коммерческих приборов учета многоквартирных домов, а также измерители самопишущие ИС-201. Приборы имеют свидетельства о ежегодной поверке и допущены для ведения коммерческих расчетов. Обработка результатов выполнена с помощью комплекса компьютерных программ *MicrosoftWord* и *MicrosoftExcel*. В работе использованы методы вычислительной математики.

Краткая характеристика клапана: клапан смесительный 3-х ходовой, диапазон регулирования 20 – 55 °С, настройка выполняется путем выставления регулятора в положение от «1» до «6». При выполнении монтажных работ один из выходов («холодный») заглушен, таким образом клапан функционально переведен в режим 2-х ходового.

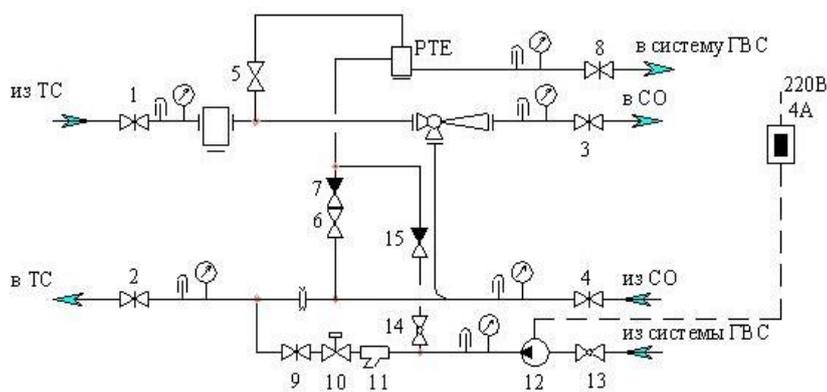


Рис. 2. Схема теплового узла после модернизации: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 и 7 тоже, что на рис. 1; 10 – термостатический клапан; 11 – сетчатый фильтр; 12 – циркуляционный насос; 15 – обратный клапан.

Fig. 1. Schematic diagram of the local heat distribution station after modernization:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, and 7 – the same as at 1-st fig.; 10 – thermostatic valve; 11 – mesh filter; 12 – circulating pump; 15 – check valve.

По результатам эксплуатации модернизированных тепловых узлов выявлено:

- клапан работает устойчиво, амплитуда колебаний температуры в циркуляционной линии ГВС не превышает 3 – 4 °С;
- шум при работе клапана отсутствует;
- жалобы от потребителей на низкую температуру ГВС и шум не поступали;
- производителем указан диапазон регулирования клапана 20 – 55 °С. В реальной эксплуатации верхняя граница диапазона доходит до 60 – 63 °С, в следствие чего клапан необходимо ставить в положение «5»;
- также в нескольких тепловых узлах клапаны перестали работать по причине засора мелкими частицами;
- рекомендуется при применении регулирующего клапана устанавливать сетчатый фильтр диаметром не менее Ду 25, байпас регулирующего клапан при модернизации приставок ГВС из схемы исключить.

Анализ результатов и их обсуждение

Выполнено сравнение за июль и август 2021года данных ОДПУ МКД с 20 - ти модернизированными тепловыми узлами, имеющими приставки на горячее водоснабжение. Температура воды в циркуляционном трубопроводе из системы ГВС не превышает 50 °С (рис. 3).

В результате внедрения технического решения в тепловых узлах в августе 2021 снизились расходы в подающем и обратном трубопроводе в среднем 36-39 % по сравнению с июлем, при этом увеличилось фактическое потребление абонентами теплоносителя на 137,24 м³ (15,68 %).

**Замеры температуры ул. Машиностроителей №61 ТУ 2 19.10-20.10.2020 г.
байпас закрыт, насос 1 скорость, клапан 5.5**

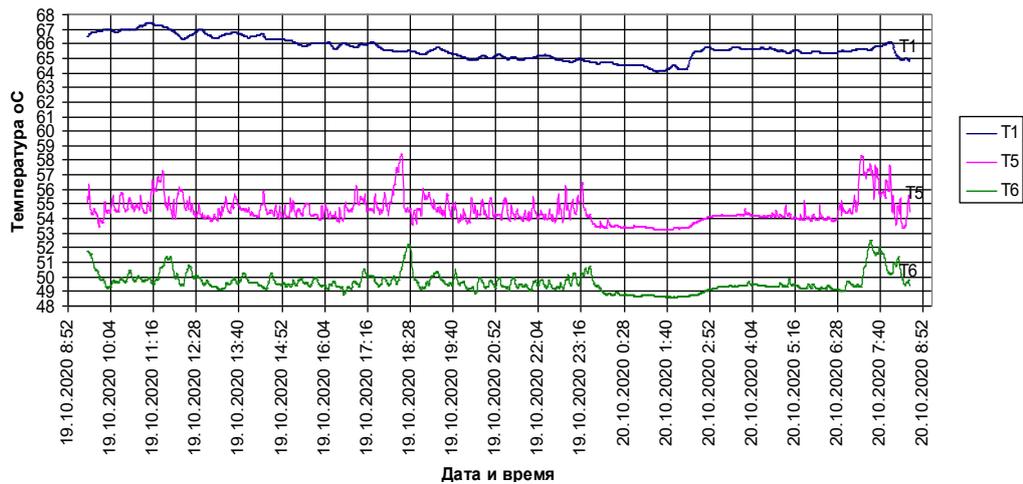


Рис.3. График температуры воды в многоквартирном жилом доме ул. Машиностроителей, 61: T1 – температура в подающем трубопроводе на вводе в тепловой узел; T5 – температурв в подающем трубопроводе системы ГВС, T6 - температура в циркуляционном трубопроводе системы ГВС

Fig.3. The graph of water temperature in the apartment house at Mashinostroiteley St., 61: T1 - temperature in the supply pipeline at the inlet to the local heat distribution station; T5 - temperature in the supply pipeline of the hot water supply system; T6 - temperature in the circulating pipeline of the hot water supply system

Анализируя показатели узла учета тепловой энергии (далее УУТЭ) микрорайона №3 (рис. 4, рис. 5 и рис. 6) были получены следующие результаты. После выполнения мероприятия расход теплоносителя по микрорайону №3 снизился на 300 т/сут. Потребление горячей воды по показателю ДМ увеличилось. В летний период экономический эффект составит $30 \text{ т} * 1736,88 \text{ руб/м}^3 = 52106 \text{ руб/сут}$.



Рис. 4. Показания УУТЭ мкр. №3. Анализ по показателю M1, M2

Fig. 4. The readings of automatic custody heat transfer meter of microraion N 3. Analysis by indicator M1, M2

Температура теплоносителя t_2 превышала расчетную по графику на 4 °С, после выполнения мероприятия - снизилась на 2,6 °С. Экономический эффект от снижения t_2 на 3 °С выразится в снижении тепловых потерь (оценочно на 2-2,5 %).

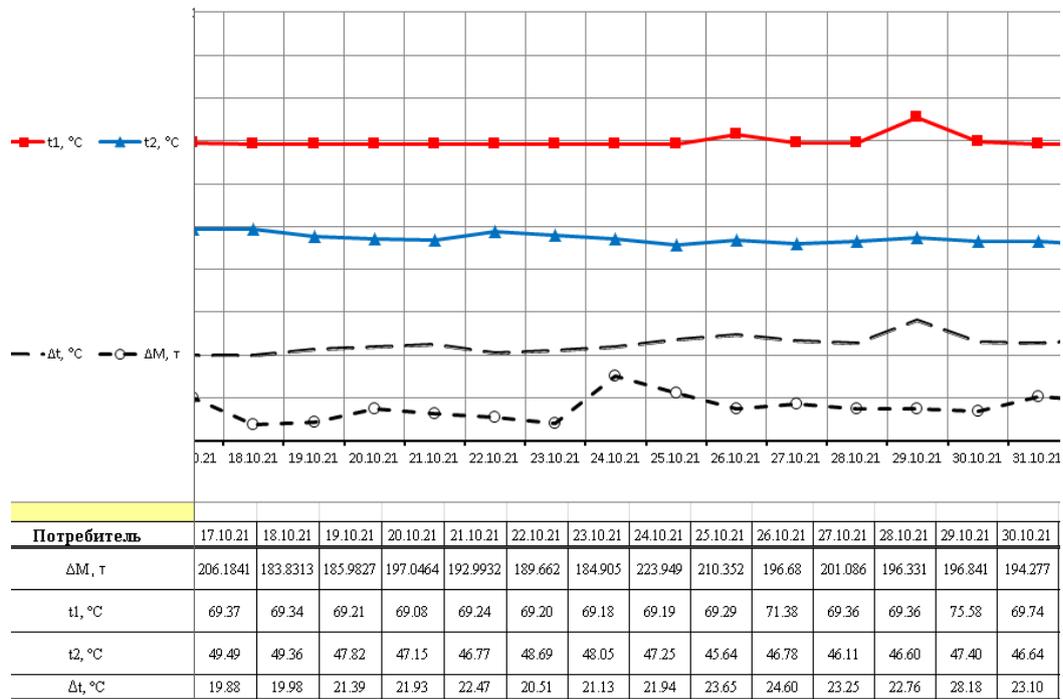


Рис. 5. Показания УУТЭ мкр. №3. Анализ по показателям ΔM, t1, t2, Δt

Fig. 5. The readings of automatic custody heat transfer meter of microrailon N 3. Analysis by indicators ΔM, t1, t2, Δt

В результате модернизации снижено превышение температуры теплоносителя в обратном трубопроводе, снижена фактическая разница между температурой теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе по сравнению с температурным графиком.

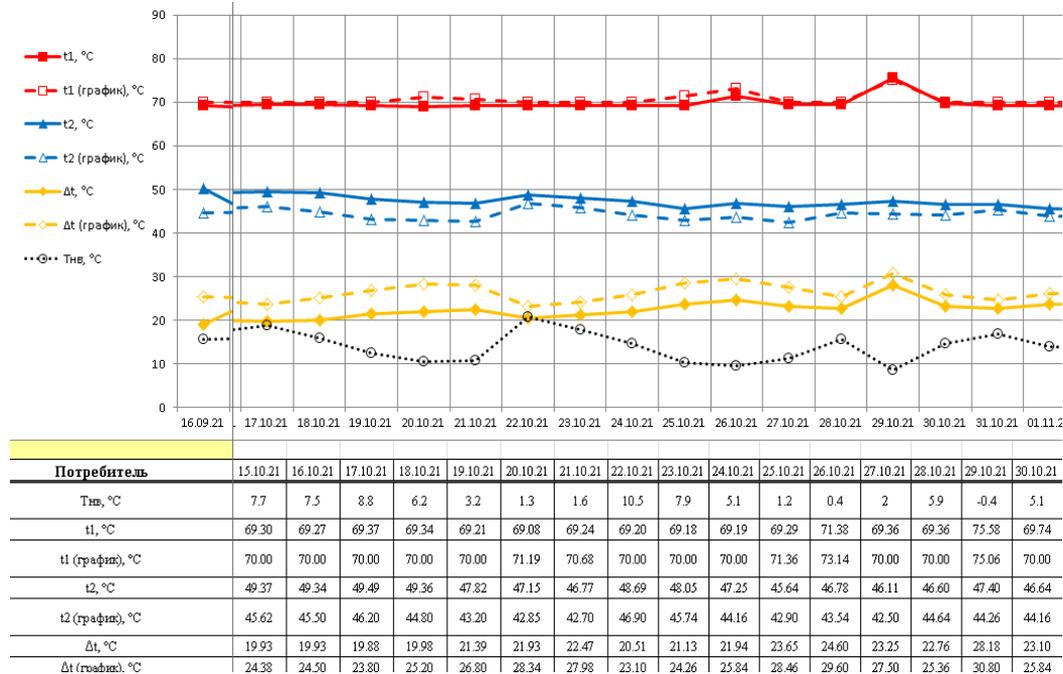


Рис. 6. Анализ по показателям t1, t2, Δt, Tnv

Fig. 6. Analysis by indicators t1, t2, Δt, Tnv

Анализ изменения расхода тепловой энергии до и после модернизации, приведенный к средней температуре наружного воздуха за отопительный период, а также в системе ГВС приведен в таблице 1.

В результате реализации мероприятия снизился расход теплоносителя в подающем трубопроводе, увеличился расход теплоносителя в подающем трубопроводе системы ГВС, снизилось превышение температуры в обратном трубопроводе тепловой сети.

Анализ расхода тепловой энергии до и после модернизации приставки системы горячего водоснабжения

Адрес	До установки РТ			После установки РТ		
	Q _{ГВС} , Гкал/сут	Q _{от.прив} (-4.7), Гкал/сут	Q _Σ прив (-4.7), Гкал/сут	Q _{ГВС} , Гкал/сут	Q _{от.прив} (-4.7), Гкал/сут	Q _Σ прив (-4.7), Гкал/сут
ул. Анциферова, 1	0,47	4,45	4,92	0,56	3,22	3,79
ул. Машиностроителей,2 ввод.1	0,63	2,06	2,69	0,65	1,74	2,39
ул.Машиностроителей,2 ввод.2	0,32	1,86	2,19	0,28	1,59	1,87
ул. Машиностроителей, 2а	0,39	6,53	6,92	0,43	6,24	6,67
ул. П.Курсантов,4	1,34	7,36	8,71	1,40	5,92	7,32
ул. П.Курсантов,4а	0,53	3,63	4,16	0,61	3,23	3,84
ул. П.Курсантов,6	0,96	8,53	9,50	1,08	6,66	7,74
ул. П.Курсантов,10	0,63	6,28	6,92	0,72	4,87	5,59
ул. П.Курсантов,10а	0,23	2,23	2,46	0,30	1,64	1,93
ул. Дружбы, 95	0,28	2,10	2,37	0,29	1,94	2,24
ул. Дружбы, 99	1,00	4,87	5,87	1,04	4,53	5,56
ул. Дружбы, 101	0,37	4,02	4,39	0,45	3,72	4,17
ул. П.Курсантов,2	0,15	1,39	1,54	0,21	1,05	1,26
ул. П.Курсантов,6Б	0,18	1,84	2,02	0,29	1,28	1,57
ул. П.Курсантов,8А	0,47	3,18	3,65	0,56	2,27	2,83
ул. П.Курсантов,12	0,65	4,94	5,59	0,85	4,04	4,88
ул. П.Курсантов,14	0,22	3,23	3,45	0,34	2,41	2,75
ул. П.Курсантов,16	0,77	5,30	6,07	0,92	4,46	5,38
ул. П.Курсантов,16Б	0,13	0,82	0,95	0,14	0,59	0,73
ул. П.Курсантов,1 ввод 1	0,61	5,15	5,76	0,76	3,87	4,62
ул. П.Курсантов,1 ввод 2	0,32	1,86	2,19	0,28	1,59	1,87
ул.Машиностроителей, 2Б	0,39	7,04	7,43	0,39	5,81	6,20
ул. Дружбы, 95а	0,86	2,04	2,90	0,86	2,04	2,90
ул. П.Курсантов,14а	1,03	4,76	5,79	1,03	4,76	5,79
ул. Дружбы, 97 жд	0,79	5,15	5,95	0,79	5,15	5,95
ул. Дружбы, 94	0,00	1,55	1,55	0,00	1,55	1,55
ул.Анциферова, 1а	0,02	1,51	1,53	0,02	1,51	1,53
ул. П.Курсантов,8	0,09	2,75	2,84	0,09	2,75	2,84
ул. П.Курсантов,8 Б	0,10	4,67	4,77	0,10	4,67	4,77
ул. П.Курсантов,12 Б	0,15	4,21	4,37	0,15	4,21	4,37
Итого	14,09	115,33	129,42	15,58	99,33	114,91
УУТЭ на мкр №3	12,60	140,46	153,06	14,07	119,07	133,14

Параметры теплоносителя в системе ГВС до и после модернизации приставки приведены в таблице 2.

В результате реализации мероприятия увеличился расход тепловой энергии на ГВС, уменьшился расход тепловой энергии на систему отопления, тем самым ликвидирован «перетоп», снижено общее теплопотребление по всем зданиям.

Таблица 2

Параметры ГВС потребителей до и после модернизации приставки						
Адрес	Расход теплоносителя, М1, т/сут		Расход теплоносителя на ГВС, т/сут		Отклонение температуры t_2 от графика, °С	
	До монтажа	После монтажа	До монтажа	После монтажа	До монтажа	После монтажа
ул. Анциферова, 1	128.9	91.3	6.88	8.28	2.27	-3
ул. Машиностроителей, 2 вввод. 1	67.7	63.2	9.25	9.51	1.97	0.37
ул. Машиностроителей, 2 вввод. 2	62.8	54.4	4.76	4.13	3.72	1.15
ул. П.Курсантов,4	254	179	19.4	20.5	5.26	-1.2
ул. П.Курсантов,4а	132.8	99	7.8	8.9	5.5	-0.6
ул. П.Курсантов,6	240	184	14.3	16	2.5	-2
ул. П.Курсантов, 10а	98	44	3.5	4.4	10.2	-3.4
Итого	1403.2	1096.9	80.92	88.39	4.5	0.2

Увеличилось потребление в Гкал на ГВС (5,8% - факт по приборам, 15,68% по нормативу, увеличение продажи на 19450,81 руб.). Уменьшилась тепловая составляющая по сравнению с июлем месяцем (июль - в среднем 0,168 Гкал/м³) в августе составила в среднем 0,145 Гкал/м³, это на 15,9% приблизилось к установленному нормативу (0,068 Гкал/м³), снизив тем самым потери от начисления Гкал в ГВС по нормативу. Это увеличило продажу абонентам объемов теплоносителя и объемов тепловой энергии в ГВС на 8,2% (69 579,52 руб.), при этом не зависило покупку, оставив в денежном выражении ее почти на уровне июля 2021 (+0,67%, +8165,41 руб.)

Анализ экономического эффекта внедрения технического решения выполнен для межотопительного периода, выполнение расчета в отопительный период не требуется, т.к оплата за сверхнормативное потребление тепловой энергии на ГВС по действующим нормативным актам переносится на систему отопления (табл.3).

Таблица 3

Расчет экономического эффекта				
Показатель	Ед.изм.	До внедрения	После внедрения	Эффект от внедрения
Реализация по прибору учета				
теплоноситель	куб.м.	439,7	522,1	82,5
Реализация тепловой энергии на подогрев ГВ				
по нормативу	Гкал.	29,9	35,5	5,6
Тариф (экономически обоснованный) без НДС - на тепловую энергию 1 625,41 руб./Гкал - на теплоноситель 46,40 руб/куб.м.				
горячая вода	руб.	68 994,91	81 936,75	12 941,84
тепловая энергия на ГВ	руб.	48 594,69	57 709,92	9 115,23
теплоноситель	руб.	20 400,22	24 226,83	3 826,61

Расчет срока окупаемости разработанного технического решения приведен в таблице 4.

Таблица 4

Расчет срока окупаемости технического решения		
Сметная стоимость	Экономический эффект	Срок окупаемости
10375 руб	258, 84 руб/сут	40 суток

Заключение

Апробация разработанной модернизации приставки на горячее водоснабжение улучшило технические характеристики работы теплового узла, при этом обеспечена требуемая циркуляция во всех стояках системы горячего водоснабжения.

Анализ внедрения технического решения, выполненный с использованием данных общедомовых приборов учета, показал, что срок окупаемости составляет 40 суток. При

этом в отопительный сезон исключены «перетопы» в системе отопления, снижающие платежи за отпущенную тепловую энергию.

В результате реализации мероприятия:

1. Снижен расход теплоносителя на 21,8 %;
2. Увеличен отбор теплоносителя на ГВС (показатель М1-М2) на 8,5 %;
3. Снижена температура теплоносителя в обратном трубопроводе на 4,3 °С.
4. Уменьшилась тепловая составляющая в ГВС с 0,168 до 0,145 Гкал/м³.

Предложенная схема модернизации теплового узла может быть рекомендована к использованию в индивидуальных тепловых пунктах жилых многоквартирных домов при открытой схеме присоединения системы ГВС.

Опираясь на полученный опыт рекомендовано продолжить внедрение разработанной схемы модернизации приставки ГВС в ТУ МКД по городу.

Литература

1. Выдержки из Информационно-аналитического доклада ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, Москва, 2018 г. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2015-2016 годы. // Новости теплоснабжения. 2018. №3(211). С. 8-17.
2. Семенов В.Г. Стратегия развития теплоснабжения и когенерации в Российской Федерации до 2025 года, проект на 2019 год. Доступно по: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140. Ссылка активна на 14 апреля 2022.
3. Xiaofang S., Peng W., Panhong R., Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 54, N06004.
4. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. Работа системы теплоснабжения при поэтапном внедрении автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. №1-2. С. 31-40.
5. Кикоть Е.А., Газизов Ф.Н. Выбор структуры тепловой генерации в городах РФ при актуализации схем теплоснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 5. С. 71-82.
6. Рафальская Т.А. Мансуров Р.Ш. Оценка влияния температуры воды в системе горячего водоснабжения на температурный режим помещений // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. №4. С.42-49.
7. Семенов В.Г. Нормативы на подогрев горячей воды // Новости теплоснабжения. 2018. № 6 (214). С. 8–17.
8. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683 (4). P. 042017.
9. Rotov P.V., Zhukov D.A., Zhukova A.V., Sivukhin A.A. About economy of fuel and resources in the hot water supply system // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 891. P. 012160.
10. Ротов П.В. Сивухин А.А. Оценка эффективности технологий регулирования нагрузки горячего водоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 6. С. 22-28.
11. Tumanova T., Cimbale A. The Technical-Economic Analysis of Hot Water Supply Systems for Residential Buildings // Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 “Advanced HVAC and Natural Gas Technologies” (Riga, Latvia, May 6 – 9). 2015. pp. 177–183.
12. Яковлев Б.В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. М.: Новости теплоснабжения, 2008. 446 с.
13. Pieper H., Ommen T.S., Markussen W.B. and Elmegaard B. Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps // Proceedings of ECOS 2017:30th International Conference of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems; 2–6 July 2017; San Diego, California, USA.
14. П.В. Ротов, А.А. Сивухин, М.А. Ротова, Р.А. и др. Об эффективности управления циркуляцией горячей воды // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С. 117-129.
15. Gazizov F.N., Akhmetova I.G. Development of technique and program for analysis of options for transition to a closed hot-water supply scheme for heat supply systems // Power Engineering Research Equipment Technology. 2019. Vol. 21, N3. pp. 126-134.

Авторы публикации

Юрий Аркадьевич Горинов – доцент с ученой степенью кандидата наук, кафедры "Энергообеспечение предприятий" ФГБОУ ВО "Поволжский государственный технологический университет"; Заместитель главного инженера по эксплуатации МУП "Йошкар-Олинская ТЭЦ-1".

Павел Николаевич Анисимов – доцент с ученой степенью кандидата наук, кафедры "Энергообеспечение предприятий" ФГБОУ ВО "Поволжский государственный технологический университет"

References

1. Vyderzhki iz Informacionno-analiticheskogo doklada FGBU «Rossijskoe jenergeticheskoe agentstvo» Minjenergo Rossii, Moskva, 2018 g. Teplojenergetika i centralizovannoe teplosnabzhenie Rossii v 2015-2016 gody. *Novosti teplosnabzhenija*. 2018; 3(211):8-17.
2. Semenov V.G. Strategija razvitija teplosnabzhenija i kogeneracii v Rossijskoj Federacii do 2025 goda, proekt na 2019 god. Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3140. Accessed: 14 Apr 2022
3. Xiaofang S., Peng W., Panhong R., Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 54 (06004). doi:10.1051/mateconf/20165406004
4. Zvonareva Ju.N., Van'kov Ju.V. Work of system of heat supply at stage-by-stage introduction of the automated individual thermal points. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017; 19:31-40.
5. Kikot' E.A., Gazizov F.N. Selection of the structure of thermal generation in cities of the russian federation when actualizing the heat supply schemes. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(5): 71-82. doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-5-71-82
6. Rafal'skaja T.A. Mansurov R.Sh. Ocenka vlijanija temperatury vody v sisteme gorjachego vodosnabzhenija na temperaturnyj rezhim pomeshhenij. *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*. 2017; 4: 42-49.
7. Semenov V.G. Normativy na podogrev gorjachej vody. *Novosti teplosnabzhenija*. 2018; 6 (214): 8–17.
8. Rotov P.V., Sivukhin A.A., Gafurov R. A., Rotova M.A. About standards for hot water heating // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1683(4):042017. doi: 10.1088/1742-6596/1683/4/042017
9. Rotov P.V., Zhukov D.A., Zhukova A.V., Sivukhin A.A. About economy of fuel and resources in the hot water supply system. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017; 891(1):012160. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012160.
10. Rotov P.V. Sivuhin A.A. Ocenka jeffektivnosti tehnologij regulirovanija nagruzki gorjachego vodosnabzhenija. *Jenergoberezhenie i vodopodgotovka*. 2016; 6:22-28. (In Russ).
11. Tumanova T., Cimbale A. The Technical-Economic Analysis of Hot Water Supply Systems for Residential Buildings // *Proceedings of REHVA Annual Conference 2015 "Advanced HVAC and Natural Gas Technologies"* (Riga, Latvia, May 6 – 9). 2015. pp. 177–183. doi: 10.7250/rehvaconf.2015.025.
12. Jakovlev B.V. *Povyshenie jeffektivnosti sistem teplofikacii i teplosnabzhenija*. Moscow: Novosti teplosnabzhenija; 2008.
13. Pieper H., Ommen T.S., Markussen W.B. and Elmegaard B. Optimal Usage of Low Temperature Sources to Supply District Heating by Heat Pumps. *Proceedings of ECOS 2017:30th International Conference of Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems; 2–6 July 2017; San Diego, California, USA*.
14. P.V. Rotov, A.A. Sivuhin, M.A. Rotova, R.A. i dr. On the efficiency of the control of the circulation of hot water. *Proceedings of higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; №22(5):117-129. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-117-129
15. Gazizov F.N., Akhmetova I.G. Development of technique and program for analysis of options for transition to a closed hot-water supply scheme for heat supply systems. *Power Engineering Research Equipment Technology*. 2019;21 (3):126-134. doi: 10.30724/1998-9903-2019-21-3-126-134.

Authors of the publication

Yuriy A. Gorinov – Povolga State Technological University.; Deputy Chief Engineer on operation of MUP «Yoshkar-Olinskaya CHPP-1».

Pavel N. Anisimov – Povolga State Technological University.

Получено 25.05.2022г.

Отредактировано 31.05.2022г.

Принято 31.05.2022г.



ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА СВЕТОДИОДНОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

Шириев Р.Р., Борисов А.Н., Валеев А.А.

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
shrr@list.ru, dokbore@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблемы процесса теплопередачи в конструктивных элементах светодиодного источника света. Описать систему охлаждения светодиодного источника света с применением эквивалентной схемы и тепловых сопротивлений. Провести сравнительный анализ систем охлаждения светодиодных световых приборов. Выполнить термодинамические расчеты радиатора светового прибора с использованием компьютерных программ систем автоматического проектирования. Предложить способ улучшения свойств теплоотдачи радиатора светодиодного источника света. *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялся метод ретроспективно-перспективного метаанализа, использовались компьютерные программы систем автоматического проектирования и непосредственные определения технических параметров с помощью измерительных приборов. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности процесса теплопередачи в конструктивных элементах светодиодного источника света. Произведены термодинамические расчеты радиатора светового прибора с использованием компьютерных программ систем автоматического проектирования КОМПАС и SolidWorks. В статье предложен способ улучшения свойств теплоотдачи радиатора светодиодного источника света. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Существует множество различных систем охлаждения, имеющие свои достоинства и недостатки. Наиболее эффективными системами охлаждения являются системы принудительного охлаждения, однако их применение влечет за собой увеличение конечной стоимости светового прибора и снижение его светоотдачи вследствие роста энергопотребления. Пассивные системы охлаждения сравнительно дешевы, однако для обеспечения эффективного охлаждения светодиодов они должны иметь достаточную площадь соприкосновения с источником теплоты, обладать хорошей теплопроводностью и теплоотдачей. В данном случае наиболее оптимальным способом улучшения свойств теплоотдачи радиатора является нанесение специального покрытия имеющего высокую теплоотдачу. Это позволит повысить эффективность охлаждения с минимальными затратами не прибегая к существенному изменению конструктивных особенностей уже имеющейся системы.

Ключевые слова: светодиодный источник света, повышенная теплоотдача, системы пассивного охлаждения.

Для цитирования: Шириев Р.Р., Борисов А.Н., Валеев А.А. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 112-120. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120.

LED SOURCE OF LIGHT WITH HIGH LIGHT CIRCUIT

R.R. Shiriev, A.N. Borisov, A.A. Valeev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
shrr@list.ru, dokbore@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the problems of the heat transfer process in the structural elements of the LED light source. Describe the cooling system of an LED light source using an equivalent circuit and thermal resistances. Conduct a comparative analysis of cooling systems for LED lighting devices. Perform thermodynamic calculations of the light device radiator using

computer programs of automatic design systems. Suggest a way to improve the heat transfer properties of the radiator of the LED light source. **METHODS.** When solving the tasks set, the method of retrospective-prospective meta-analysis was used, computer programs of automatic design systems and direct determination of technical parameters using measuring instruments were used. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, discusses the features of the heat transfer process in the structural elements of the LED light source. Thermodynamic calculations of the radiator of the lighting device were made using computer programs of automatic design systems KOMPAS and SolidWorks. The article proposes a method for improving the heat transfer properties of the radiator of an LED light source. **CONCLUSION.** There are many different cooling systems with their own advantages and disadvantages. The most efficient cooling systems are forced cooling systems, however, their use entails an increase in the final cost of the lighting device and a decrease in its light output due to an increase in energy consumption. Passive cooling systems are relatively cheap, but to provide effective cooling of LEDs, they must have a sufficient area of contact with the heat source, have good thermal conductivity and heat dissipation. In this case, the best way to improve the heat transfer properties of the radiator is to apply a special coating with a high heat transfer. This will increase the cooling efficiency with minimal cost without resorting to a significant change in the design features of an existing system.

Keywords: LED light source, increased heat dissipation, passive cooling systems.

For citation: Shiriev: R.R., Borisov A.N., Valeev A.A. Led source of light with high light circuit. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 112-120. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-112-120.

Введение

Благодаря высоким показателям светоотдачи светодиоды нашли широкое применение практически во всех сферах искусственного освещения. Однако одним из их главных недостатков является сложный температурный режим, который оказывает решающее влияние на долговечность и надежность светодиодного устройства в целом [1-3].

Чем больший ток проходит через р-п переход светодиода, тем большее количество излучения испустит полупроводниковый кристалл светодиода, поскольку, чем больше ток, тем больше пар частиц электрон-дырка поступают в зону рекомбинации за единицу времени. Однако из-за внутреннего сопротивления полупроводника кристалл светодиода нагревается, что приводит к деградации светодиода, снижению его характеристик и, в дальнейшем, к полному его выходу из работоспособного состояния. Таким образом, при конструировании световых приборов использующих светодиоды очень остро встает вопрос об эффективности систем охлаждения.

Критическая температура р-п перехода современных полупроводниковых светодиодов составляет 90° - 100°С. Результатом превышения этого порогового значения является полная потеря работоспособности кристалла полупроводника. Так, например, согласно результатам исследования температурных режимов работы светодиодов, проведенных компанией Cree, срок службы светодиодов значительно сокращается при повышении температуры р-п перехода: при 105°С срок службы светодиодов на 200 тысяч часов меньше, чем при температуре 85°С. К тому же увеличение температуры р-п перехода светодиода приводит к падению величины светового потока [4-7].

Мощные светодиоды имеют неблагоприятное соотношение выделяемой тепловой мощности к своим размерам, что требует применения специальных охлаждающих устройств и конструкций. Несоблюдение температурного режима работы приводит к ускоренному выходу светодиодного устройства из строя.

Объектом данного исследования являются конструктивные особенности уже существующих систем теплоотвода светодиодных световых приборов, а предметом исследования – повышение эффективности работы этих систем.

Материалы и методы

Светодиоды имеют КПД около 30 – 40%. Это означает, что порядка 60 – 70% потребляемой из электрической сети мощности преобразуется в тепловую энергию, которую необходимо отводить. Иначе светодиодный источник света выйдет из строя вследствие перегрева. В абсолютных значениях этот факт означает, что светодиодная лампа мощностью 10 Вт требует рассеивания 6 Вт теплоты. Отвод теплоты от полупроводникового кристалла является сложной задачей. Очень важную роль в этом

процессе играет тепловое сопротивление материалов, которое проявляется, как способность тела препятствовать распространению теплоты [8-12].

При описании систем охлаждения применяют эквивалентные схемы с тепловыми сопротивлениями. Они могут иметь параллельное и последовательное соединение. Исследование систем охлаждения светодиодов и светодиодных светильников осуществляют подобным образом. На рисунке 1 в качестве примера изображена эквивалентная схема с тепловыми сопротивлениями материалов, подключенных последовательно. Эта схема учитывает тепловое сопротивление между светодиодом и контактом, между контактом и печатной платой, между печатной платой и теплопроводящим (если он есть) элементом, теплопроводящим материалом и металлическим радиатором, радиатором из металла и окружающей средой.

В узлах этой эквивалентной схемы необходимо измерять температуру для проверки и уточнения параметров модели.

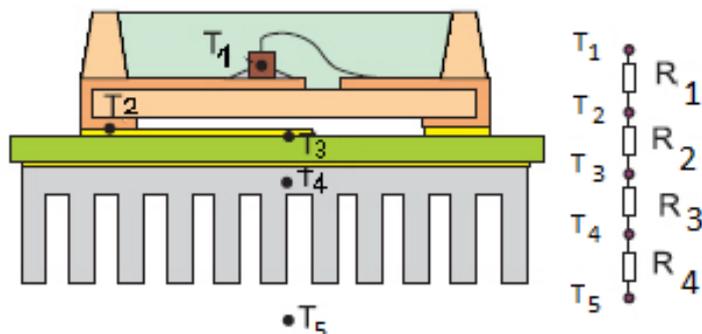


Рис 1. Пример системы охлаждения светодиода с эквивалентной схемой тепловых сопротивлений *Fig. 1. Example of LED cooling system with equivalent thermal resistance scheme*

Вне зависимости от типа системы охлаждения все элементы условно можно разделить на три группы: печатные платы, теплопроводящие материалы, радиаторы.

Светодиоды устанавливают на печатную плату для подвода цепей электрического питания полупроводникового светодиода и механического монтажа. От природы материала печатной платы зависит тепловое сопротивление. Так, например, тепловое сопротивление стандартных печатных плат FR4 может составлять 20-80°C/Вт. Тепловое сопротивление печатных плат на металлической подложке будет в 10 раз меньше. Часто полупроводниковые светодиоды монтируют непосредственно на металлический радиатор. В этом случае печатная плата не должна вносить существенный вклад в суммарное тепловое сопротивление [1, 4, 5, 8]. Так называемые теплопроводящие материалы применяют для обеспечения хорошего теплового контакта между металлическим радиатором и поверхностью печатной платы либо между полупроводниковым светодиодом и металлическим радиатором. Теплопроводящие материалы, предназначенные для обеспечения теплового контакта, с учетом дизайна системы охлаждения, способны выполнять функции изоляции электрических узлов схемы и создавать механическое крепление.

Термопасты имеют высокое значение объемной теплопроводности, маленькую величину клеевого слоя, низкую вязкость, не затвердевают. Хотя считаются довольно грязным при производстве. Теплопроводящие материалы с изменением фазы обладают высокой вязкостью, что дает более высокую надежность по сравнению с термопастами, гораздо удобнее в использовании, нет расслоения. Однако они имеют более низкую теплопроводность, по сравнению с термопастами, поверхностное сопротивление может быть больше, чем у термопаст, необходимо приложение давления для повышения эффективности. Гели хорошо заполняют неровности поверхности, однако, у них более низкая теплопроводность по сравнению с термопастами, меньшее сцепление, чем у термоклеев. Термоклей хорошо заполняет неровности поверхности, но необходим процесс очистки.

Алгоритм выбора теплопроводящего материала, помимо величины теплопроводности, предполагает учет и других параметров. Нельзя упускать из виду толщину клеевого слоя материала т.к. тепловое сопротивление напрямую зависит от этого параметра. Более тонкий слой клея с низким значением теплопроводности может иметь высокое тепловое сопротивление по сравнению с значительно более толстым слоем, но с

высоким значением теплопроводности [13, 14]. При выборе материалов необходимо учитывать оба этих параметра.

Радиатор это, пожалуй, самый важный элемент в системе охлаждения светодиода. Он предназначен для отведения тепла от печатной платы и светодиода, и рассеивает тепло в воздухе. Материал, из которого радиатор изготавливают, должен обладать хорошей теплопроводностью. Площадь поверхности радиатора должна быть максимально возможной. Радиатор зачастую может выступать в роли корпуса светового прибора и держателя. Выбор способа обработки поверхности радиатора влияет на его коэффициент теплопроводности [1-3, 6-10].

В зависимости от вида охлаждения – пассивное и активное, в светодиодных светильниках могут быть системы пассивного охлаждения, либо системы принудительного (активного) охлаждения. К системам пассивного охлаждения относятся радиаторы, без каких либо дополнительных устройств (рис. 2). Охлаждение производится за счет конвекции. Тепло от светодиода передается на печатную плату, дальше, от печатной платы через теплопроводящий материал, тепло передается на радиатор, где оно рассеивается в воздухе [2, 6, 10, 14-16].

Конструктивно чаще применяются радиаторы ребристые и игольчатые (рис 2).

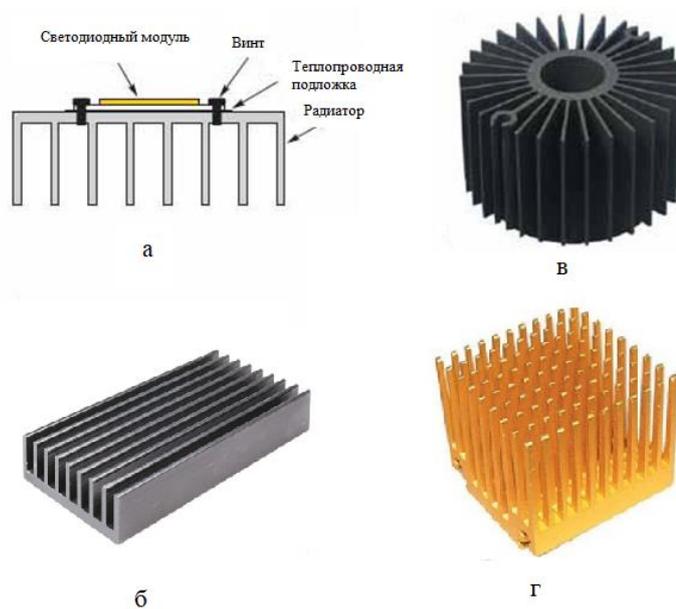


Рис. 2. Внешний вид пассивных систем охлаждения: а – радиатор, вид сбоку, б – ребристый радиатор, в – ребристый цилиндрический радиатор, г – радиатор игольчатого типа.

Fig. 2. Appearance of passive cooling systems: a - radiator, side view, b - ribbed radiator, in - ribbed cylindrical radiator, g - needle type radiator.

Их форма продиктована необходимостью иметь как можно большую площадь соприкосновения с воздухом, но при этом иметь как можно меньший размер. Для более качественного охлаждения радиатор должен иметь максимально возможную теплопроводность и теплоотдачу. Если естественного охлаждения недостаточно для отвода тепла, то требуется использовать принудительное охлаждение. Существует множество вариантов активного охлаждения – от вентилятора до водяного охлаждения.

Применение активной разновидности охлаждения должно учитывать, что светодиоды в реальных условиях эксплуатации могут работать очень длительно, поэтому следует при проектировании светильника предусмотреть наличие способов защиты светодиодов от чрезмерного перегрева при выходе из строя элементов активного охлаждения. В противном случае поломка элементов принудительного охлаждения неминуемо повлечет за собой перегорание светодиода вследствие его перегрева. Суть системы принудительного охлаждения заключается в том, что циркуляция хладагента (например, воздуха) производится не естественным конвекционным способом, а принудительным, при помощи дополнительного устройства. Принудительное охлаждение требует дополнительное электрическое питание, это приводит к снижению КПД светильника в целом.

В качестве объекта исследования были выбраны пассивные системы охлаждения светодиодных источников света в силу их большего распространения и доступности. В свою очередь, наиболее распространенной пассивной системой охлаждения светодиодных ламп является ребристый радиатор, две модели которого были более детально изучены (Рис. 2б и Рис. 2в).

При выполнении термодинамических расчетов радиатора были использованы компьютерные программы систем автоматического проектирования (САПР) «КОМПАС» и «SolidWorks».

Результаты

Эффективность отведения тепла от светодиода зависит от теплопроводности и теплоотдачи радиатора охлаждения. Разница температур между точкой нагрева и ребрами радиатора не должна быть высокой. Высокая разница температур между этими участками означает то, что радиатор работает неэффективно. Пример эффективной и неэффективной работы ребристого радиатора представлен на рисунке 3.

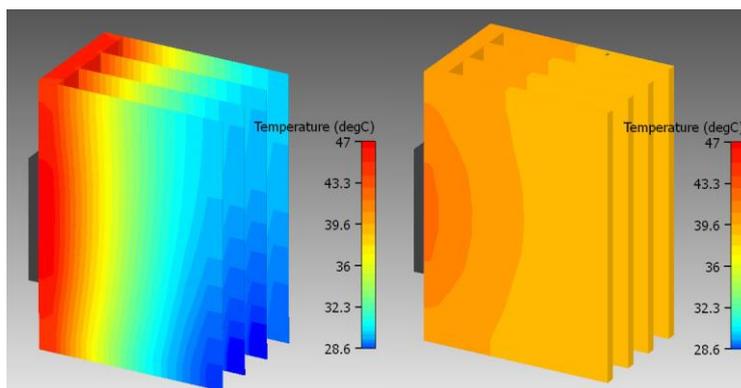


Рис. 3. Пример неэффективной и эффективной работы радиатора *Fig. 3. An example of inefficient and efficient radiator operation*

Радиатор слева имеет низкую теплопроводность и отводит тепло от точки нагрева недостаточно хорошо, в результате чего температура в точке нагрева повышается до 47⁰С и выше. Градиент температур очень высок, разница температур между участками составляет 19⁰С. Данный радиатор работает неэффективно. Радиатор справа имеет высокую теплопроводность и хорошо отводит тепло от точки нагрева. Температура точки нагрева не превышает 40⁰С. Градиент температур очень мал, разница между участками составляет 2-3⁰С. Данный радиатор работает эффективно.

При моделировании ребристого цилиндрического радиатора за основу была взята конструкция светодиодной лампы “GreeThink”, имеющая собственную систему охлаждения в виде ребристого алюминиевого радиатора. Лампа представляет собой сборную конструкцию, состоящую из отдельных модулей, включающих в себя полимерный светорассеиватель, алюминиевый ребристый радиатор, полимерный переходник для цоколя, цоколь и алюминиевую теплопроводящую подложку для размещения светодиодов (рис. 4).

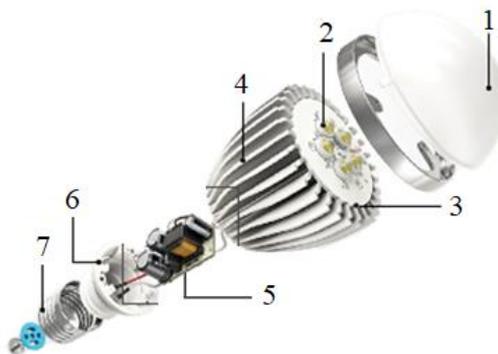


Рис. 4. Конструкция светодиодной лампы. 1 – светорассеиватель; 2 – светодиоды; 3 – теплопроводящая подложка; 4 – радиатор; 5 – драйвер; 6 – переходник для цоколя E27; 7 – *Fig. 4. LED lamp design. 1 - light diffuser; 2 - LEDs; 3 - heat conductive substrate; 4 - radiator; 5 - driver; 6 - adapter for cap E27; 7 - cap E27*

цоколь E27

Выбранный радиатор выполнен из алюминия, обладает высокой теплопроводностью, имеет форму близкую к усеченному конусу. Используя реальные измеренные габаритные размеры светодиодной лампы с радиатором, в компьютерной программе “КОМПАС” была создана трехмерная модель радиатора светодиодного прибора (рис. 5).

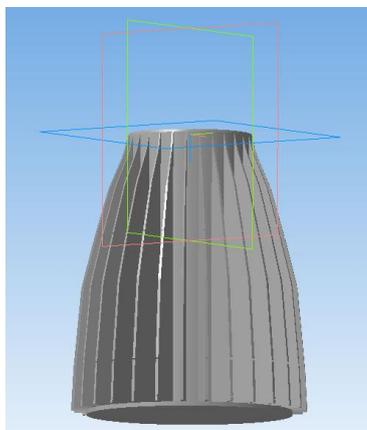


Рис. 5. Трехмерная модель радиатора

Fig. 5. 3D model of radiator

Затем трехмерная модель радиатора была импортирована в программу “SolidWorks”. В программе “SolidWorks” при помощи расчетного пакета “FlowSimulation” были проведены термодинамические расчеты, исходя из данных о габаритных размерах, материала радиатора, мощности и координатах источника тепловыделения, с учетом теплопроводности, трех типов передачи тепла и возможностей конвекционных потоков воздуха (рис. 6).

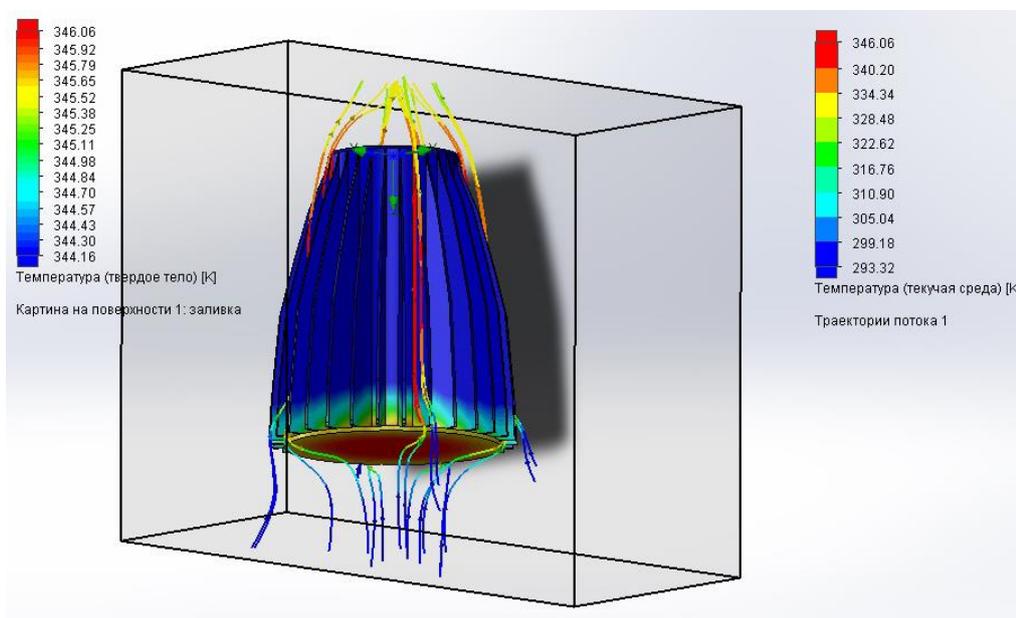


Рис. 6. 3D-визуализация результатов термодинамического расчета радиатора

Fig. 6. 3D-visualization of radiator thermodynamic calculation results

Заключение

Таким образом, существует большое множество различных систем охлаждения, имеющие свои достоинства и недостатки. Наиболее эффективными системами охлаждения являются системы принудительного охлаждения, однако их применение влечет за собой увеличение конечной стоимости светового прибора и снижение его светоотдачи вследствие роста энергопотребления. Пассивные системы охлаждения сравнительно дешевы, однако для обеспечения эффективного охлаждения светодиодов они должны иметь достаточную

площадь соприкосновения с источником теплоты, обладать хорошей теплопроводностью и теплоотдачей.

В данном случае наиболее оптимальным способом улучшения свойств теплоотдачи радиатора является нанесение специального покрытия имеющего высокую теплоотдачу. Анодирование, например, позволит создать на радиаторе покрытие микроскопической толщины, существенным образом не влияющее на теплопроводность и не препятствующую излучению тепла. Это позволит повысить эффективность охлаждения с минимальными затратами не прибегая к существенному изменению конструктивных особенностей уже имеющейся системы.

Результаты данного исследования могут быть использованы в сфере конструирования и изготовления светодиодных световых приборов.

Литература

1. Мальцев А., Мальцев И. Контроль качества и надежности светодиодов по тепловому сопротивлению р-n-переход–корпус // Полупроводниковая светотехника. 2010. Т. 2. № 4. С. 40-41.
2. Ma Y., Zhang L., Zhou T., Hou C., Kang J., Yang S., Xi X., Yuan M., Huang J., Wang R., Chen H., Wang Y., Selim F.A., Li M. High quantum efficiency CE:(LU,Y)₃(AL,SC)₂AL₃O₁₂transparent ceramics with excellent thermal stability for high-power white LEDs/LDS // Journal of Materials Chemistry C. 2020. Т. 8. № 46. С. 16427-16435.
3. Газалов В.С., Шабаев Е.А., Блягоз А.М. Анализ теплового режима мощных светодиодов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 6. С. 36-38.
4. Хампстон Ж., Котов И. Управление тепловым режимом светодиодов: прогнозы и измерения // Полупроводниковая светотехника. 2017. Т. 2. № 46. С. 48-52.
5. Gupta G., Mema F., Huetting R.J.E. Electron-hole bilayer light-emitting device: concept and operation // Solid-State Electronics. 2020. Т. 168. С. 107726.
6. Мальцев И.А., Мальцев А.А. Измерение теплового сопротивления переход-корпус современных светодиодов в стационарном тепловом режиме // В сборнике: Проблемы и перспективы развития наукоемкого машиностроения. Международная научно-техническая конференция. 2013. С. 342-344.
7. Тукшаитов Р.Х., Алхамсс Я.Ш., Иванова В.Р., Шириев Р.Р. Обеспечение энергоресурсосбережения при питании светодиодных светильников от гальванических элементов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010. №11-12. С. 108-114.
8. Wang H.-M., Yao J.-S., Xue P. Light fades and life prediction of led light source // International Journal of Smart Home. 2015. Т. 9. № 11. С. 225-234.
9. Вилисов А.А., Тепляков К.В., Солдаткин В.С. Влияние конструктивных особенностей светодиодов на их тепловое сопротивление // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2017. № 1-1. С. 287-289.
10. Широбокова Т.А., Чепкасова М.А. Тепловая модель светодиодного источника света // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 128-133.
11. Тукшаитов Р.Х., Роженцова Н.В., Денисова А.Р. Исследование работоспособности и качества функционирования светодиодных осветительных элементов электротехнических систем при предельно допустимой температуре окружающей среды // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 96-104.
12. Мальцев А.А., Корякин И.Д. Измерение теплового сопротивления переход-корпус smd светодиодов при жидкостном охлаждении // В сборнике: Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Материалы докладов. 2018. С. 54-56.
13. Севрук Д.А., Лебедев К.Н. Исследование влияния напряжения питания на температуру и световой поток фитосветодиодного модуля 6040-A2525(A) // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 1 (22). С. 79-85.
14. Тукшаитов Р.Х., Шириев Р.Р. Типовые и филаментные светодиодные лампы. Каким образом можно оперативно оценить их качество. Часть 2. // Полупроводниковая светотехника, 2018, №5. С. 24-27.
15. Hao R., Ge A., Tao X., Liu Y., Zhao B., Yang E. Optical design of a high-mast luminaire based on four cob led light source modules // Lighting Research and Technology. 2019. Т. 51. № 3. С. 447-456.

16. Борисов А.Н., Шириев Р.Р. Светодиодный источник света с повышенной светоотдачей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 111-119.

Авторы публикации

Шириев Равиль Рафисович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета.

Борисов Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета.

Валеев Адель Азатович – студент, Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Mal'tsev A., Mal'tsev I. Kontrol' kachestva i nadezhnosti svetodiodov po teplovomu soprotivleniyu p-n-perekhod–korpus. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2010;2(4):40-41.
2. Ma Y., Zhang L., Zhou T., Hou C., Kang J., Yang S., Xi X., Yuan M., Huang J., Wang R., Chen H., Wang Y., Selim F.A., Li M. High quantum efficiency CE:(LU,Y)₃(AL,SC)₂AL₃O₁₂transparent ceramics with excellent thermal stability for high-power white LEDs/LDS. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020;8:46:16427-16435.
3. Gazalov B.C., Shabayev Ye.A., Blyagoz A.M. Analiz teplovogo rezhima moshchnykh svetodiodov. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2008;6:36-38.
4. Khampston ZH., Kotov I. Upravleniye teplovym rezhimom svetodiodov: prognozy i izmereniya. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2017;2(46):48-52.
5. Gupta G., Mema F., Huetting R.J.E. Electron-hole bilayer light-emitting device: concept and operation. *Solid-State Electronics*. 2020;168:107726.
6. Mal'tsev I.A., Mal'tsev A.A. *Izmereniye teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus sovremennykh svetodiodov v statsionarnom teplovom rezhime. V sbornike: Problemy i perspektivy razvitiya naukoemkogo mashinostroyeniya. Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya*. 2013. p. 342-344.
7. Tukshaitov R.KH., Alkhamss YA.SH., Ivanova V.R., Shiriyev R.R. Obespecheniye energoresursosbezrezheniya pri pitanii svetodiodnykh svetil'nikov ot gal'vanicheskikh elementov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2010;11-12:108-114.
8. Wang H.-M., Yao J.-S., Xue P. Light fades and life prediction of led light source. *International Journal of Smart Home*. 2015;9(11):225-234.
9. Vilisov A.A., Teplyakov K.V., Soldatkin V.S. Vliyaniye konstruktivnykh osobennostey svetodiodov na ikh teplovoye soprotivleniye. *Elektronnyye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. 2017;1-1:287-289.
10. Shirobokova T.A., Chepkasova M.A. Teplovaya model' svetodiodnogo istochnika sveta. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2018;3 (28):128-133.
11. Tukshaitov R.KH., Rozhentsova N.V., Denisova A.R. Issledovaniye rabotosposobnosti i kachestva funktsionirovaniya svetodiodnykh osvetitel'nykh elementov elektrotekhnicheskikh sistem pri predel'no dopustimoy temperature okruzhayushchey sredy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2021;23(4):96-104.
12. Mal'tsev A.A., Koryakin I.D. *Izmereniye teplovogo soprotivleniya perekhod-korpus smd svetodiodov pri zhidkostnom okhlazhdeni*. V sbornike: Novyye tekhnologii, materialy i oborudovaniye rossiyskoy aviakosmicheskoy otrasli. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. Materialy dokladov. 2018. S. 54-56.
13. Sevruc D.A., Lebedev K.N. Issledovaniye vliyaniya napryazheniya pitaniya na temperaturu i svetovoy potok fitosvetodiodnogo modulya 6040-A2525(A). *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2019;1 (22):79-85.
14. Tukshaitov R.KH., Shiriyev R.R. Tipovyye i filamentnyye svetodiodnyye lampy. Kakim obrazom mozjno operativno otsenit' ikh kachestvo. Chast' 2. *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*, 2018;5:24-27.
15. Hao R., Ge A., Tao X., Liu Y., Zhao B., Yang E. Optical design of a high-mast luminaire based on four cob led light source modules. *Lighting Research and Technology*. 2019;51(3):447-456.

16. Borisov A.N., Shiryev R.R. Svetodiodnyy istochnik sveta s povyshennoy svetootdachei. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2019;21:(1-2):111-119.

Authors of the publication

Ravil R. Shiryev – Kazan State Power Engineering University.

Andrey N. Borisov – Kazan State Power Engineering University.

Adel A. Valeev – Kazan State Power Engineering University.

Получено ***10.05.2022г.***

Отредактировано ***25.05.2022г.***

Принято ***30.05.2022г.***



ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О КОНДЕНСАЦИИ ПАРА, СОДЕРЖАЩЕГО ТВЁРДЫЕ ЧАСТИЦЫ НА РЕБРЕ

Якимов¹ Н.Д., Дмитриев² А.В., Бадретдинова³ Г.Р., Борисова⁴ С.Д.

^{1,2,3,4}Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru³
svetlana-zag@bk.ru⁴

Резюме: ЦЕЛЬ. Оценить влияние на процесс конденсации загрязнений, содержащихся в паре и оседающих на поверхности охлаждаемых рёбер, для чего сформулировать математическую модель процесса, исследовать его свойства и получить количественные оценки характеристик. МЕТОДЫ. Уравнения математической модели строятся на основе законов сохранения энергии и массы, их исследование и оценки проводятся с применением аналитических методов теории дифференциальных уравнений, методов теории подобия и размерностей, а также численных методов решения краевых задач. РЕЗУЛЬТАТЫ. Сформулирована постановка задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы, на ребре. Выявлено наличие автомодельного решения, представляющегося в виде безразмерной функции одной переменной, единой для всех наборов исходных параметров. Получены соотношения, описывающие распределения толщины $\delta(x, \tau)$ осадка и температуры $\vartheta(x, \tau)$ на прямом ребре неограниченной высоты ($l = \infty$) при первоначально чистой поверхности ($h_0 = 0$). Данные соотношения также практически точно описывают начальную стадию такого процесса на прямом ребре конечной высоты l , пока осадок заметной толщины не покроет поверхность ребра целиком, а также – начальные моменты в случае ребра на круглой трубе, пока ширина зоны осадка с заметной толщиной существенно меньше радиуса трубы. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование этих распределений как начальных для рёбер ограниченной высоты вместо, например, введения равномерного начального слоя h_0 , позволит достигать высокой точности численных расчётов без чрезмерного сгущения сетки по координате и времени.

Ключевые слова: конденсация пара; осаждение частиц; оребрённая поверхность.

Для цитирования: Якимов Н.Д., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д.. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 121-129. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-121-129.

FEATURES OF SOLVING THE PROBLEM OF CONDENSATION OF VAPOR CONTAINING SOLID PARTICLES ON THE EDGE

ND. Yakimov¹, AV. Dmitriev², GR. Badretdinova³, SD. Borisova⁴

^{1,2,3,4}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ieremiada@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0253-3762>, nyakimov@inbox.ru¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, nice.badretdinova@mail.ru³
svetlana-zag@bk.ru⁴

Abstract: THE PURPOSE. To evaluate the effect on the condensation process of contaminants contained in the steam and deposited on the surface of the cooled fins, for which to formulate a

mathematical model of the process, to investigate its properties and to obtain quantitative estimates of the characteristics. METHODS. The equations of the mathematical model are based on the laws of conservation of energy and mass, their study and evaluation are carried out using analytical methods of the theory of differential equations, methods of similarity theory and dimensions, as well as numerical methods for solving boundary value problems. RESULTS. The formulation of the problem of condensation of vapor containing solid particles on the edge is formulated. The presence of a self-similar solution is revealed, which is represented as a dimensionless function of one variable, uniform for all sets of initial parameters. The relations describing the distributions of the thickness $\delta(x, \tau)$ of the sediment and the temperature $\vartheta(x, \tau)$ on a straight edge of unlimited height ($l = \infty$) with an initially clean surface ($h_0 = 0$) are obtained. These relations also almost accurately describe the initial stage of such a process on a straight edge of a finite height l , until a sediment of noticeable thickness covers the entire surface of the rib, as well as the initial moments in the case of an edge on a round pipe, until the width of the sediment zone with a noticeable thickness is significantly less than the radius of the pipe. CONCLUSION. Using these distributions as the initial ones for edges of limited height instead of, for example, introducing a uniform initial layer h_0 , will allow achieving high accuracy of numerical calculations without excessive thickening of the grid in coordinate and time.

Keywords: *steam condensation; particle deposition; finned surface.*

For citation: Yakimov ND., Dmitriev AV., Badretdinova GR., Borisova SD. Features of solving the problem of condensation of vapor containing solid particles on the edge. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 121-129. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-121-129.

Введение

На сегодняшний день наблюдается тенденция к снижению потребления энергоресурсов, за счет повышения эффективности применяемого технологического оборудования. Для реализации сложных технологических процессов производству необходимо выполнять комплекс мер для эксплуатации технических устройств и аппаратов, в том числе очистку поверхностей оборудования от загрязнений твердыми частицами. Данная проблема возникает при производстве пищевых продуктов, бумаги и картона из целлюлозы, текстиля, катализаторов, цемента, в покрасочных камерах при окрашивании изделий и т.д. Наиболее известными источниками загрязнения производственного оборудования и атмосферного воздуха являются дымовые газы, образующиеся при сжигании различного топлива на тепловых и атомных электростанциях, предприятия черной и цветной металлургии, автомобильный и железнодорожный транспорт, многочисленные заводы и фабрики и т.д.

Задачи по снижению затрат на эксплуатацию теплообменного оборудования с целью повышения энергоэффективности энерго- и ресурсосбережения рассматриваются многими авторами [1, 2]. Так как закупорка каналов, пластин и ребер теплообменников, вызванная загрязнением твердыми частицами, ограничивает применение оборудования, то очень важно уменьшать количество осадка на поверхностях теплопередачи [3]. Следовательно, возникает необходимость в изучении процесса осаждения частиц на поверхности с помощью экспериментов и численного моделирования. Однако из-за сложности реализации физического эксперимента и финансовых затрат, большинство исследователей используют методы численного моделирования для изучения механизмов осаждения твердых частиц [4] и их влияние на процесс теплопередачи [5, 6]. В последнее время научные знания в области математического моделирования значительно продвинулись, поэтому численные исследования по прогнозированию осаждения твердых частиц на поверхностях теплообменных аппаратов [7-9] является важной и актуальной задачей.

Многие работы посвящены изучению моделей осаждения частиц на поверхность теплообмена [10, 11]. В работах [12-14] с помощью численного моделирования авторами было установлено, что на движение и осаждение частиц на поверхность теплообмена влияют такие факторы как, геометрические параметры устройства, температура поверхности, скорость потока, размер частиц и т.п. Поэтому большинство исследований направлены на изучение влияния различных внешних факторов, механизмов и степени осаждения твердых частиц на поверхности теплообменных аппаратов [15, 16]. Например, в статье [17] рассматривается влияние скорости потока, массы и размера частиц на их

осаждение. Было установлено, что увеличение диаметра частиц приводит изначально к повышению степени осаждения, затем к снижению, как и рост скорости потока воздуха. Приращение массы частиц способствует количественному накоплению слоя осадка на передней части поверхности ребристого теплообменника.

Рассматриваемая проблема встречается в работах авторов, которые изучают такие факторы, как относительная влажность воздуха и концентрация частиц, осаждающиеся на мокрые поверхности теплообмена. В работе [18] разработанная численная модель использовалась для реализации процесса захвата частиц конденсатом воды и слоем влажного осадка на мокрой поверхности оребренного теплообменника. Так как твердые частицы имеют большую склонность осаждаться на мокрых поверхностях, чем на сухих, то в случае интенсивного осаждения частиц на влажные ребра в условиях осушения возникает более серьезное ухудшение тепловых характеристик аппарата. Результаты работы показывают, что такие параметры как относительная влажность воздуха и концентрация частиц оказывают большее влияние на общую массу слоя осадка, чем, например, скорость воздуха и диаметр частиц, поскольку ранее приведенные параметры способствуют интенсивности осаждения, а высокая скорость воздуха или больший диаметр частиц приводят к уменьшению интенсивности за счет отпрыгивания или инерциального движения в потоке воздуха.

Процессы в котельных системах также сопровождаются проблемами осаждения частиц на поверхностях теплообмена, а именно зашлаковывание и засорение золой, приводящее к ухудшению характеристик теплопередачи, внеплановым отключениям и выходу из строя систем с серьезными экономическими последствиями [19, 20]. Для этого авторы предлагают различные типы оптимизированных теплообменников, как один из способов снижения загрязнения твердыми частицами поверхностей теплообмена. Исследования по изменению характеристик теплопередачи и загрязнению пяти различных теплообменников с оребренными трубами в работе [21] показывают, что увеличение количества ребер приводит к уменьшению слоев осадка при незначительном снижении эффективности теплопередачи. Поэтому их целесообразно использовать в качестве теплообменников, предотвращающих образование загрязнений, в системах рекуперации отработанного тепла. Изменение геометрических параметров, то есть замена круглых труб на эллиптические, при неизменном шаге приводит к снижению эффективности теплопередачи и увеличению загрязнений, следовательно, применять их нецелесообразно.

Таким образом, в системах рекуперации отработанного тепла, которые играют важную роль в снижении потерь энергии и повышении энергоэффективности во многих промышленных процессах, загрязнение теплообменников может стать серьезной проблемой. Поэтому улучшение теплопередающих характеристик и снижение загрязнений твердыми частицами поверхностей теплообмена на сегодняшний день является актуальной задачей.

В данной работе решены задачи переноса энергии при вынужденной конвекции в широком диапазоне характеристик оребренных поверхностей в многофазных системах при конденсации парогазовой смеси. Изложены научные основы и методы интенсификации процессов передачи тепла и массы в оборудовании, предназначенном для передачи теплоты.

Материалы и методы

В данном разделе статьи рассмотрена задача о конденсации пара, содержащего твердые частицы, на ребре, причём частицы в ходе процесса могут оседать на поверхности, образуя слой осадка. При первоначальном рассмотрении картины формирования слоя осадка на ребре, основных свойств процесса, желательно, чтобы математическая модель оказалась максимально простой. Следовательно, она должна учитывать лишь основные факторы при упрощенных предположениях. Исходя из этого, ребро и слой осадка можно считать тонкими, и распределения температуры в них одномерными. Их теплоёмкость можно не учитывать. Температура на внешней поверхности слоя осадка равна температуре t_s конденсации (насыщения), а осадок однороден. Его толщина пропорциональна общему количеству образовавшегося в этом месте конденсата.

Если рассматривать прямое ребро, на плоской поверхности, то при указанных предположениях получается система двух дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} = A \frac{\vartheta(x, \tau)}{\delta(x, \tau)}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \delta(x, \tau)}{\partial \tau} = P \frac{\vartheta(x, \tau)}{\delta(x, \tau)} \quad (2)$$

при условиях

$$\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0, \quad \frac{d\vartheta}{dx_{x=l}} = 0, \quad \delta(x, 0) = 0. \quad (3)$$

Здесь τ – время, x – координата ребра, $0 \leq x \leq l$, l – высота ребра, $\delta(x, \tau)$ – распределение толщины слоя осадка по ребру, $\vartheta(x, \tau)$ – распределение избыточной температуры в ребре, $\vartheta = ts - t$, t – температура, $\vartheta_0 = ts - t_0$, t_0 – температура у основания ребра. Коэффициенты A и P выражаются через заданные параметры процесса, $A = \frac{2\lambda_0}{\lambda_p \cdot \delta_p}$,

$P = k \cdot \lambda_0$; λ_0, λ_p – теплопроводности осадка и ребра, δ_p – толщина ребра, k – коэффициент осаждения.

Такого же рода уравнения можно выписать для ребра на круглой трубе. Рассматриваемая математическая постановка о формировании слоя осадка на ребре при изначально чистой поверхности оказывается математически чёткой и лаконичной. Вместе с тем, она оставляет серьёзные вопросы о поведении решения в начальные моменты времени. Первоначальный анализ показывает, что при $\tau \rightarrow 0$ тепловой поток ребра оказывается неограниченно большим, а картина процесса – не очень понятной, что осложняет построение даже численного решения. Конечно, в начальные моменты времени, данная модель всё равно не отвечает физике реального процесса, и эти детали решения при малых τ не представляют интереса для практики. Поэтому оправдано, для осуществления численных расчётов, например, исказить модель введением условного тонкого первоначального слоя осадка толщиной h_0 . Однако, думается, представление о поведении модели, в том числе в начальные моменты, необходимо для её понимания и правильного применения.

Отчасти поведение модели при малых τ характеризует, что толщина δ_0 слоя осадка у основания ребра меняется по зависимости $\delta_0(\tau) = \sqrt{2 \cdot P \cdot \vartheta_0 \cdot \tau}$ (при $h_0 = 0$), что нетрудно получить интегрированием (2) при $x = 0$ с учётом $\vartheta(0, \tau) = \vartheta_0$. Но этого, конечно, недостаточно. Нужно представлять всё решение, в частности, насколько быстро расширяется зона с заметной толщиной осадка, какова его форма и т.п. Выяснению этих вопросов и посвящается нижеизложенный материал.

Можно видеть, что в начальные моменты времени большая плотность теплового потока имеет место у основания ребра, и именно там и только там начинает формироваться слой осадка, а поверхность ребра на некотором удалении от основания сначала остаётся фактически чистой. Лишь постепенно, по мере роста толщины осадка у самого основания и, соответственно, уменьшения там плотности теплового потока, зона с заметной толщиной осадка расширяется. Поэтому сначала процесс будет идти одинаково на плоских рёбрах разной высоты, пока зона заметного осаждения не охватит всё ребро по высоте. Также, если ребро находится не на плоской поверхности, а скажем, на трубе, то пока ширина зоны заметного осаждения будет много меньше радиуса трубы, процесс не будет отличаться от случая плоского ребра.

Поэтому для анализа картины процесса в начальные моменты достаточно рассмотреть вариант постановки для плоского ребра бесконечной высоты ($l = \infty$). Тогда

$$0 \leq x < \infty, \text{ а в (3) вместо условия } \frac{d\vartheta}{dx_{x=l}} = 0 \text{ будет } \lim_{x \rightarrow \infty} \vartheta(x, \tau) = 0.$$

Видно, что в постановке (1) – (3) теперь нет параметров, определяющих масштаб длины, как l для ребра конечной высоты, и времени. Поэтому искомые распределения $\vartheta(x, \tau)$ и $\delta(x, \tau)$ при изменении времени τ или исходных параметров задачи должны оказаться подобными сами себе, быть автомодельными. Если сопоставить с безразмерными аргументами для случая конечного ребра (время $\frac{\tau \cdot P \cdot \vartheta_0}{l^4 \cdot A^2}$ и координата $\frac{x}{l}$), то здесь составить безразмерный аргумент, не содержащий определяющей длины, можно, взяв отношение этих координаты и времени, причём координату в степени, в четыре раза большей, чем у времени, например, в виде

$$\xi = \frac{x}{\sqrt[4]{\tau}} \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}}. \quad (4)$$

Безразмерные температура $\frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ и толщина осадка $\frac{\delta}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau}}$ должны быть функциями этого аргумента:

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \psi(\xi), \quad (5)$$

$$\frac{\delta}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau}} = \varphi(\xi). \quad (6)$$

Функции $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ от одного аргумента. Они должны оказаться одними и теми же для всех постановок с неограниченным прямым ребром во все моменты времени при всех наборах исходных параметров $t_0, t_s, \lambda_0, k, \lambda_p, \delta_p$.

Таким образом, если $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ заранее известны, то искомые размерные распределения δ и ϑ от размерных аргументов x и τ сразу определяются

$$\vartheta(x, \tau) = \vartheta_0 \cdot \psi(\xi(x, \tau)), \quad (7)$$

$$\delta(x, \tau) = \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi(x, \tau)), \quad (8)$$

где

$$\xi(x, \tau) = \frac{x}{\sqrt[4]{\tau}} \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}} \quad (0 \leq x < \infty, 0 < \tau < \infty). \quad (9)$$

Для определения $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ подставим (7)–(9) в уравнения (1), (2).

Сначала для уравнения (1). Если по уравнению (7) $\vartheta(x, \tau) = \vartheta_0 \cdot \psi(\xi(x, \tau))$, то

$$\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} = \vartheta_0 \cdot \frac{d\psi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial x}, \quad \text{где по (9)} \quad \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial x} = \sqrt[4]{\frac{A^2}{\tau \cdot 2 \cdot P \cdot \vartheta_0}}, \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0. \quad \text{Далее,}$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \vartheta(x, \tau)}{\partial x} \right) = \vartheta_0 \cdot \left[\frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\psi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \right] = \vartheta_0 \cdot \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{A}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0}}.$$

Подставляем это в левую часть уравнения (1), а непосредственно уравнения (7),

$$(8) - \text{ в правую: } \vartheta_0 \cdot \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} \cdot \frac{A}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0}} = A \cdot \frac{\vartheta_0 \cdot \psi(\xi)}{\sqrt{2\tau P \vartheta_0} \cdot \varphi(\xi)}, \quad \text{то есть} \quad \frac{d^2 \psi(\xi)}{d\xi^2} = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}.$$

Аналогично, если $\delta(x, \tau) = \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi(x, \tau))$, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta(x, \tau)}{\partial \tau} &= \frac{\partial \sqrt{2P\vartheta_0\tau}}{\partial \tau} \cdot \varphi(\xi) + \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{\partial \xi(x, \tau)}{\partial \tau} = \\ &= \frac{\sqrt{2P\vartheta_0}}{2\sqrt{\tau}} \varphi(\xi) + \sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \cdot x \cdot \sqrt[4]{\frac{A^2}{2P\vartheta_0}} \cdot \left(-\frac{1}{4}\right) \cdot \frac{1}{\tau \cdot \sqrt[4]{\tau}} = \frac{\sqrt{P\vartheta_0}}{\sqrt{2\tau}} \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \right). \end{aligned}$$

Подставляя это вместе с (7), (8) в (2), получаем:

$$\frac{\sqrt{P\vartheta_0}}{\sqrt{2\tau}} \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} \right) = P \cdot \frac{\vartheta_0 \cdot \psi(\xi)}{\sqrt{2P\vartheta_0\tau} \cdot \varphi(\xi)}, \quad \text{то есть} \quad \varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi} = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}.$$

Таким образом, в результате этих выкладок вместо (1) и (2) остаётся

$$\psi''(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}, \quad (10)$$

$$\frac{\xi}{2} \cdot \varphi'(\xi) = \varphi(\xi) - \frac{\psi(\xi)}{\varphi(\xi)}, \quad (11)$$

с условиями

$$0 \leq \xi < \infty, \varphi(0) = 1, \psi(0) = 1, \lim_{\xi \rightarrow \infty} \varphi(\xi) = 0, \lim_{\xi \rightarrow \infty} \psi(\xi) = 0. \quad (12)$$

Получилась система из двух обыкновенных дифференциальных уравнений, а не с частными производными, тоже нелинейных, третьего порядка. Их можно решить численно.

Графики зависимостей $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$ показаны на рис.1.

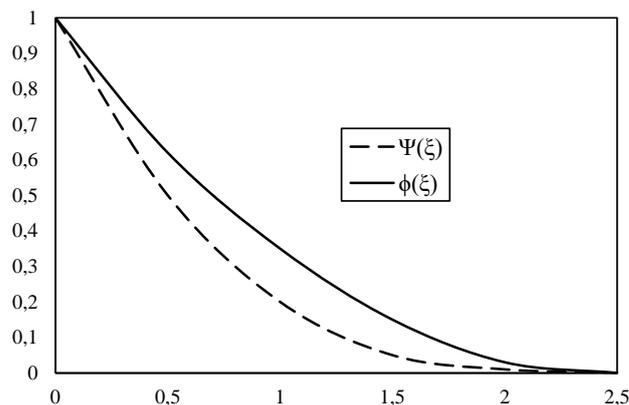


Рис. 1. Вид автомодельного решения

Fig. 1. Type of self-similar solution

Чтобы считать решение данной задачи построенным, достаточно знать одну из функций $\varphi(\xi)$ и $\psi(\xi)$. Вторая, согласно выражениям (10) или (11), может быть выражена через известную функцию. Например,

$$\varphi(\xi) = \frac{\psi(\xi)}{\psi''(\xi)}, \quad (13)$$

или

$$\psi(\xi) = \varphi(\xi) \cdot \left(\varphi(\xi) - \frac{\xi}{2} \cdot \varphi'(\xi) \right). \quad (14)$$

Для этой функции, после прямой подстановки одного из этих соотношений в другое, получится обыкновенное дифференциальное уравнение относительно одной функции одного переменного, но довольно сложное, нелинейное, третьего порядка.

Результаты и обсуждение

Таким образом, в работе показано, что рассматриваемая задача о формировании осадка на плоском ребре неограниченной высоты имеет автомодельное решение, которое может быть представлено в виде безразмерной функции одной переменной, единой для всех наборов исходных параметров ($t_0, t_s, \lambda_0, k, \lambda_p, \delta_p$). Размерные значения толщины слоя осадка и температуры в каждой точке ребра в любой момент времени легко находятся по этой функции через элементарные соотношения (7), (8), с использованием при необходимости выражения (14) или (13). Вид автомодельного решения представлен графически на рисунке 1.

Следует отметить, что это решение фактически точно описывает начальную стадию формирования осадка и на прямом ребре заданной (конечной) высоты, а также начальные моменты процесса в случае ребра на круглой трубе.

Заключение

Полученные результаты не только проясняют картину процесса в начальные моменты времени, но и дают точное количественное описание для его характеристик. Эти оценки показывают, что первоначально осадок образуется у основания ребра, там толщина слоя осадка растёт наиболее быстро. При достаточной высоте ребра часть его

поверхности, удалённая от основания, сначала остаётся практически чистой, хотя ширина зоны, покрытой осадком, в ходе процесса растёт.

Построенные распределения толщины осадка и температуры можно использовать в качестве начальных, при численном решении задач о формировании осадка на круглом или плоском ребре конечной высоты, чтобы избежать трудностей, связанных с неограниченными значениями теплового потока при малых временах. Это позволяет не вводить искажающее предположение о конечном первоначальном осадке на всём ребре, и тем самым избежать сильного сгущения сетки по координате и времени.

Литература

1. Голованчиков А.Б., Шурак А.А., Меренцов Н.А. Моделирование работы кожухотрубного теплообменника с учетом энерго- и ресурсосбережения // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2021. (2021-1). С. 26–29.
2. 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.
3. Sun K., Lu L., Jiang H. A computational investigation of particle distribution and deposition in a 90 bend incorporating a particle–wall model // *Building and Environment*. 2011. Vol. 46, N6. pp. 1251–1262.
4. Lu H., Lu L. Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows // *Building and Environment*. 2015. Vol. 92. pp. 317–327.
5. Guo Z., Li N., Klemeš J.J., et al. Mechanisms and strategies for ash deposition reduction in flue gas heat exchanger // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022. Vol. 24, N1. pp. 77–93.
6. 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. Vol. 174. pp. 1049–1059.
7. Xu Z., Sun A., Han Z., et al. Simulation of particle deposition in a plate-fin heat exchanger using a particle deposition model with a random function method // *Powder Technology*. 2019. Vol. 355. pp. 145–156.
8. 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. Vol. 251. pp. 316–327.
9. 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.
10. Jiang H., Lu L., Sun K. Simulation of particle deposition in ventilation duct with a particle–wall impact model // *Building and environment*. 2010. Vol. 45, N5. pp. 1184–1191.
11. Jiang H., Lu L., Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors // *Indoor and Built Environment*. 2012. Vol. 21, N2. pp. 264–272.
12. Han H., He Y.L., Tao W.Q., et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction // *International journal of heat and mass transfer*. 2014. Vol. 72. pp. 210–221.
13. Lu H., Lu L., Jiang Y. Numerical simulation of particle deposition in duct air flows with uniform, expanding or contracting cross-section // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 128. pp. 867–875.
14. Zhan F., Zhuang D., Ding G., et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger // *International Journal of Refrigeration*. 2016. Vol. 72. pp. 27–40.
15. 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. Vol. 113. pp. 1033–1046.
16. Guo K., Zhang N., Smith R. Design optimisation of multi-stream plate fin heat exchangers with multiple fin types // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 131. pp. 30–40.
17. 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. Vol. 115. pp. 406–417.
18. Zhan F., Ding G., Zhuang D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 149. pp. 119258.
19. 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. Vol. 126. pp. 737–761.

20. YaLing H.E., SongZhen T.A.N.G., FeiLong W.A.N.G., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery // *Chinese Science Bulletin*. 2016. Vol. 61, N17. pp. 1858–1876.

21. Wang F.L., Tang S.Z., He Y.L., et al. Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: Experimentation via on line monitoring // *Fuel*. 2019. Vol. 236. pp. 949–959.

Авторы публикации

Якимов Николай Дмитриевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Бадретдинова Гузель Рамилевна – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Борисова Светлана Дмитриевна – канд. тех. наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» (ВБА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Golovanchikov AB, Shurak AA, Merentsov NA. Modelirovanie raboty kozhukhotrubnogo teploobmennika s uchetom energo- i resursosberezheniya. *Khimiya. Ekologiya. Urbanistika*. 2021;2021:26-29.

2. Dmitriev AV, Zinurov VE, Gumerova GH. Otsenochnyi raschet protsessa teploobmena v kamere sgoraniya pri szhigani prirodnogo gaza. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018; 21(2): 99-103. (In Russ).

3. Sun K, Lu L, Jiang H. A computational investigation of particle distribution and deposition in a 90 bend incorporating a particle–wall model. *Building and Environment*. 2011;46(6):1251-2. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.006>

4. Lu H, Lu L. Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows. *Building and Environment*. 2015;92:317-7. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.035>

5. Guo Z, Li N, Klemeš JJ, et al. Mechanisms and strategies for ash deposition reduction in flue gas heat exchanger. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022;24(1):77-3. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02083-2>

6. Kapustenko PO, Klemeš J.J., 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>

7. Xu Z, Sun A, Han Z, et al. Simulation of particle deposition in a plate-fin heat exchanger using a particle deposition model with a random function method. *Powder Technology*. 2019;355:145-6. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.031>

8. 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>

9. 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>

10. Jiang H, Lu L, Sun K. Simulation of particle deposition in ventilation duct with a particle–wall impact model. *Building and environment*. 2010;45(5):1184-1. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.001>

11. Jiang H, Lu L, Sun K. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of particle deposition in a two-dimensional turbulent channel air flow: study of influence factors. *Indoor and Built Environment*. 2012;21(2):264-2. <https://doi.org/10.1177/1420326X11414939>

12. Han H, He YL, Tao WQ, et al. A parameter study of tube bundle heat exchangers for fouling rate reduction. *International journal of heat and mass transfer*. 2014;72:210-1. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.010>
13. Lu H, Lu L, Jiang Y. Numerical simulation of particle deposition in duct air flows with uniform, expanding or contracting cross-section. *Energy and Buildings*. 2016;128:867-5. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.052>
14. Zhan F, Zhuang D, Ding G, et al. Numerical model of particle deposition on fin surface of heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*. 2016;72:27-40. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.015>
15. 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>
16. Guo K, Zhang N, Smith R. Design optimisation of multi-stream plate fin heat exchangers with multiple fin types. *Applied Thermal Engineering*. 2018;131:30-40. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.099>
17. 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>
18. Zhan F, Ding G, Zhuang D. Numerical model of particle deposition on wet fin surfaces of heat exchanger under dehumidifying conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;149:119258. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119258>
19. 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>
20. YaLing HE, SongZhen TANG, FeiLong WANG., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchanger for middle and low temperature flue gas waste heat recovery. *Chinese Science Bulletin*. 2016;61(17):1858-6. <https://doi.org/10.1360/N972016-00248>
21. Wang FL, Tang SZ, He YL, et al. Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: Experimentation via on line monitoring. *Fuel*. 2019;236:949-9. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.081>

Authors of the publication

Nikolay D. Yakimov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Guzel R. Badretdinova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Svetlana D. Borisova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **20.05.2022г.**

Отредактировано **25.05.2022г.**

Принято **26.06.2022г.**

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



УДК 621.314

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143

3 D МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ВИБРАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Цель данной работы - разработка 3-D модели силового трансформатора для исследований параметров колебаний и определения технического состояния. Техническое состояние силового трансформатора анализируется по амплитудным спектрам вибрации, сформированным с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье.

МЕТОДЫ. Для определения информативных частот объектов сложной формы, таких как силовой трансформатор, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с помощью компьютерного моделирования в программном обеспечении COMSOL Multiphysics

РЕЗУЛЬТАТЫ. По результатам проведенного моделирования частот механических колебаний магнитопровода трансформатора определены информативные частотные диапазоны для определения уровня технического состояния силового трансформатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Конечно-элементное моделирование позволяет представить трансформатор в виде дискретной системы, состоящей из компонентов, объединенных между собой в узловых точках, что позволяет моделировать дефекты трансформатора и определять его вибрационные параметры в разных технических состояниях.

Ключевые слова: силовой трансформатор, метод конечных элементов, амплитудный спектр, вибрационный метод контроля.

Для цитирования: Басенко В.Р., Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В. 3 D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 130-143. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143.

3 D MODEL OF A POWER TRANSFORMER TO STUDY ITS TECHNICAL CONDITION BY OSCILLATION PARAMETERS

VR. Basenko, MF. Nizamiev, IV. Ivshin, OV. Vladimirov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: *TARGET.* The purpose of this work is the development of a 3-D model of a power transformer to study the oscillation parameters and determine the technical condition. The technical condition of the power transformer is analyzed by the vibration amplitude spectra formed using the fast Fourier transform algorithm.

METHODS. To determine the informative frequencies of objects of complex shape, such as a power transformer, it is advisable to use the finite element method (FEM), implemented using computer simulations in the COMSOL Multiphysics software

RESULTS. According to the results of the calculation of the frequencies of mechanical vibrations of the magnetic circuit of the transformer, informative frequency ranges were determined to determine the level of technical condition of the power transformer.

CONCLUSION. Finite element modeling makes it possible to represent a transformer as a discrete system consisting of components interconnected at nodal points, which will allow modeling transformer defects and determining its vibration parameters in different technical conditions.

Keywords: *power transformer, finite element method, amplitude spectrum, vibration control method.*

For citation: Basenko VR., Nizamiev MF., Ivshin IV., Vladimirov OV. 3 D model of a power transformer to study its technical condition by oscillation parameters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 130-143. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143.

Введение

Силовые трансформаторы являются основным элементом электрической подстанции. Техническое состояние силового трансформатора, от которого зависит надежная работа всей электрической подстанции, определяется по результатам контроля и диагностики. Трендом в области неразрушающего контроля и диагностики является проведение измерений и испытаний для трансформаторов под напряжением, что позволяет перейти к обслуживанию трансформаторов по их текущему техническому состоянию и снизить технологический и экономический ущерб вывода оборудования из эксплуатации. Создание более точных, чувствительных, достоверных и рациональных методов контроля технического состояния силовых трансформаторов под напряжением является актуальной задачей неразрушающего контроля.

Среди методов неразрушающего контроля, позволяющих определять техническое состояние трансформатора под напряжением, наиболее эффективным методом является вибрационный метод контроля [1]. С помощью вибрационного метода контролируется состояние магнитопровода и обмоток, составляющих электромагнитную систему или «активную часть» трансформатора.

С целью разработки методики контроля технического состояния силовых трансформаторов по параметрам вибрации, необходимо провести теоретические исследования по определению информативного частотного интервала, характеризующих наличие дефекта. Для определения информативных частот объектов сложной формы, таких как силовой трансформатор, целесообразно использовать метод конечных элементов (МКЭ), реализуемый с использованием компьютерного моделирования.

С помощью МКЭ активная часть трансформатора разбивается на ряд областей (конечных элементов), в которых неизвестные физические величины (механическое смещение, магнитная индукция, электрический потенциал и т.д.) будут иметь аналитическое выражение в виде известных математических уравнений. Таким образом, МКЭ позволяет представить трансформатор в виде дискретной системы, состоящей из компонентов, объединенных между собой в узловых точках, что позволяет моделировать дефекты трансформатора и определять его вибрационные параметры в разных технических состояниях.

Современные методы вибрационного контроля силовых трансформаторов дают возможность определить уровень прессы обмоток и магнитопровода без вывода трансформатора из работы, определить снижение прессы для каждой фазы и установить другие причины повышения вибрации трансформатора.

По результатам анализа работ авторов Тюрина А.Н., Баширова З.А., Долина А.П., [5, 6, 7] можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуды на частоте 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора [8].

Материалы и методы. Построение 3D модели трансформатора

Для реализации исследования по определению информативного частотного диапазона выбран программный пакет *COMSOL Multiphysics*. *COMSOL Multiphysics* - это комплексная интегрированная среда для моделирования различных физических явлений.

Данный программный пакет имеет полную совместимость с системами типа CAD/CAM/CAE, что позволяет использовать дополнительные инструменты для создания 3D геометрии исследуемого трансформатора.

Блок-схема алгоритма расчета частот колебаний магнитопровода силового трансформатора представлена на рисунке 1.

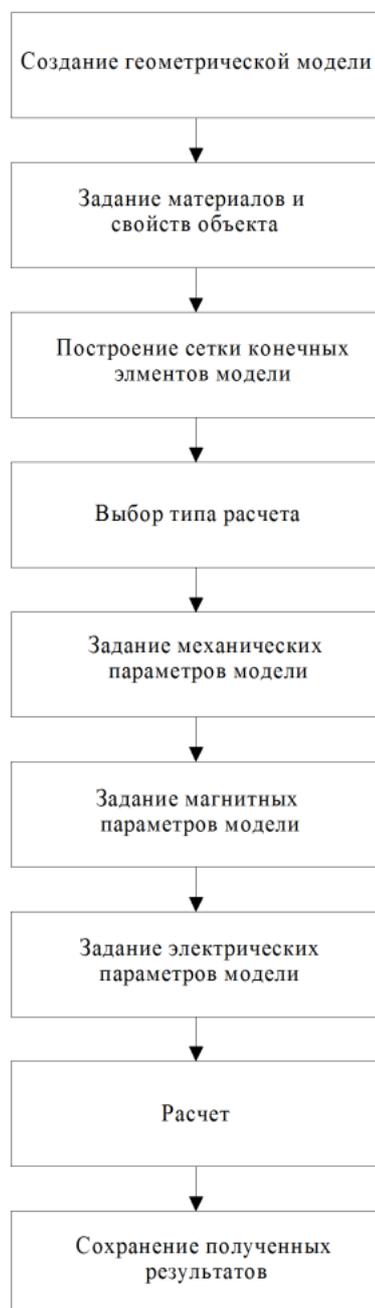


Рис. 1. Блок-схема расчета частот колебаний магнитопровода. *Fig. 1. Block diagram for calculating the oscillation frequencies of the magnetic core.*

В качестве объекта исследования для определения информативных частот магнитопровода, характеризующих наличие дефекта, выбран трансформатор типа ТСЗ 16 кВА 0,4/0,22 кВ (рис. 2).



Рис. 2. ТСЗ 16 кВА

Fig.2. TSZ 16 kVA

С помощью вибрационного контроля анализируется состояние магнитопровода и обмоток трансформатора, поэтому объектом исследования будет служить не весь трансформатор, а его активная часть. С помощью программного пакета КОМПАС – 3D, совместимого *COMSOL Multiphysics*, создана 3D модель активной части трансформатора ТСЗ 16 кВА, представленная на рисунке 3.

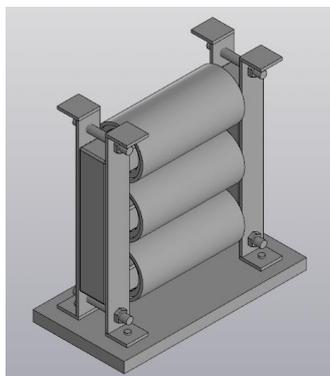


Рис. 3. 3D модель активной части трансформатора ТСЗ 16 кВА

Fig. 3D model of the active part of the transformer TSZ 16 kVA

Трансформатор ТСЗ 16 кВА имеет стержневой тип магнитопровода, стержни которого расположены горизонтально. Вертикально расположенное ярмо стянуто балками по бокам, которые скреплены между собой шпильками и гайками с резьбой М14.

Задача данного исследования заключается в определении частот механических колебаний магнитопровода, вызванных магнитострикционным эффектом. Данная геометрическая модель является трудоемкой для проведения расчета колебаний магнитопровода под действием электромагнитного поля, поэтому принято решение об изменении модели активной части трансформатора с допущениями. Новая геометрическая модель с допущениями представлена на рисунке 4.

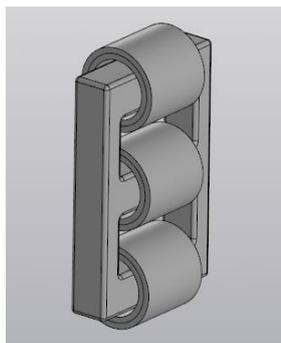


Рис. 4. 3D модель активной части трансформатора с допущениями

Fig 4. 3D model of the active part of the transformer with assumptions

Допущения заключаются в том, что в новой модели присутствуют только магнитопровод и обмотки. Балки и крепления магнитопровода будут заменены на фиксации и механические усилия, оказывающие давление на ярма магнитопровода. Обмотки трансформатора представлены в виде двух цилиндров разных диаметров. Для программного пакета *COMSOL* этого будет достаточно, так как он имеет функцию задания электрических обмоток общего типа с указанием материала, числа витков и электрической проводимости.

Геометрические размеры активной части трансформатора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Размеры активной части ТСЗ 16 кВА

Элемент	Размер (мм)
Длина стержня	290
Длина ярма	240
Длина цилиндра обмоток ВН и НН	210
Толщина цилиндра обмотки НН	10
Толщина цилиндра обмотки ВН	8

Построенная геометрическая модель (рис. 4) позволяет корректно провести исследование информативных частот механических колебаний магнитопровода.

Расчет механических колебаний магнитопровода под воздействием электромагнитного поля

В программном обеспечении *COMSOL Multiphysics* проведен расчет вынужденных механических колебаний магнитопровода, вызванных действием электромагнитного поля.

Перед проведением расчета физических процессов были заданы следующие материалы физической модели активной части силового трансформатора. Для магнитопровода был выбран материал *Soft Iron*, который является наиболее близким по параметрам к шихтованной стали магнитопровода. Основные значения параметров магнитопровода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры материала магнитопровода трансформатора

Параметр	Значение параметра
<i>Electrical conductivity</i>	1[S/m]
<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Density</i>	8300[kg/m ³]
<i>Poisson's ratio</i>	0.3
<i>Young's modulus</i>	205e9[Pa]

Для обмоток выбран материал *Copper*, наиболее подходящий по параметрам для обмоток трансформатора. Основные значения параметров обмоток представлены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры материала обмоток трансформатора

Параметр	Значение параметра
<i>Relative permeability</i>	1
<i>Relative permittivity</i>	1
<i>Density</i>	8960[kg/m ³]
<i>Young's modulus</i>	110e9[Pa]
<i>Poisson's ratio</i>	0.35
<i>Electrical conductivity</i>	5.998e7[S/m]
<i>Coefficient of thermal expansion</i>	17e-6[1/K]
<i>Heat capacity at constant pressure</i>	385[J/(kg*K)]

Число витков катушки определено исходя из коэффициента трансформации, и составляют для высшего напряжения 400, а низшего 230.

Проведен расчет механических колебаний магнитопровода, вызванных электромагнитным полем. Данная задача включает в себя моделирование нескольких физических процессов, а именно:

- 1) моделирование 3-х фазной электрической цепи;
- 2) моделирование магнитных полей;
- 3) моделирование механики твердого тела.

С помощью пакета *Electrical Circuit* была смоделирована электрическая цепь трансформатора, представленная на рисунке 5.

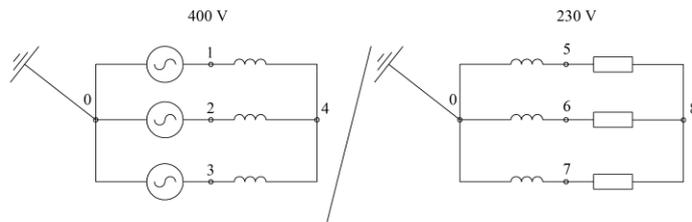


Рис. 5. Схема 3-х фазной электрической цепи трансформатора ТСЗ *Fig.5. Scheme of a 3-phase electrical circuit of a transformer TSZ*

Напряжение на каждую фазу было задано по синусоидальному закону с амплитудой 400 Вольт и начальной фазой 0 радиан, 2,09 радиан и 4,18 радиан, что соответствует 0 градусам, 120 и - 120 градусам для уравнений симметричной трехфазной цепи.

Заданы параметры магнитного поля с помощью пакета *Magnetic Fields*. Основным параметром здесь служит задание магнитных свойств для магнитопровода, которые определены как интерполяция нелинейного магнитного материала *Soft Iron*. Данные параметры отображены на графике зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля, представленные на рисунке 6.

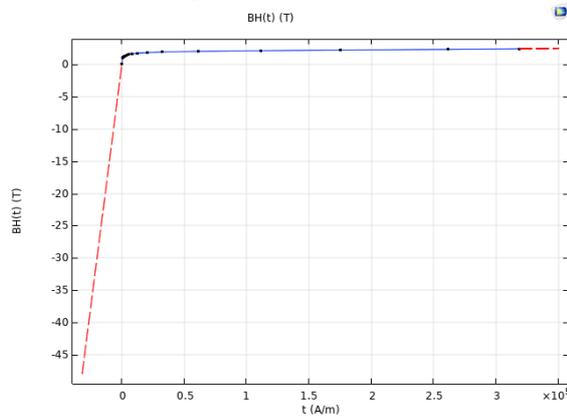


Рис. 6. Магнитные свойства материала магнитопровода трансформатора *Fig. 6. Magnetic properties of the material of the magnetic circuit of the transformer.*

Расчет магнитных полей, возникающих под действием электрического тока 3-х фазной цепи, будет проводиться решением уравнений Максвелла дифференциальной форме, представленной в системе уравнений 1:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \mathbf{B} &= \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Магнитопровод является магнестрикционным материалом, поэтому уравнение магнитной индукции будет иметь измененную форму, представленную в формуле 2:

$$\mathbf{B} = \mu_0 [\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{H}, S_{mech}) + \mathbf{M}_r] \quad (2)$$

где важным элементом является \mathbf{M}_r - величина напряженности магнитного поля, возникшей в результате остаточной намагниченности.

Для граничных условий, приняты условия магнитной изоляции, описанные в формуле 3:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (3)$$

Моделирование механических колебаний магнитопровода осуществляется через понятия механических напряжений и тензора напряжений, описанных в уравнении 4:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{s} + \mathbf{F}_v \quad (4)$$

Активная часть трансформатора была зафиксирована в плоскости XY, вследствие чего значение u равно 0.

После задания условий физики расчета упрощенная геометрическая модель трансформатора построена конечно-элементная сетка, представленная на рисунке 7.

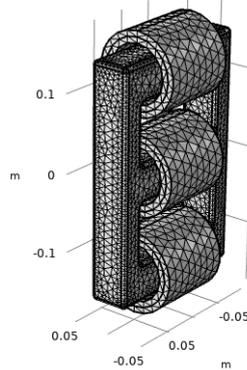


Рис.7. Конечно-элементная сетка магнитопровода и обмоток трансформатора ТСЗ *Fig.7. Finite element mesh of the magnetic core and windings of the transformer TSZ*

Максимальный размер элемента сетки – 30 мм, минимальный – 3 мм, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, а коэффициент кривизны равен 0,6.

Произведен расчет по типу расчета *Time dependent*. Данный тип расчета производит вычисления во временной области, что позволяет учесть характер электромагнитного поля, которое меняется во времени. Решатель был задан синусоидальной функцией, временной период $t = 0,02$ с, что соответствует периоду колебаний электромагнитного поля промышленной частоты с шагом равным 0,001 с.

Результаты моделирования трансформатора.

Результатом расчета магнитного поля служит распределение магнитного потока в виде магнитной индукции в магнитопроводе, изображенной на рисунках 8 и 9.

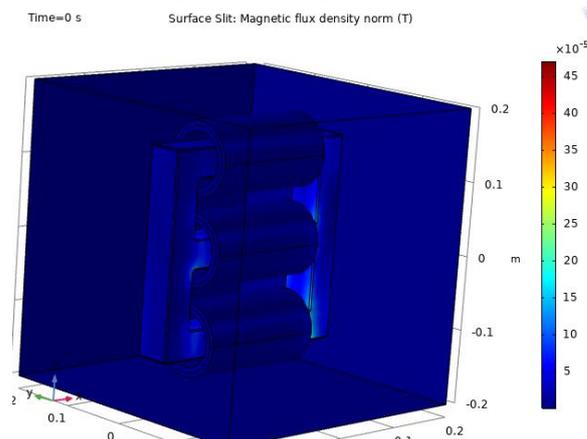


Рис. 8. Распределение магнитного потока в начальном момент времени *Fig.8. Magnetic flux distribution at the initial moment of time*

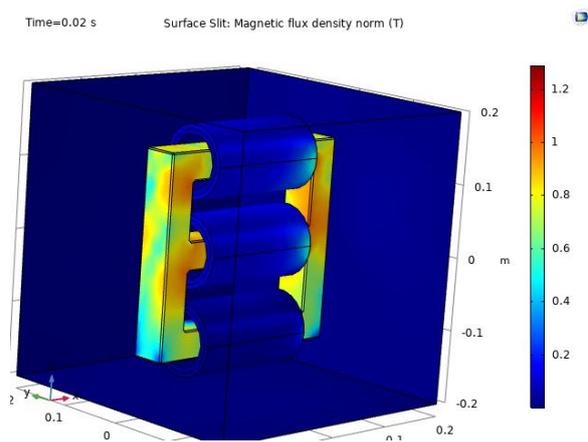


Рис. 9. Распределение магнитного потока в момент времени 0,02 с *Fig. 9. Magnetic flux distribution at time 0.02 s*

Из рисунков 8 и 9 видно, что магнитопровод намагничен неравномерно, так как имеют место нелинейные процессы магнитного насыщения, которые связаны с параметрами 3-х фазного электромагнитного поля. Максимальное значение магнитной индукции получено в среднем стержне и ярме магнитопровода на уровне 1,35 Тл, показанной красной областью на рисунке 9.

Проведено два расчета механических колебаний магнитопровода под действием магнитного поля. При этом менялось одно условие – задание механического момента, которое имитирует прессовочное усилие на магнитопровод. Первый расчет был для бездефектного магнитопровода с механическим моментом 40 Н/м в области магнитопровода в плоскости XZ. Второй расчет моделировал дефектный трансформатор с механическим моментом 0 Н/м для магнитопровода. То есть для второго расчета отсутствовало внешнее давление на магнитопровод, также как при распрессовке, и механика магнитопровода рассчитывалась только под влиянием внутренних сил упругости. Результаты данных расчетов представлены на рисунках 10 и 11.

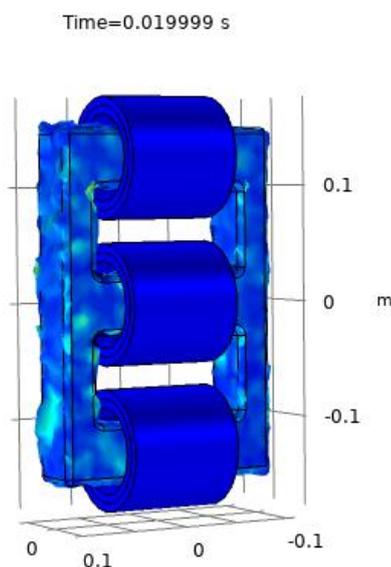


Рис. 10. Форма механических колебаний бездефектного магнитопровода *Fig. 10. The form of mechanical oscillations of a defect-free magnetic circuit*

Из рисунков 10 и 11 видны изменения форм и направления колебаний магнитопровода. Видно, что при распрессовке магнитопровода, колебания становятся больше по амплитуде и приводят к более серьезным деформациям. Для более детального анализа построены амплитудные спектры вибрации магнитопровода.

Рассмотрим амплитудный спектр бездефектного магнитопровода в диапазоне от 0 до 1500 Гц, показанного на рисунке 12.

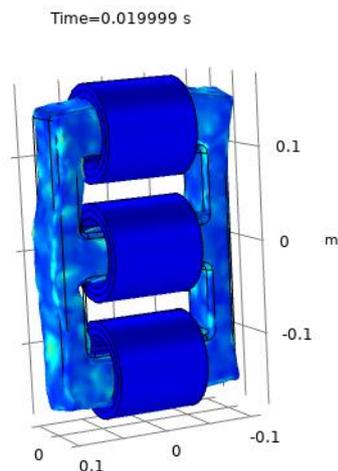


Рис. 11. Форма механических колебаний дефектного магнитопровода *Fig. 11. The form of mechanical oscillations of a defective magnetic circuit*

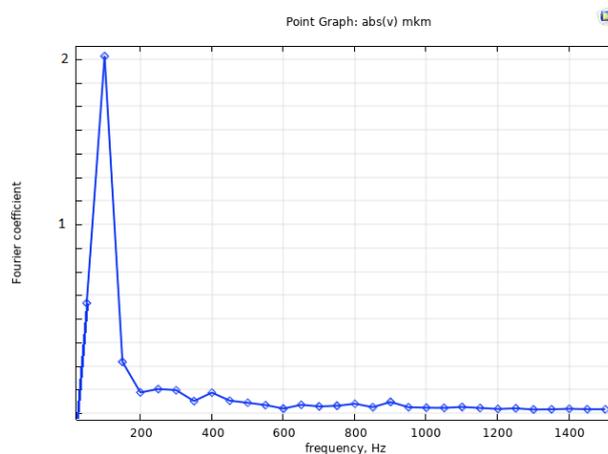


Рис. 12. Амплитудный спектр бездефектного магнитопровода до 1500 Гц *Fig. 12. Amplitude spectrum of a defect-free magnetic circuit up to 1500 Hz*

На рисунке 12 видно, что основная амплитуда сосредоточена на частоте 100 Гц. Известно [8], что частоты выше 700 Гц не являются информативными для определения уровня технического состояния магнитопровода трансформатора, что также и подтверждает рисунок 12, так как в данном спектре на частотах выше 700 Гц отсутствует какое-либо возрастание амплитуд. Проведен анализ амплитудных спектров для дефектного и бездефектного магнитопровода в диапазоне от 0 до 700 Гц, изображенных на рисунках 13 - 15.

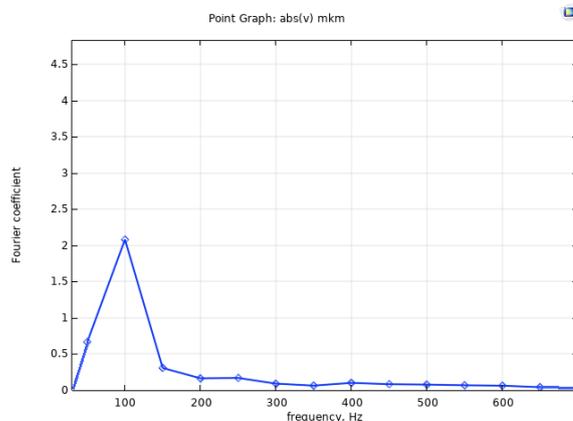


Рис. 13. Амплитудный спектр бездефектного магнитопровода *Fig. 13. Amplitude spectrum of a defect-free magnetic circuit*

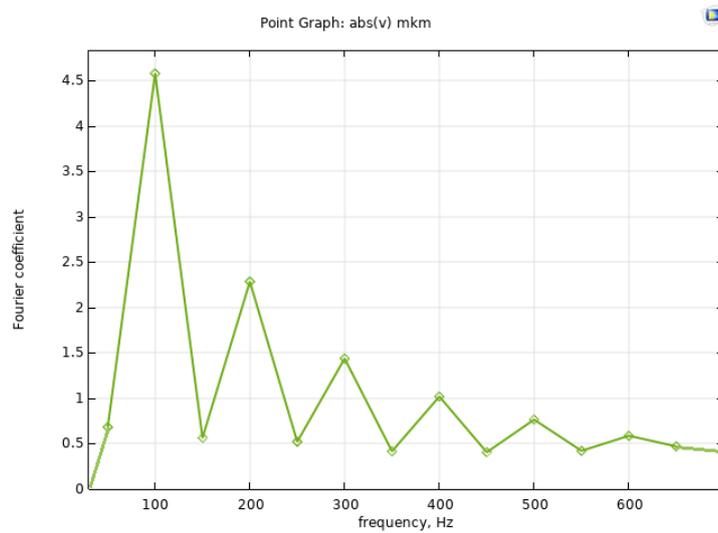


Рис. 14. Амплитудный спектр дефектного магнитопровода *Fig. 14. Amplitude spectrum of a defective magnetic circuit*

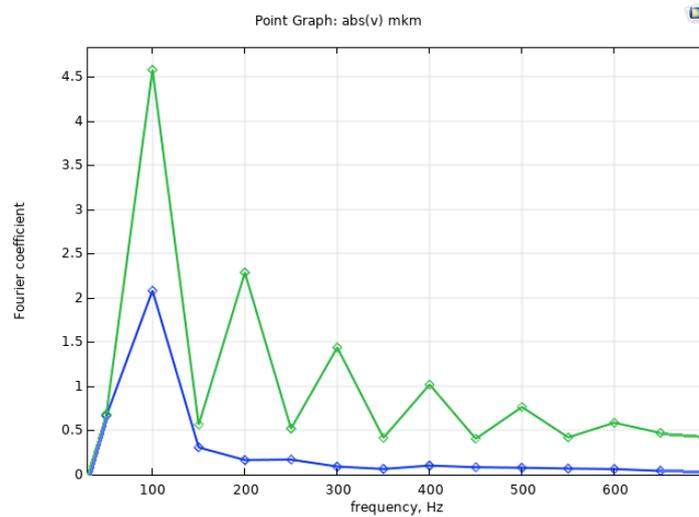


Рис. 15. Совмещенный амплитудный спектр дефектного и бездефектного магнитопровода *Fig. 15. Combined amplitude spectrum of defective and defect-free magnetic circuit*

Из рисунка 15 видно, что при распрессовке возникает увеличение амплитуды виброперемещения на частотах кратных 100 Гц, в диапазоне от 100 Гц до 700 Гц, что вызвано снижением механического момента креплений магнитопровода, так как данное снижение вызывает колебания магнитопровода в дополнительной плоскости, в которой снизились механические усилия.

Результаты

Апробация результатов моделирования экспериментальными исследованиями

Для подтверждения результатов моделирования проведены экспериментальные исследования параметров вибрации магнитопровода работающего трансформатора. Измерения проводились с помощью бесконтактного лазерного контрольно – измерительного комплекса (ЛКИК) [1]. Схема ЛКИК представлена на рисунке 16.

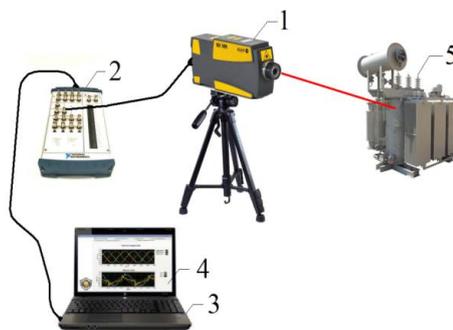


Рис. 16. Схема ЛКИК: 1 – лазерный виброметр PDV - 100; 2 – АЦП NI USB – 6251; 3 – персональный компьютер; 4 – программное обеспечение LabVIEW; 5 – силовой трансформатор

Fig.16. Scheme LCMC: 1 - laser vibrometer PDV - 100; 2 - ADC NI USB - 6251; 3 - personal computer; 4 - LabVIEW software; 5 - power transformer

ЛКИК состоит из лазерного виброметра PDV – 100 - 1, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI USB – 6251 - 2, персонального компьютера - 3 и программного обеспечения - 4, разработанного в среде графического программирования LabVIEW.

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 3 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были заданы следующие параметры измерений:

- частотный диапазон от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44,1 кГц.

Эксперимент заключался в измерении параметров вибрации магнитопровода трансформатора ТС3 на холостом ходу и состоял из двух этапов. Первый этап заключался в измерении вибрации трансформатора, магнитопровод которого нормально запрессован. Во втором этапе измерений магнитопровод трансформатора был распрессован (снижены осевые усилия на стержни на 40 Н\м). Результаты трансформатора ТС3 обработаны в программном обеспечении LabVIEW и представлены на рисунках 17 и 18.

На рисунке 17 построен амплитудный спектр для трансформатора ТС3 с нормально запрессованным магнитопроводом.

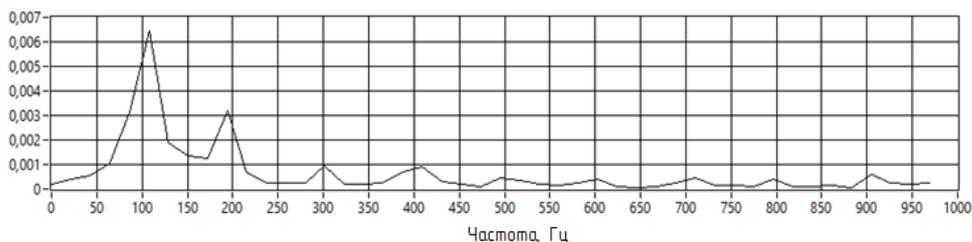


Рис. 17. Амплитудный спектр ТС3 с нормально запрессованным магнитопроводом

Fig. 17. Amplitude spectrum of TSZ with a normally pressed magnetic circuit

На рисунке 18 построен амплитудный спектр вибрации после внесения дефекта (распрессовки) в стержень магнитопровода.

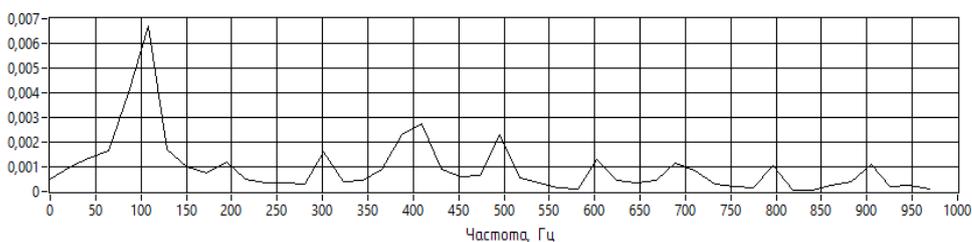


Рис. 18. Амплитудный спектр ТС3 с распрессованным магнитопроводом

Fig.18. Amplitude spectrum of TSZ with pressed magnetic core

Из рисунков 17 и 18 видно, что экспериментально полученные амплитудные спектры параметров вибрации трансформатора ТСЗ имеют аналогичную структуру, как и амплитудные спектры (рисунки 13-15), полученные в результате конечно – элементного моделирования. Таким образом, проведенные экспериментальные исследования подтверждают правильность проведенных расчетов по исследованию параметров вибрации 3 D модели трансформатора.

Выводы

1. По результатам проведенного расчета частот механических колебаний магнитопровода трансформатора в программной среде COMSOL Multiphysics были определены информативные частотные диапазоны для определения уровня опрессовки силового трансформатора. Анализ полученных результатов показал, что информативным частотным диапазоном, характеризующие возникновение распрессовки, является частотный интервал от 150 до 700 Гц.

2. Возникновение распрессовки в балках трансформатора приводит к увеличению амплитуды вибрации на информативном частотном диапазоне.

3. По результатам компьютерного моделирования механических колебаний магнитопровода предлагается использовать полученный информативный диапазон для создания нового метода контроля технического состояния силового трансформатора по параметрам вибрации.

4. Достоверность результатов компьютерного моделирования подтверждена экспериментальными исследованиями параметров вибрации магнитопровода трансформатора, проведенными с помощью ЛКИК.

Заключение

Известные из литературы исследования вибрационных характеристик объектов сложной формы посвящены, в основном, определению информативно-частотного диапазона вращающихся объектов, или же объектов сложной формы, но без наличия постоянного воздействия внешних сил. В работе [2] авторы исследовали влияние конфигурации вращающихся элементов энергетических установок их на вибрационные характеристики. В работе [6] исследовано влияние дефектов турбокомпрессора на изменение его собственных частот колебаний. В работе [9] автор исследовал влияние топологии объектов сложной формы на изменение информативно-частотного диапазона исследуемых объектов. Автор пришел к выводу, что амплитудные спектры имеют прямую зависимость от массогабаритных и конструктивных особенностей изделий сложной формы. В работе [10] рассматривалось влияние наличия повреждений в опорно-стержневых изоляторах на их вибрационный сигнал. Таким образом, в известной литературе вопрос определения информативно-частотного диапазона трансформатора рассматривался только косвенно, ввиду сложности проведения экспериментальных исследований. Научное приращение результатов данного исследования заключается в законченности теоретического определения информативно-частотного диапазона механических колебаний силового трансформатора и экспериментальном подтверждении теоретических исследований с помощью разработанного ЛКИК [1].

Литература

1. Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф.. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня прессовки обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 155-168
2. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Ваньков Ю.В.. Измерительно-диагностический комплекс для диагностики энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №3-4. С. 108-113.
3. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика 2015. №6. С.18-25.
4. Иголкин А.А., Сафин А.И., Макарянц Г.М., Крючков А.Н., Шахматов Е.В.. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трехкомпонентного лазерного виброметра / Прикладная Физика. 2013. №4. С.49-53
5. Низамиев М.Ф., Загретдинов А.Р., Измайлова Е.В.. Программный комплекс для экспресс - контроля корпуса турбокомпрессора газового двигателя КАМАЗ // Материалы докладов X международной научно-технической конференции молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин». – Казань: ООО «Ремарк», 2014. С. 94-95.

6. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслонасосов: руководство по эксплуатации // Димрус. Пермь: 2015. 60 с.

7. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф.. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020» Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. Сборник материалов конференции. Т.3. С.26

8. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы // IX конференция «Гинчуринские чтения». 2014. №Т.1 С. 151-152.

9. Низамиев М.Ф., Гибадуллин Р.Р.. Применение лазерных виброметров для контроля технического состояния стержневых опорных изоляторов // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике, 2014 г.: в 5 т. Т. 4. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2014. С. 335-339.

10. Низамиев М.Ф., Ваньков Ю.В., Ившин И.В., Загретдинов А.Р. Программно-алгоритмическое обеспечение экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора двигателя КАМАЗ // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, №5. С. 141-143.

11. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Владимиров О.В., Сахапов А.А. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния деталей перспективного газового двигателя КАМАЗ // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences 9th International scientific conference. 2015. С. 19-25.

12. Ившин И.В., Владимиров О.В., Загретдинов А.Р., Низамиев М.Ф. Исследование влияния дефектов на собственные частоты колебаний деталей энергетических установок // Известие вузов. Проблемы энергетики № 5-6. Казань: КГЭУ, 2015, С. 66-74

13. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Dolomanyk L.V.. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods // 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 44894 Proceedings. V.1, Pt 5, Novosibirsk 2018. P. 320-325.

14. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Gibadullin R.R., Denisova N.V. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. // Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, Volum 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

15. Ившин И.В., Гимадеев Р.А., Мухортов И.С., Билалов Ф.Ф., Валиуллин Р.Р. Способ диагностики силовых трансформаторов / Патент на изобретение № 2638129 от 09.03.2016.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

References

1. Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin I., Nizamiev M.F. Non-contact laser control and measuring complex for determining the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS.* 2021;23(3):155-168

2. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Vladimirov O.V, Vankov Yu.V. Measuring and diagnostic complex for diagnostics of power plants. *News of higher educational institutions. Energy*

problems. 2014;3-4:108-113.

3. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Maksimov V.V., et al. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. *Electrical*. 2015;6:18-25

4. Igolkin A.A., Safin A.I., Makaryants G.M., Kryuchkov A.N., Non-contact registration and analysis of vibration of mechanical engineering products using a three-component laser vibrometer. *V. Chess Applied Physics*. 2013;4:49-53

5. Nizamiev M.F, Zagretdinov A.R, Izmailova E.V. Software package for express control of the turbocharger housing of a gas engine KAMAZ. Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference of Young Specialists «Research, design and manufacturing technology of compressor machines». Kazan: Remark LLC, 2014. P. 94-95.

6. The quality control system for pressing windings and steel of transformers by measuring vibration, monitoring the condition of oil pumps: operation manual. Dimrus. Perm: 2015. 60 p.

7. Basenko V.R, Nizamiyev MF. Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex. ENERGY-2020. Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. Collection of conference materials. 2020;3 - P.26

8. Nizamiyev M.F. Analysis of methods for studying vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape. IX conference "Tinchurin Readings". 2014;1:151-152.

9. Nizamiev M.F, Gibadullin R.R. Application of laser vibrometers for monitoring the technical condition of rod support insulators. *Collection of materials of reports of the National Energy Congress*. Kazan: Kazan. state energy un-t, 2014;5(4):335-339.

10. Nizamiev M.F, Vankov Yu.V, Ivshin I.V, et al. Software and algorithmic support for express control of the KAMAZ engine turbocharger housing. *Bulletin of the Technological University*. 2015;18(5):141-143.

11. Nizamiev M.F, Ivshin I.V, Vladimirov O.V, Sakhapov A.A. *Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of parts of a promising gas engine KAMAZ*. European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences 9th International scientific conference. 2015. P. 19-25.

12. Ivshin I.V., Vladimirov O.V., Zagretdinov A.R., Nizamiyev M.F. Study of the influence of defects on the natural frequencies of oscillations of parts of power plants / *Izvestiya vuzov*. Energy Problems No. 5-6 - Kazan: KSEU, 2015, pp. 66-74

13. Ivshin I.V, Nizamiev M.F, Vladimirov O.V, et al. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods / 14th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). 44894 Proceedings. Novosibirsk 2018. P. 320-325.

14. Ivshin I. V, Nizamiev M.F, Vladimirov O.V, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research*. 2018;8(1);3:322-333.

15. Ivshin I.V, Gimadeev R.A, Mukhortov I.S, et al. Method for diagnosing power transformers. Patent for invention No. 2638129 dated 03/09/2016.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 25.05.2022г.

Отредактировано 30.05.2022г.

Принято 30.05.2022г.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Цветков А.Н., Доан Нгок Ши, Ярославский Д.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Стремительное развитие электротранспорта требует применения энергоэффективного привода с целью повышения дальности пробега между зарядками аккумуляторов. Это в свою очередь требует проведения исследований по оптимизации системы электропривода на основе асинхронного двигателя с комбинированной обмоткой. **МАТЕРИАЛЫ.** Электродвигатель с комбинированной обмоткой представляет собой двигатель с улучшенными характеристиками с обмоткой статора, состоящей из комбинации двух обмоток звезды и треугольника, соединенных параллельно. Рассмотрены структура и математическая модель двигателя, которые являются основой для построения алгоритма управления двигателем. Алгоритм управления, основанный на определении оптимального значения магнитного потока в координатах оси $d - q$ для достижения малых потерь мощности при учете потерь в железном сердечнике и малых магнитных насыщений, помогает повысить эффективность управления инвертором. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Алгоритм предварительно протестирован с помощью нескольких симуляций, а затем экспериментально проверен путем применения предложенной методики управления на приводе асинхронного двигателя мощностью 1,5 кВт с управляемым полем (FOC). **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты представлены и обсуждены, демонстрируя, что предложенная методика онлайн-управления инвертором может значительно снизить потери мощности электропривода.

Ключевые слова: электропривод; комбинированная обмотка; электродвигатель; система аналитического контроля; канал измерения; канал управления; датчик, стэнд.

Для цитирования: Цветков А.Н., Доан Нгок Ши, Ярославский Д.А. Исследования по оптимизации векторного управления асинхронным двигателем с применением системы аналитического контроля // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 3. С. 144-157. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.

RESEARCH ON OPTIMIZATION OF VECTOR CONTROL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR USING THE ANALYTICAL CONTROL SYSTEM

AN. Tsvetkov, Doan Ngok Shi, D.A. Yaroslavsky

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>, tsvetkov9@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The rapid development of electric transport requires the use of an energy-efficient drive in order to increase the range of runs between battery charges. This, in turn, requires research to optimize the electric drive system based on an asynchronous motor with a combined winding. **METHODS.** A combination winding motor is a high performance motor with a stator winding consisting of a combination of two star and delta windings connected in parallel. The structure and mathematical model of the engine, which are the basis for constructing the engine control algorithm, are considered. The control algorithm based on determining the optimal value of the magnetic flux in the coordinates of the $d - q$ axis to achieve low power losses, taking into account losses in the iron core and low magnetic saturations, helps to improve the efficiency of inverter control. **RESULTS.** The algorithm is pre-tested with several simulations and then experimentally verified by applying the proposed control technique to a 1.5 kW controlled field induction motor (FOC) drive. **CONCLUSION.** The obtained results are presented and discussed, demonstrating that the proposed inverter online control technique can significantly reduce the power loss of the electric drive.

Keywords: *electric drive; combined winding; electric motor; analytical control system; measurement channel; control channel; sensor, stand.*

For citation: Tsvetkov AN, Doan Ngok Shi, Yaroslavsky DA. Research on optimization of vector control of an asynchronous motor using the analytical control system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 144-157.. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-144-157.

Введение

Асинхронный электродвигатель имеет преимущества простой конструкции, низкой стоимости, простоты эксплуатации и обслуживания, поэтому он присутствует во всех важных областях промышленного производства. Наряду с бурным развитием электронной техники управление асинхронными двигателями становится все более оптимальным и способным удовлетворить большинство технологических процессов, связанных с движением. Однако асинхронные двигатели также имеют множество ограничений, которые необходимо преодолеть, такие как малый пусковой момент, низкий КПД, особенно при работе с часто изменяющимся моментом нагрузки, что приводит к огромным потерям энергии.

Актуальность данного исследования заключается в решении вышеуказанной проблемы с целью повышения энергоэффективности трехфазных приводных систем переменного тока для промышленного применения.

С другой стороны, по разным оценкам, в настоящее время в мире потребление электроэнергии асинхронными двигателями составляет от 47 до 53% всей электроэнергии, потребляемой в промышленности. Поэтому построение системы управления, стабильно работающего и энергосберегающего асинхронного двигателя, позволит в корне решить проблему энергосбережения, которая изучается многими учеными и заинтересованными странами мира. Были предложены различные способы повышения эффективности. Один из способов — использовать материалы с лучшими электрическими и магнитными свойствами, например, заменить алюминиевые клетки медными. Также предлагается разработать систему управления, сочетающую в себе принципы частотного управления асинхронным двигателем по цепи статора и питания цепи ротора постоянным напряжением, что позволяет считать электропривод синхронным. Другая возможность повысить эффективность асинхронных двигателей состоит в ограничении содержания пространственных гармоник тока, плотности потока в зазоре и потока в проводнике. Именно поэтому рассматривается использование многофазного электродвигателя или так называемого двигателя с комбинированной обмоткой. Подробности теории и применения многофазных двигателей представлены в [1]. Очень часто многофазные двигатели нуждаются в питании от преобразователей частоты, что позволяет предлагать и реализовывать различные способы управления для достижения их требуемых характеристик [2]. При наличии подходящей формы выходного напряжения преобразователя содержание высших пространственных гармоник снижается и, таким образом, повышается КПД по сравнению с обычными трехфазными асинхронными двигателями. Одним из основных преимуществ многофазных двигателей является их более высокая устойчивость к сбоям в электроснабжении по сравнению с обычными двигателями [3]. Особым типом многофазного двигателя со многими выдающимися преимуществами является асинхронный электродвигатель с комбинированной обмоткой (ЭКО). Он состоит из шести отдельных секций обмотки, разделенных на две группы звезд и треугольников, соединенных параллельно или последовательно. Подробный теоретический анализ этого типа двигателя представлен в [4]. Анализ эффективности этих двигателей для синусоидальной формы тока выполнен в работе [5]. Первые асинхронные двигатели с совмещенными обмотками были разработаны на рубеже прошлого века. Они возвращаются благодаря своей способности улучшать распределение магнитного потока в двигателе, высокой энергоэффективности, плавному крутящему моменту, низкому уровню шума и вибрации, уменьшению колебаний питающего напряжения, уменьшению тока в фазах статора и стабильной работе. Эксперименты показали, что ЭКО во всем диапазоне нагрузок потребляет меньше энергии, чем обычные двигатели. При номинальной нагрузке ЭКО на 3,1 % эффективнее традиционных, но разница еще более заметна при работе на низких нагрузках [6]. В данной работе анализируются способы управления ЭКО на основе теории пространственного вектора и компоненты симметрии мгновенных значений питающего напряжения.

Усовершенствованная комбинация двигателя и преобразователя частоты сделает систему трехфазного асинхронного привода переменного тока еще более оптимальной для

промышленного применения. Следовательно, необходимо иметь алгоритм управления для ЭКО, чтобы преодолеть его недостатки, и более эффективно использовать работу ЭКО.

В статье основное внимание уделяется исследованию некоторых стратегий онлайн-управления, использованию сигналов обратной связи от двигателя, настройке параметров контроллера для достижения максимальной эффективности при его работе. Реализация вышеуказанного метода требует определения параметров двигателя. Эти параметры могут быть предварительно определены с помощью ряда испытаний (работа без нагрузки, опыт короткого замыкания и т. д.) и предполагаются постоянными значениями в применяемом алгоритме управления. Однако этот метод не гарантирует высокой точности определения потерь мощности из-за большой вариации этих параметров в зависимости от температуры, частоты и амплитуды тока [7]. Вместо этого параметры могут быть определены с помощью автономных поисковых таблиц, что приводит к очень сложным вычислениям. Другая возможность включает самокорректирующуюся онлайн-оценку сопротивления ротора и индуктивности намагничивания АД для более точной модели потерь. Работа в [8] изменяет параметры АД с помощью полиномиальных функций в соответствии с динамическими свойствами распознавания двигателя, такими как температура, момент нагрузки и инерция. Оценка параметров АД также может быть проведена путем воздействия на ток намагничивания из стационарной модели АД с учетом потерь, как в меди, так и в железе. Для формирования оптимального задания на потокосцепление ротора с точки зрения мощности и потерь энергии была разработана система векторного управления. В [8] динамическое программирование применялось для определения траекторий потока статора с потерями для неизвестных конфигураций нагрузки. Динамическая пространственная векторная модель для минимизации потерь мощности, обеспечивающая метод определения оптимального эталонного потока в каждом цикле дискретизации, также представлена в [9]. Предложен также метод оптимизации установившегося энергопотребления, основанный на определении характеристики насыщения намагниченной индуктивности. Этот метод работает с оптимизационным алгоритмом прямой оцифровки и основан на аппроксимации индуктивности намагничивания из ранее рассчитанных минимальных значений [10]. Как правило, параметром для минимизации потерь мощности является ток намагничивания. Однако во многих работах рассматривались другие переменные потерь, такие как магнитный поток, ток статора или предлагалось управление частотой скольжения для минимизации потерь мощности регулируемого АД, управляемого обычным полеориентированным управлением (FOC).

Приведенные выше решения по управлению называются управлением моделью потерь (*Loss Model Control - LMC*). Еще одним методом контроля снижения потерь является поисковый контроль, который широко применяется многими исследователями. Один из основных недостатков этого метода выражается в том, что он не обеспечивает чисто установившихся условий, что вызывает флуктуации потока зазора, приводящие к пульсациям крутящего момента и нестабильной скорости. Кроме того, система сходится к оптимальной точке со значительной задержкой, также обнаруживая флуктуации вокруг оптимального значения величины потока. Использование комбинации методов направлено на использование преимуществ обоих подходов, избегая при этом их основных недостатков. Комбинированное решение *LMC* и *SC* с очень быстрой сходимостью, где условие минимальных потерь мощности получается из аппроксимации функции двигателя и потерь преобразователя мощности. Исходя из приведенных выше ссылок, в этой статье предлагается модернизированная, и не слишком сложная процедура, включаемая в алгоритм работы микропроцессорного устройства, для минимизации потерь мощности с использованием магнитного потока в качестве переменной потерь и с учетом потерь в железном сердечнике, так и эффект магнитного насыщения. Также рассмотрим связанные с этим нелинейные явления при работе ЭКО, которые значительно повышают производительность электродвигателя во время работы на любых скоростях и нагрузках.

Научная новизна работы заключается в разработке нового алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов о энергетических характеристиках электроприводов на базе ЭКО. Практическая новизна результатов работы состоит в возможности практического использования разработанной системы аналитического контроля и управления и метода управления при проектировании и исследовании электроприводов на основе электродвигателей с нетрадиционной конструкцией.

Материалы и методы. *Техническая модель минимизации потерь при векторном пространственном управлении двигателями с когерентной обмоткой*

Асинхронные двигатели переменного тока с комбинированными обмотками можно рассматривать как сдвоенные трехфазные двигатели или шестифазные асинхронные двигатели с двумя наборами трехфазных обмоток, при этом, их фазы смещены в пространстве на 30 электрических градусов с нейтральными точками, изолированными и соединенными комбинация в звезду-треугольников [11]. Таким образом, можно считать, что катушка имеет увеличенное количество фазовых областей с 6 до 12. Структурная схема объединенной катушки и векторного пространства токов подробно представлена на рисунке 1.

Энергетический процесс, который происходит в асинхронном электродвигателе, изображенном на рисунке 2, включает: Потери мощности в обмотках двигателя (также известные как потери в меди), пропорциональные приложенному сопротивлению катушек и квадрату тока нагрузки. Эта потеря присутствует как в роторе, так и в статоре двигателя и нагревает обмотки на нем; Потери в стали (потеря намагничивания), не зависящие от нагрузки двигателя, а только от напряжения питания; потери на трение, зависящие от частоты вращения двигателя, но не зависящие от нагрузки; Потери из-за рассеяния потока и некоторые другие потери. Однако для построения режима управления, позволяющего минимизировать здесь потери, мы в основном учитываем потери в меди и ферромагнитные потери.

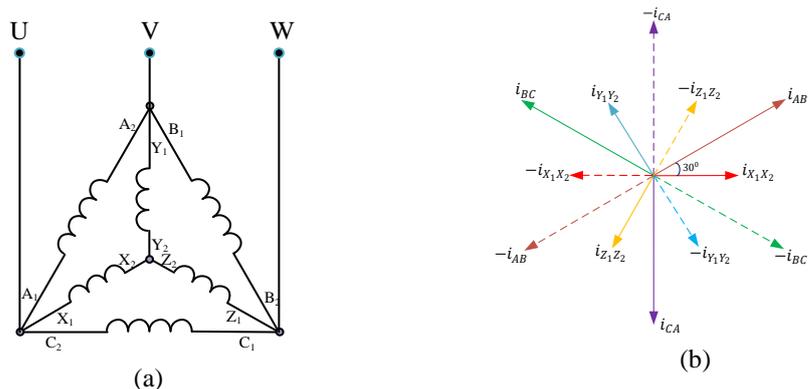


Рис. 1. Схема соединения обмоток (а) и Fig. 1. Winding connection diagram (a) and space of vector currents (b) of the ECO motor.

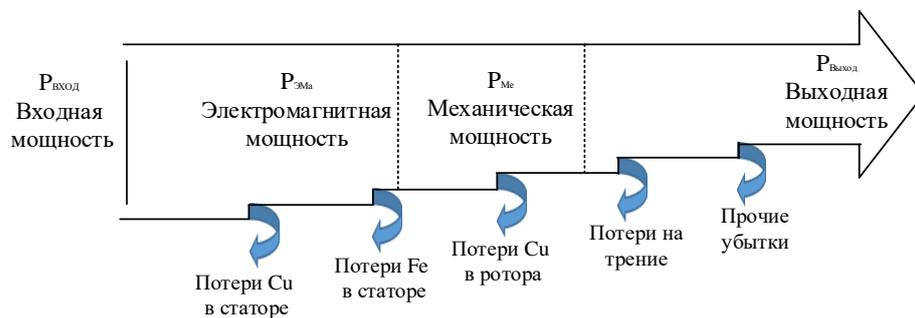


Рис. 2. Энергетический процесс на асинхронном Fig. 2. Energy process on an asynchronous electric motor

Рассматривая детали потерь асинхронного электродвигателя, мы можем разделить их на две основные стадии: переходные потери и установившиеся потери. Переходные потери подробно описаны в нескольких литературных источниках [12]. Они непродолжительны и вызывают незначительные потери в производственных процессах, которые не требуют многократных изменений скорости двигателя. В этом документе рассматривается только повышение энергоэффективности, когда двигатель находится в установившемся режиме, и игнорируются потери при работе в переходном режиме. Для того чтобы АД-управление было максимально эффективным для любой рабочей точки кривых нагрузки и скорости, оно должно быть построено на его математической модели. Обычно эта модель включает потери в меди и железе и зависит от электрических и механических параметров АД, таких как сопротивление статора и ротора, реактивное сопротивление намагничивания и эквивалентное сопротивление железного сердечника.

Поэтому точность этой методики полностью зависит от точности, с которой заранее известны параметры двигателя. Эквивалентная схема двигателя показана на рисунке 3. На рисунке $R_{Y\Delta}$ - эквивалентное сопротивление обмотки статора, R_r - сопротивление обмотки ротора, R_{Fe} - сопротивление стального сердечника, $L_{\sigma Y\Delta}$ - эквивалентная индуктивность рассеяния (рассеяния) обмоток статора, $L_{\sigma r}$ - индуктивность рассеяния ротора, L_m - взаимная индуктивность между статором и ротором.

Для решения задачи управления КПД двигателя в соответствии с изложенными выше требованиями предлагаемое решение, основанное на анализе и оценке параметров индукционного потока двигателя, размещается на оси отсчета $d-q$, а именно Ψ_{md} и Ψ_{mq} . Сначала необходимо установить условие управления направлением потока ротора.

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = \psi_{rq} = 0 \quad (1)$$

Из эквивалентной схемы, показанной на рисунке 3, мы имеем следующие выражения:

$$T_{\sigma r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + \psi_{rd} = \psi_{md} \quad (2)$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{\psi_{mq}}{T_{\sigma r} \psi_{rd}} + \omega_r \quad (3)$$

$$T_{\sigma Fe} \frac{d\psi_{md}}{dt} + \psi_{md} = L_{\sigma r} (i_{sd} - i_{md}) + \psi_{rd} + T_{\sigma Fe} \omega_s \psi_{mq} \quad (4)$$

$$T_{\sigma Fe} \frac{d\psi_{mq}}{dt} + \psi_{mq} = L_{\sigma r} (i_{sq} - i_{mq}) - T_{\sigma Fe} \omega_s \psi_{md} \quad (5)$$

где: ψ_{rd} и ψ_{rq} - компоненты потока, отнесенные к координатной оси $d-q$ ротора, ω_r и ω_s - скорость ротора и синхронная скорость соответственно, θ - магнитный угловой поток ротора, i_{sd} и i_{sq} - прямая и прямоугольная составляющие тока статора соответственно, L_m - индуктивность намагничивания, R_{Fe} - сопротивление потерь в стальном сердечнике, R_r и $L_{\sigma r}$ - сопротивление и ток ротора соответственно, индуктивность рассеяния ротора, $T_{\sigma r} = L_{\sigma r} / R_r$ и $T_{\sigma Fe} = L_{\sigma r} / R_{Fe}$ - постоянные времени ротора. Компоненты тока намагничивания в системе координат оси $d-q$, а именно i_{md} и i_{mq} , можно определить следующим образом:

$$i_{md} = i_m \frac{\psi_{md}}{\psi_m}, \quad i_{mq} = i_m \frac{\psi_{mq}}{\psi_m} \quad (6)$$

$$\text{где} \quad \psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} \quad (7)$$

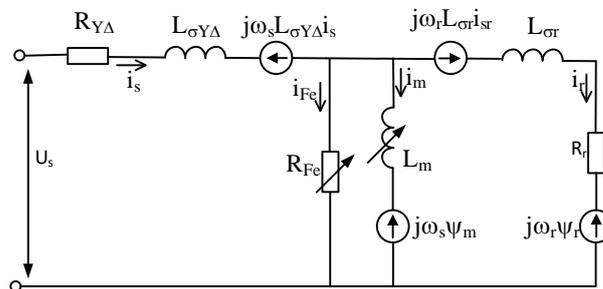


Рис. 3. Диаграмма эквивалентности двигателя Fig. 3. ECO engine equivalence diagram ЭКО

Если не учитывать насыщение магнитопровода, то ток намагничивания рассчитывается как $i_m = \psi_m / L_m$, в противном случае магнитное насыщение учитывается включением характеристики намагничивания AD $i_m = f(\psi_m)$. Из схемы, показанной на рис. 3, выражение для потерь мощности ΔP_{loss} дается как сумма потерь в меди статора, $\Delta P_{Cu, Y\Delta}$, потерь в меди ротора, $\Delta P_{Cu, r}$, и потерь в железном сердечнике, ΔP_{Fe} :

$$\Delta P_{loss} = \Delta P_{Cu, Y\Delta} + \Delta P_{Cu, r} + \Delta P_{Fe} \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta P_{Cu,Y\Delta} = \frac{3}{2} R_{Y\Delta} (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) = \frac{3}{2} R_{Y\Delta} \left[\left(\frac{1}{L_m^2} + \frac{\omega_s^2}{R_{Fe}^2} \right) \psi_{md}^2 + \left(\frac{1}{L_m^2} + \frac{1}{L_{\sigma r}^2} + \frac{2}{L_m L_{\sigma r}} + \frac{\omega_s^2}{R_{Fe}^2} \right) \psi_{mq}^2 + \frac{2\omega_s}{R_{Fe} L_m} \psi_{md} \psi_{mq} \right] \quad (9)$$

$$\Delta P_{Cu,r} = \frac{3}{2} \frac{R_r}{L_{\sigma r}^2} \psi_{mq}^2 \quad (10)$$

$$\Delta P_{Fe} = \frac{3}{2} \frac{\omega_s^2}{R_{Fe}} (\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2) \quad (11)$$

где R_s - среднее сопротивление статора.

Что касается ΔP_{loss} , то электромагнитный момент $M_{\Delta M}$ можно выразить как функцию компонент потока (p - число пар полюсов):

$$M_{\Delta M} = \frac{3}{2} p \frac{1}{L_{\sigma r}} \psi_{rd} \psi_{mq} = K_M \psi_{rd} \psi_{mq} \quad (12)$$

При $K_M = 3p/(2L_{\sigma r})$ в качестве константы крутящего момента определяется выражение потерь мощности для модели потерь:

$$\Delta_{loss} = \frac{3}{2} \left(A \psi_{md}^2 + B \frac{M_{\Delta M}^2}{K_M^2 \psi_{md}^2} + \frac{2R_s \omega_s}{R_{Fe} L_m} \frac{M_{\Delta M}}{K_M} \right) \quad (13)$$

$$A = \frac{R_s}{L_m^2} + \frac{\omega_s^2}{R_{Fe}} \left(1 + \frac{R_s}{R_{Fe}} \right) \quad (14)$$

$$B = R_s \left(\frac{1}{L_m^2} + \frac{2}{L_m L_{\sigma r}} \right) + (R_s + R_r) \frac{1}{L_{\sigma r}^2} + \frac{\omega_s^2}{R_{Fe}} \left(1 + \frac{R_s}{R_{Fe}} \right) \quad (15)$$

Для нахождения оптимального значения ψ_{md} , при котором величина потерь мощности минимальна, называемого ψ_{md}^{opt} , получают путем вывода выражения (13) относительно ψ_{md} , (достигается минимизация потерь. вычисляется в заданной рабочей точке с моментом $M_{\Delta M} = \text{константа}$):

$$\frac{\partial \Delta P_{loss}}{\partial \psi_{md}} \Big|_{M_{\Delta M} = \text{const}} \Rightarrow \psi_{md}^{opt} = \sqrt{\frac{A}{B}} |\psi_{mq}| \quad (16)$$

Из (12) и (16) оптимальную составляющую потока по оси d можно переписать как:

$$\psi_{md}^{opt} = \sqrt{\frac{B}{A}} \frac{M_{\Delta M}}{K_M \psi_{mq}^{opt}} \quad (17)$$

Из (17) имеем

$$\psi_{md}^{opt} = \sqrt[4]{\frac{B}{A}} \sqrt[4]{\frac{M_{\Delta M}}{K_M}} = \sqrt[4]{\frac{B}{A} \left(\frac{M_{\Delta M}}{K_M} \right)^2} \quad (18)$$

Таким образом, оптимальный поток по оси d зависит от синхронной скорости ω_s , параметров АД ($R_s, R_r, R_{Fe}, L_{\sigma r}, L_m, p$) и электромагнитного момента $M_{\Delta M}$.

Из формулы (18) мы определили оптимальный магнитный поток, но здесь должны решать и квадратный корень, и 4 корень одновременно. Для микроконтроллеров эти функции требуют сложных вычислений с большим временем вычислений, что может привести к тому, что время выполнения алгоритма превысит интервал SVPWM. Поэтому альтернативный метод, с помощью которого вместо вычисления ψ_{md}^{opt} мы находим его в стационарном состоянии, подробно описан ниже. Он состоит из простой итерационной процедуры с алгоритмом, показанным на рисунке 4. Более подробно, алгоритм работает с критериями поиска биссектрисы для обнаружения значения ψ_{md} , соответствующего уровню потерь минимальной мощности потерь $\Delta P(\psi_{md})$.

Первый шаг определяет диапазон интервала поиска между минимальным и максимальным значениями ψ_{md} , т.е. $\psi_{md \min}$ и $\psi_{md \max}$ соответственно, и шаг поиска d . После расчета среднего $x = (\psi_{md \max} + \psi_{md \min})/2$ применяются следующие условия:

$$\begin{cases} \psi_{md \max} = x + \frac{d}{2} & \text{если } \Delta P\left(x - \frac{d}{2}\right) < \Delta P\left(x + \frac{d}{2}\right) \\ \psi_{md \max} = x - \frac{d}{2} & \text{если } \Delta P\left(x - \frac{d}{2}\right) > \Delta P\left(x + \frac{d}{2}\right) \end{cases} \quad (19)$$

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнено следующее условие:

$$\Delta \psi_{md} = |\psi_{md \max} - \psi_{md \min}| < 2d \quad (20)$$

Детали работы алгоритма изображены на блок-схеме на рисунке 4.

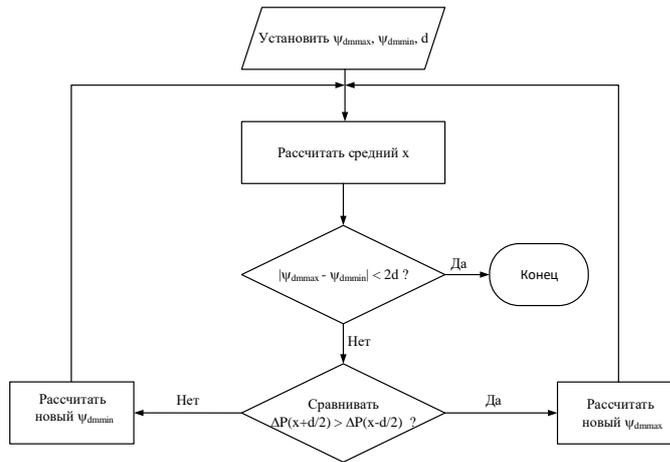


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска минимального значения потерянной мощности *Fig. 4. Block diagram of the search algorithm for the minimum value of the lost power*

Чтобы сделать процесс более эффективным, нам нужно установить максимальное количество повторений. В этом случае для быстрой сходимости алгоритма начальный диапазон поиска задается в интервале $\Delta\psi_{md} = [0,2 -1,2]$ kWb и каждый шаг поиска имеет $d = 1/2^8 = 1/256 \approx 3,9 \cdot 10^{-3}$ Wb. Результаты реализации алгоритма представлены на рис. 5, где потери мощности рассчитаны по формулам от (8) до (11) с параметрами АД, как показано в таблице 1, при номинальном крутящем моменте и номинальной скорости; синяя кривая рассчитывается программой *Matlab*, а красная кривая создается микроконтроллером Atmega 2560 (интервал потока поиска $\Delta\psi_{md}$ здесь разделен примерно на 18176 подинтервалов). Время выполнения этой процедуры (8 итераций) составляет около 34 мкс, всего алгоритма FOC - около 64 мкс, а продолжительность каждого цикла ШИМ — около 97 мкс. На рисунке 5 показан тестовый график в течение периода ШИМ с выделением 8 интервалов повторения для процесса минимизации, а также времени для считывания и фильтрации скорости, расчета тока i_{sq}^* и выполнения уравнений FOC и SVPWM (см. рис. 6). Следует отметить, что эта процедура приведения рассчитывается на период ШИМ, где все электрические величины и параметры электропривода АД принимаются постоянными значениями при модуляции пространственный вектор (SVPWM), система дискретного времени, работающая на ШИМ частота 20 кГц [13]. Таким образом, (8) - (19) имеют постоянные параметры для периода ШИМ, гарантируя возможность обнаружения даже небольшого изменения ΔP .

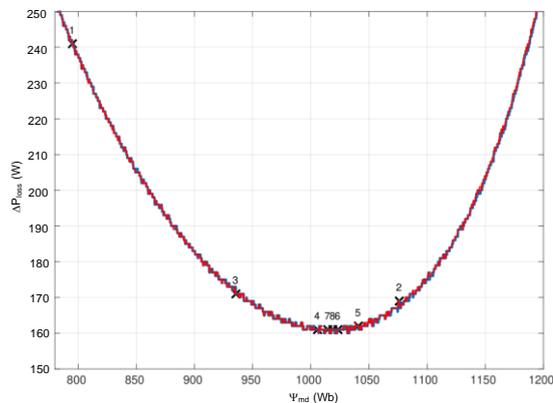


Рис. 5. Расчетные потери мощности АД и процесс итерации *Fig. 5. Calculated IM power losses and iteration process*

Для более точной работы модели, следует учитывать изменение реактивного сопротивления намагничивания с насыщением, в то же время это явление не сильно влияет на сопротивление рассеяния [14]. Поэтому насыщение сердечника учитывается путем рассмотрения кривой намагничивания $i_m = f(\psi_m)$, изображенной на рисунке 6, которая была получена экспериментально при работе на холостом ходу при синхронной скорости.

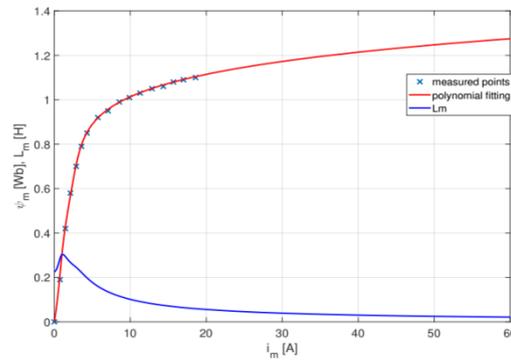


Рис. 6. Кривая намагничивания и тренд индуктивности намагничивания L_m

Fig. 6. Magnetizing curve and trend of magnetizing inductance L_m

Кроме того, чтобы иметь возможность реализовать выражения (16) или (18), нелинейное поведение АД удобно учитывать, вводя индуктивность намагничивания, также показанную на рисунке 6.

$$L_m = \frac{\Psi_m}{i_m} \tag{21}$$

Наконец, изменение сопротивления затухания сердечника R_{Fe} рассматривается как функция частоты f и определяется следующим уравнением:

$$R_{Fe}(f) = k_0 + k_1 |f| + k_2 f^2 \tag{22}$$

где k_0 , k_1 и k_2 зависят от конкретного типа АД и должны быть определены экспериментально. Для АД в этой модели экспериментальные результаты дают значения $k_0 = 1$, $k_1 = 2,45$ и $k_2 = 0,141$.

Моделирование и проведение эксперимента

Модель привода ЭКО моделируется в среде *Simulink*, которая сочетает в себе управление FOC и LMT. Как показано на блок-схеме на рисунке 7, в верхнем канале управления измеряются фазы тока статора, затем он преобразуется в пространственно-векторную систему координат А, В, С. Преобразуется ток в системе координат А, В, С. к системе координат α - β , а затем далее преобразуется в систему координат вращения d-q по системе отсчета оси вращения ротора, мы можем определить значения линии i_d и i_q во времени. Интегрируя скорость, измеренную тахометром, можно определить положение ротора, и в то же время выходная скорость ЭКО сравнивается с эталонной скоростью Ref , а затем обнаруживается ошибка, которая обрабатывается ПИИ-регулятором для обеспечения опорный ток по оси q (i_{sq}^*), который сравнивается с током isq двигателя. С другой стороны, вектор потока ротора оценивается путем умножения вектора тока статора на магнитную индукцию L_m и результата фильтра нижних частот на постоянную времени L_r/R_r при отсутствии нагрузки на роторе (отношение индуктивности ротора к сопротивлению ротора). Вектор тока преобразуется в систему координат d-q. Действительная ось d вектора тока статора используется для управления потоком ротора, а мнимая ось q используется для управления крутящим моментом. Между тем, ПИИ-регуляторы используются для управления вышеуказанными токами. ПИИ-регулятор обеспечивает компоненты напряжения в координатах d-q. К выходу контроллера добавлен коммутатор для повышения производительности, чтобы уменьшить перекрытие открывания ключей инвертора, внезапные изменения скорости, тока и потока. ПИИ-регулятору требуется фильтр нижних частот на входе или выходе для устранения пульсаций тока при переключении транзисторов из-за чрезмерного усиления и нестабильности драйвера. Компоненты напряжения преобразуются из системы координат d-q в систему координат α - β . Компоненты напряжения преобразуются из системы координат α - β в широтно-импульсный модулятор ШИМ, используемый для передачи сигналов инвертору. Второй канал управления характеризуется блоком минимизации потерь мощности, обеспечивающим оптимальный уровень намагниченности для минимизации потерь, md_{opt} , введенный реализациями (12) и (16). Ошибка возникает из-за дальнейшего сравнения опорного тока по оси d, i_{sd}^* , и тока ЭКО, а именно i_{sd} , который определяет опорное напряжение по оси d, v_{sd}^* . Работа смоделированного диска была протестирована при различных эталонных скоростях и условиях нагрузки. Более конкретно, ω_{ref} изменялся от 50 рад/с до 300 рад/с с шагом 50 рад/с, и для каждого режима скорости крутящий момент нагрузки менялся от 0 Нм до 18 Нм с каждым шагом 1 Нм. Для каждой комбинации оценивается тренд потерь мощности при

оптимальном ΔP_{LMT} и сравнивается с потерями P_{FOC} , рассчитанными с использованием традиционной стратегии FOC (без оптимального применения), работающей в узкой полосе пропускания, ее номинальное количество.

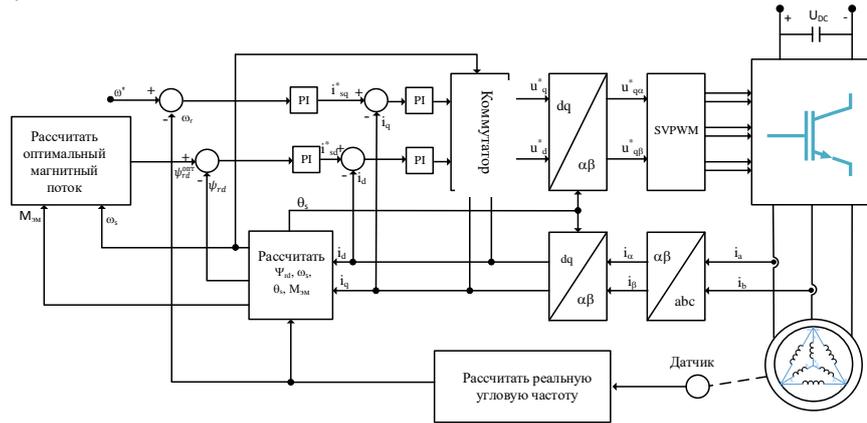


Рис. 7. Блок-схема контроллера с оптимальной производительностью для ЭКО как в Simulink, так и в микроконтроллерах

Fig. 7. Controller block diagram with optimal performance for IVF in both Simulink and microcontrollers

На рисунках 8а и 8б показано сравнение между ΔP_{FOC} (синяя линия) и ΔP_{LMT} (зеленая линия) для ω_{ref} равен 100 рад/с и 300 рад/с соответственно. Из этих результатов моделирования становится ясно, что предлагаемое применение алгоритм снижения потерь более эффективно для низких или средних нагрузок. Этот аспект можно заметить по разнице потерь мощности, а именно $\Delta\Delta P$ (красная линия), между ΔP_{FOC} и ΔP_{LMT} .

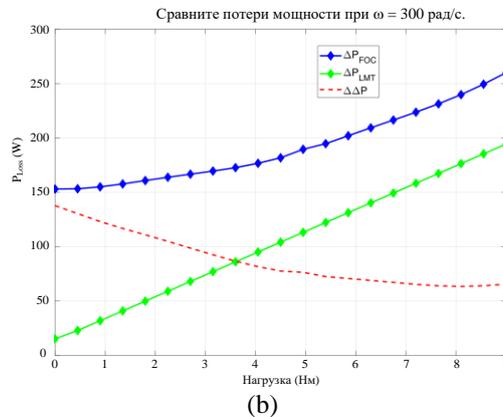
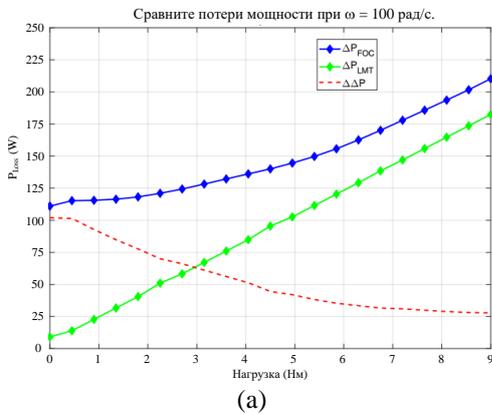


Рис. 8. Сравнение потерь мощности LMT и традиционного FOC (а) $\omega = 100$ [рад/с] и (б) $\omega = 300$ [рад/с]

Fig. 8. Comparison of LMT power loss and traditional FOC (a) $\omega = 100$ [rad/s] and (b) $\omega = 300$ [rad/s]

Другие результаты показаны на рисунке 8, где показано сравнение трендов во времени ΔP_{FOC} (синяя линия) и ΔP_{LMT} (красная линия) при разгоне от 0 до 200 рад/с на холостом ходу и с номинальной нагрузкой подается через 5 с. Видно, что как для холостого хода, так и для номинальной нагрузки минимизатор потерь мощности значительно снижает потери мощности в машине.

Для подтверждения результатов исследований в лаборатории кафедры Электроснабжения промышленных предприятий Казанского государственного энергетического университета был установлен испытательный стенд, имеющий в своей основе систему аналитического контроля энергетических характеристик электродвигателей [14]. Модель системы исследований энергетических характеристик электродвигателей для двигателя ЭКО построена, как показано на рисунке 10. Где М1 – нагрузочный электродвигатель, М2 – исследуемый электродвигатель, ПЧ-1 – нагрузочный преобразователь частоты, ПЧ-2 – исследовательский преобразователь частоты, ИК – измерительный комплекс, ПК – персональный компьютер, ПИ – преобразователь интерфейсов, ДТ – датчики тока, ДН – датчики напряжения, ДП – датчик положения вала

двигателя, RS-485 – цифровая шина передачи данных и удаленного управления АПК, МС – модуль удаленной связи.

МС представляет собой два варианта исполнения: первый на основе GPRS связи, второй вариант – микроконтроллерное устройство с радиопередатчиком, работающим по стандарту IEEE 802.15.4 на программном обеспечении собственного производства [15]. В зависимости от прикладных задач, модуль связи может использоваться отдельно как радиопередающее устройство, так и с шлюзованием данных на нужный протокол (USB, RS-485, PLC и т.д.) [16-18].

Аналогичные МС установлены в системе автоматизированного мониторинга ВЛЭП [19], что позволяет им создавать самоорганизующуюся сеть на основе протокола организации канала связи для беспроводных сенсорных сетей и передавать данные на дальние расстояния до диспетчерского пункта.

Нагрузкой является АД М1 мощностью 0,75 кВт, управляемой коммерчески доступным инвертором Altivar ПЧ-1 со скалярным методом управления, реализованным без обратной связи. При этом создаваемый момент нагрузки противоположен направлению вращения исследуемого электродвигателя М2. Момент нагрузки регулируется изменением установленной частоты магнитного поля двигателя нагрузки М1. Для управления исследуемым ЭКО использовался разработанный преобразователь частоты ПЧ-2 с возможностью настройки алгоритмов управления и математической модели управляемого двигателя, как описано выше. Инвертор состоит из микропроцессорного устройства на базе микроконтроллера ATmega2560, измерительных устройств, силового ключа с системой управления и блока питания. Измерительный комплекс ИК используется для определения энергетических характеристик электропривода ПЧ2-М2 в различных режимах работы и позволяет определять ток, напряжение, мощность, коэффициент мощности, составляющие гармоники и другие параметры. Была развернута комбинация измерений на основе анализатора качества электроэнергии Fluke 43V и цифрового осциллографа ISD205B. Для каждого рабочего режима входная и выходная мощность измерялись с использованием стратегий LMT и FOC.

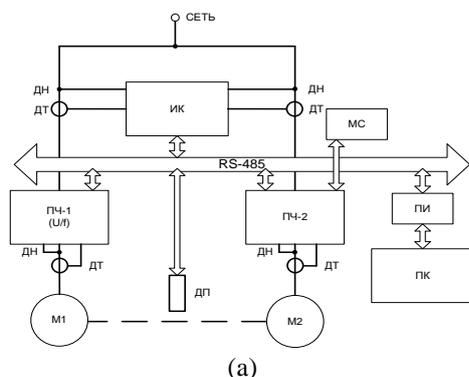


Рис. 9. Функциональная схема системы аналитического контроля энергетических характеристик электродвигателей(а) и реальная модель (b)

Рис. 9. Функциональная схема системы аналитического контроля энергетических характеристик электродвигателей(а) и реальная модель (b)

Основные результаты

На рисунке 10 показано сравнение динамических характеристик угловой скорости ЭКО, полученных с помощью предлагаемой процедуры сглаживания (красная линия) и с традиционным FOC (синяя линия) при изменении нагрузки в соответствии с шагами, от состояния холостого хода до номинальной нагрузки ЭКО. Можно заметить, что реализация минимизатора потерь мощности существенно не влияет на динамические характеристики инвертора, за исключением ошибки скорости, которая кажется более очевидной. Это связано с меньшей динамикой составляющей потока ротора.

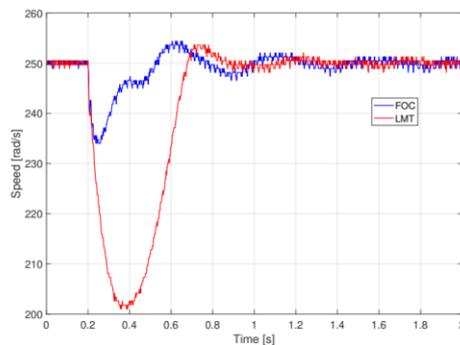


Рис. 10. Сравнение динамических свойств угловой скорости ЭКО *Fig. 10. Comparison of the dynamic properties of the ECO angular velocity*

Наконец, динамическое поведение контура управления потоком ротора в режиме *LMT* показано на рисунке 11, при резком изменении скорости от 100 до 150 рад/с в момент времени $t = 2$ с, при котором оптимальный поток ротора (синяя линия) сравнивается с потоком обратной связи ротора (цветная линия (красный)). При этом слежение за потоком ротора обеспечивается с явной задержкой, зависящей от эквивалентных постоянных времени контуров стратифицированного канала *id* и от постоянной времени ротора.

В результате проведения процесса компьютерного моделирования системы управления трехфазным инвертором, было разработано и реализовано программное обеспечение для микроконтроллерных систем на базе процессоров *Atmega*. По результатам реализации алгоритмов проведены исследования на построенном аппаратно-программном комплексе и получены результаты, подтверждающие правильность реализации. Простая и гибкая реализация системы управления благодаря микроконтроллеру *Atmega 2560*, который представляет собой хороший баланс между техническими и экономическими характеристиками.

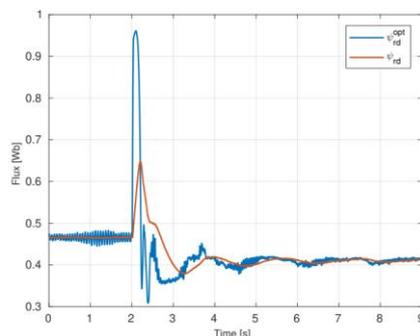


Рис. 11. Динамический отклик контура управления потоком ротора в режиме *LMT* *Fig. 11. Dynamic response of the rotor flux control loop in LMT mode*

Выводы

Проведенные работы по корректировке математической модели управления на первом этапе исследования позволили увеличить крутящий момент двигателя и приблизить его к традиционному асинхронному электродвигателю. На втором этапе исследования была осуществлена попытка увеличения крутящего момента и приблизить его к моменту, развиваемому ЭКО при прямом включении в сеть [14]. Эта статья является продолжением исследования по разработке несложного и недорогого алгоритма для минимизации потерь мощности на представленном ЭКО 1,5 кВт. Результаты исследования наглядно показывают, что эффект достигается при любых условиях нагрузки и скорости за счет полной установки в режиме реального времени оптимального значения приведенной составляющей прямого осевого потока, что позволяет снизить потери мощности при работе двигателя. Полученные результаты говорят о правильности принятых решений в ходе модернизации алгоритмов управления, заложенных в микропроцессорную систему управления инвертором с минимизацией введения дополнительных расчетов, что благоприятно сказывается на производительности системы вычислений.

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

Литература

1. Y. Le Ai, M. J. Kamper, A. D. Le Roux. Novel direct flux and direct torque control of six-phase induction machine with nearly square air-gap flux density // IEEE Trans. Ind. Appl. 2007. V. 43, N. 6. pp. 1534–1543. doi: 10.1109/TIA.2007.908157.
2. E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, S. Williamson. Multiphase induction motor drives - A technology status review // IET Electric Power Applications. 2007. V. 1. N. 4. pp. 489–516. doi: 10.1049/iet-epa:20060342.
3. D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani, L. Zarri. Optimal fault-tolerant control strategy for multi-phase motor drives under an open circuit phase fault condition // Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08. 2008. pp. 1–6. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800094.
4. M. C. Ludek Schreier, Jiri Bendl. Analysis of Properties of Induction Machine With Combined Parallel Star-Delta Stator Winding // 2017. V. 2. N. 1, pp. 147–153, 2017.
5. H. Kasten, W. Hofmann. Combined stator windings in electric machines with same coils // Proc. - 2012 20th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2012. pp. 103–108. doi: 10.1109/ICELMach.2012.6349848.
6. Мартынов К.В., Пантелеева Л.А., Васильев Д.А., Исследование распределения токов по фазам в асинхронном электродвигателе с совмещённой обмоткой // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ, р. Т. 23. № 5. С. 150-159, 2021.
7. T. Stefanski, S. Karys. Loss minimisation control of induction motor drive for electrical vehicle // IEEE Int. Symp. Ind. Electron. 1996. V. 2. pp. 952–957. doi: 10.1109/isie.1996.551072.
8. Jean-Franc Stumper, Ralph Kennel. Real-time dynamic efficiency optimization for induction machines // American Control Conference (ACC). 2013. pp. 6589–6594.
9. Z. Qu, M. Ranta, M. Hinkkanen, J. Luomi. Loss-minimizing flux level control of induction motor drives // IEEE Trans. Ind. Appl. 2012. V. 48. N. 3. pp. 952–961. doi: 10.1109/TIA.2012.2190818.
10. Борисевич А. В., Минимизация энергопотребления асинхронного электродвигателя с векторным управлением на основе идентификации модели потерь // Современные научные исследования и инновации., р. № 3, 2014.
11. M. Chomat, L. Schreier, J. Bendl. Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration // Proc. - 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018. 2018. pp. 2478–2482. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506798.
12. S. J. Plathottam, H. Salehfar. Transient loss minimization in induction machine drives using optimal control theory // in Proceedings - 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2015. 2016. pp. 1774–1780. doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409304.
13. N. S. Doan, A. N. Tsvetkov, T. H. Nguyen, Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an arduino // E3S Web Conf. 2021. V. 288, p. 01059. doi: 10.1051/e3sconf/202128801059.
14. Доан Нгок Ши, Цветков А.Н., Аппаратно-программный комплекс для экспериментального исследования электроприводов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с традиционной обмоткой и двигателей с комбинированной обмоткой // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, р. Т. 23. № 6. С. 157-165, 2021.
15. Yaroslavsky D.A., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Goryachev M.P., Savelyev O.G., Misbakhov R.S. Real-Time Operating Systems for Wireless Modules // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. V. 11, N 6. pp. 1168-1171.
16. Ivanov D.A., Golenishchev-Kutuzov A.V., Yaroslavsky D.A., Sadykov M.F. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. V. 13, N 6. pp. 2358-2362.
17. Ivanov D., Sadykov M., Golenishchev-Kutuzov A., Yaroslavsky D., Galieva T., Arslanov A. (2020). The application of the technology of sensor networks for the intellectualization of the overhead power transmission lines // Paper presented at the E3S Web of Conferences. 2020. doi:10.1051/e3sconf/202022001071.
18. Ярославский Д.А., Садыков М.Ф., Иванов Д.А., и др. Методика контроля ГИО на воздушных линиях электропередачи с учетом разрегулировки с использованием

датчиков беспроводных каналов связи // Журнал технических и прикладных наук АИПС. 2017. Т. 12. -№ 22. С. 6479-6482.

19. Садыков М.Ф., Ярославский Д.А., Иванов Д.А., Горячев М.П., Савельев О.Г., Чугунов Ю.С., Торопчин Ю.В. Внедрение системы автоматизированного мониторинга гололедообразования в распределительных сетях ПАО «ТАТНЕФТЬ». // Нефтяное хозяйство. 2020. № 7. С. 53-55.

Авторы публикации

Цветков Алексей Николаевич – канд.техн.наук., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Доан Нгок Ши – аспирант, Казанского государственного энергетического университета.

Ярославский Данил Александрович – канд.техн.наук., доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Y. Le Ai, M. J. Kamper, A. D. Le Roux. *Novel direct flux and direct torque control of six-phase induction machine with nearly square air-gap flux density*. IEEE Trans. Ind. Appl. 2007; 43(6): 1534–1543. doi: 10.1109/TIA.2007.908157.
2. E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, S. Williamson. *Multiphase induction motor drives. A technology status review*. IET Electric Power Applications. 2007. 1(4): 489–516. doi: 10.1049/iet-epa:20060342.
3. D. Casadei, M. Mengoni, G. Serra, A. Tani, L. Zarri. *Optimal fault-tolerant control strategy for multi-phase motor drives under an open circuit phase fault condition*. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM'08. 2008: 1–6. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800094.
4. M. C. Ludek Schreier, Jiri Bendl. *Analysis of Properties of Induction Machine With Combined Parallel Star-Delta Stator Winding*. 2017 1(1): pp. 147–153.
5. H. Kasten, W. Hofmann. *Combined stator windings in electric machines with same coils*. Proc. 2012 20th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2012. 2012:103–108. doi: 10.1109/ICEIMach.2012.6349848.
6. K.V. Martynov, L.A. Panteleeva, D.A. Vasiliev. *Study of the phase distribution of currents in an asynchronous electric motor with a combined winding*. ENERGY PROBLEMS. 2021. V. 23(5): 150-159.
7. T. Stefanski, S. Karys. *Loss minimisation control of induction motor drive for electrical vehicle*. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. 1996. 2: 952–957. doi: 10.1109/isie.1996.551072.
8. Jean-Franc Stumper, Ralph Kennel. *Real-time dynamic efficiency optimization for induction machines*. American Control Conference (ACC). 2013: 6589–6594.
9. Z. Qu, M. Ranta, M. Hinkkanen, J. Luomi. *Loss-minimizing flux level control of induction motor drives*. IEEE Trans. Ind. Appl. 2012. 48(3): 952–961. doi: 10.1109/TIA.2012.2190818.
10. A. V. Borisevich. *Minimization of energy consumption of an asynchronous electric motor with vector control based on the identification of a loss model*. Modern scientific research and innovation. 2014. 3.
11. M. Chomat, L. Schreier, J. Bendl. *Induction Machine with Combined Star-Delta Stator Winding in Parallel Configuration*. Proc. 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018, 2018: 2478–2482. doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506798.
12. S. J. Plathottam, H. Salehfar. *Transient loss minimization in induction machine drives using optimal control theory*. in Proceedings 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2015. 2016: 1774–1780. doi: 10.1109/IEMDC.2015.7409304.
13. N. S. Doan, A. N. Tsvetkov, T. H. Nguyen. *Study and implementation of space vector pulse width modulation inverter on an arduino*. E3S Web Conf. 2021. 288: 01059. doi: 10.1051/e3sconf/202128801059.
14. Doan Ngok Shi, A.N. Tsvetkov. *Hardware-software complex for experimental research of electric drives of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor with traditional winding and motors with combined winding*. Energy Issues. 2021 23(6): 157-165.
15. D.A. Yaroslavsky, D.A. Ivanov, M.F. Sadykov, M.P. Goryachev, O.G. Savelyev, R.S. Misbakhov. *Real-Time Operating Systems for Wireless Modules*. Journal of Engineering and

Applied Sciences. 2016. 11(6): 1168-1171.

16.D.A. Ivanov, A.V. Golenishchev-Kutuzov, D.A. Yaroslavsky, M.F. Sadykov. Portable complex for remote control of high-voltage insulators using wireless data collection and transmission module. *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. 13(6): 2358-2362.

17.D. Ivanov, M. Sadykov, A. Golenishchev-Kutuzov, D. Yaroslavsky, T. Galieva, A. Arslanov (2020). *The application of the technology of sensor networks for the intellectualization of the overhead power transmission lines*. Paper presented at the E3S Web of Conferences. 2020. doi:10.1051/e3sconf/202022001071.

18. D.A. Yaroslavsky, M.F. Sadykov, D.A. Ivanov, et al. Technique for monitoring GMOs on overhead power lines, taking into account misalignment using sensors of wireless communication channels. *Journal of Technical and Applied Sciences AIPS*. 2017. 12(22):. 6479-6482.

19. M.F. Sadykov, D.A. Yaroslavsky, D.A. Ivanov, M.P. Goryachev, O.G. Savelyev, Yu.S. Chugunov, Yu.V Toropchin. Implementation of an automated monitoring system for icing in the distribution networks of PJSC TATNEFT. *Oil industry*. 2020. 7: 53-55.

Authors of the publication

Alexey N. Tsvetkov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Doan Ngok Shi - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Danil A. Yaroslavsky- Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 25.03.2022г.

Отредактировано 30.03.2022г.

Принято 02.04.2022г.

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 681.61

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Малёв¹ Н.А., Погодицкий¹ О.В., Козелков¹ О.В., Дюрягин² А.М.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²КАЗ им. С.П Горбунова – филиал ПАО "Туполев", г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* В настоящее время вентильные двигатели – электрические машины с постоянными магнитами на роторе и датчиком положения ротора, управляемые синусоидальным напряжением от преобразователей частоты, – находят широкое применение в мехатронных и робототехнических системах. Алгоритм управления формируется на основе информации о текущих значениях параметров вентильного двигателя мехатронной системы с применением номинальной или эталонной математической модели, представляющей собой, как правило, идеализированное представление реального устройства. Нестационарность параметров объекта исследования, а также возможная неопределенность его математического описания вследствие упрощения математической модели приводят к нежелательным либо недопустимым результатам при формировании алгоритма управления мехатронной системы. Возникает задача анализа динамических характеристик вентильного двигателя в условиях параметрической неопределенности с целью определения наиболее влияющих на функционирование мехатронной системы параметров и чувствительных к этим изменениям фазовых координат. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи применяются методы теории чувствительности с получением соответствующих векторно-матричных уравнений, решение которых осуществляется средствами программной среды MatLab. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В работе получены уравнения чувствительности по активному сопротивлению и проекциям индуктивности обмотки статора на продольную и поперечную координатные оси, а также по моменту инерции вентильного двигателя. Сформирована векторно-матричная структурная схема вычисления функций чувствительности вентильного двигателя, характерной особенностью которой является наличие ненулевой матрицы свободных членов, приведенной ко входу модели чувствительности. Произведено построение соответствующих Simulink-моделей для исследования влияния перечисленных квазистационарных параметров на скорость вращения и момент на валу объекта исследования. Проведен анализ статистических характеристик дополнительного движения указанных фазовых координат вентильного двигателя и получены графические зависимости и установившиеся значения дисперсий и относительных оценок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Анализ динамических характеристик вентильного двигателя в условиях параметрической неопределенности позволил определить, что скорость вращения машины является наиболее чувствительной к параметрическим возмущениям выходной координатой, которая, соответственно, является наиболее информативной и представляет максимальный интерес при формировании алгоритма оптимизации мехатронной системы. Определяющую роль в формировании дополнительного движения выходных координат вентильного двигателя вносит изменение проекции индуктивности статора на поперечную координатную ось, на порядок превышающее вклад в дополнительное движение координат от остальных нестабильных параметров. Полученные в процессе исследования результаты целесообразно использовать при построении алгоритма оптимального управления мехатронной системой в условиях параметрической неопределенности.

Ключевые слова: анализ характеристик; компьютерное моделирование; вентильный двигатель; мехатронная система; модель чувствительности; дополнительное движение.

Для цитирования: Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Козелков О.В., Дюрягин А.М. Анализ динамических характеристик вентильного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределённости методами компьютерного моделирования // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 158-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174.

ANALYSIS DYNAMIC CHARACTERISTICS BRUSHLESS MOTOR OF THE MECHATRONIC SYSTEM IN CONDITIONS OF PARAMETRIC UNCERTAINTY BY COMPUTER SIMULATION METHODS

NA. Malev¹, OV. Pogoditsky¹, OV. Kozelkov¹, AM. Dyuryagin²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²KAP name for S.P. Gorbunov – branch of PJSC "Tupolev", Kazan, Russia
maleev@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Currently, brushless motors – electric machines with permanent magnets on the rotor and a rotor position sensor controlled by a sinusoidal voltage from frequency converters, are widely used in mechatronic and robotic systems. The control algorithm is formed on the basis of information about the current values of the parameters brushless motor mechatronic system using a nominal or reference mathematical model, which is, as a rule, an idealized representation of a real device. The non-stationarity of the parameters object of study, as well as the possible uncertainty of its mathematical description due to the simplification of the mathematical model, lead to undesirable or unacceptable results when forming the control algorithm of the mechatronic system. The problem arises of analyzing the dynamic characteristics of a brushless motor under conditions of parametric uncertainty in order to determine the parameters that most affect the functioning of the mechatronic system and the phase coordinates that are sensitive to these changes. *METHODS.* When solving the problem, methods of the sensitivity theory are used to obtain the corresponding vector-matrix equations, the solution of which is carried out by means of the MatLab software environment. *RESULTS.* In this paper, sensitivity equations are obtained for the active resistance and projections of the stator winding inductance on the longitudinal and transverse coordinate axes, as well as for the moment of inertia of the brushless motor. A vector-matrix block diagram for calculating the sensitivity functions of a brushless motor is formed, the characteristic feature of which is the presence of a non-zero matrix of free terms, reduced to the input of the sensitivity model. The corresponding Simulink models were built to study the influence of the listed quasi-stationary parameters on the rotation speed and torque on the shaft of the object of study. An analysis of the statistical characteristics additional motion of the specified phase coordinates of the brushless motor has been carried out, and graphical dependencies and steady-state values of dispersions and relative estimates have been obtained. *CONCLUSION.* An analysis of the dynamic characteristics of a brushless motor under conditions of parametric uncertainty made it possible to determine that the rotation speed of the machine is the most sensitive to parametric disturbances. This coordinate is the most informative and is of maximum interest in the formation of an optimization algorithm for a mechatronic system. The decisive role in the formation of the additional movement of the output coordinates of the brushless motor is made by a change in the projection of the stator inductance on the transverse coordinate axis, which is an order of magnitude greater than the contribution to the additional movement of coordinates from other unstable parameters. It is expedient to use the results obtained in the course of the study when constructing an optimal control algorithm for a mechatronic system under conditions of parametric uncertainty.

Keywords: characteristics analysis; computer simulation; brushless motor; mechatronic system; sensitivity model; additional motion.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Kozelkov OV, Dyuryagin AM. Analysis dynamic characteristics brushless motor of the mechatronic system in conditions of parametric uncertainty by computer simulation methods. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(3): 158-174. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-158-174.

Введение

В настоящее время вентильные двигатели (ВД) активно внедряются в состав систем управления, выполняя роль приводных исполнительных устройств в робототехнических и электротяговых системах, тяжелой и лёгкой промышленности, а также являются основными

элементами мехатронных систем, обеспечивающими автоматизацию производственных и технологических процессов. Вентильный двигатель как мехатронный модуль представляет собой электрическую машину с постоянными магнитами на роторе, датчиком положения ротора и полупроводниковым коммутатором статорных обмоток, переключение которых зависит от угла поворота ротора. К вентильным машинам традиционно относят два вида двигателей – бесколлекторные двигатели постоянного тока (БДПТ) или *Brushless DC Motor (BDCM)* и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) или *Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)* [1, 2]. В первом случае противо-ЭДС машины имеет трапецеидальную форму и формируется благодаря соответствующему взаимному расположению постоянных магнитов ротора и обмоток статора. Во втором случае ЭДС вращения имеет синусоидальную форму.

Вентильный двигатель как объект настоящего исследования представляет собой синхронную машину с постоянными магнитами *PMSM* и синусоидальным законом изменения питающего напряжения, обеспечивающим круговое вращающееся магнитное поле в воздушном зазоре между статором и ротором. Далее по тексту именно к данной разновидности электрических машин будет применяться термин «вентильный двигатель». В качестве электрического преобразователя для питания таких двигателей в системах регулируемого электропривода применяются преобразователи частоты. Вентильные электроприводы на основе *PMSM* могут выполняться с частотным векторным или скалярным управлением. Векторное управление по сравнению со скалярным позволяет добиться плавного регулирования момента и скорости вращения ВД, обеспечивает увеличение диапазона регулирования и стабильность скорости на искусственных механических характеристиках, характеризуется высоким быстродействием, позволяет снизить потери в переходных режимах [1 – 5].

К перечисленным достоинствам векторного управления можно добавить, что математическое описание ВД становится аналогичным описанию двигателя постоянного тока независимого возбуждения при компенсации реакции якоря, что позволяет сравнительно просто синтезировать корректирующие устройства контуров регулирования. При этом необходимо обеспечивать равенство нулю проекции тока статора на продольную ось d и проекцию тока на поперечную ось q , равную линейному току при описании машины во вращающейся системе координат [3]. Вектор тока при этом сдвинут на 90 градусов относительно вектора магнитного потока и индуктивность реакции якоря не проявляется, т.е. учитывается только индуктивность обмотки статора [4]. При более простом с точки зрения технической реализации скалярном частотном управлении ВД ток по продольной оси не равен нулю, индуктивным сопротивлением реакции якоря пренебречь нельзя и закон частотного управления, в отличие от пропорционального закона $\gamma = \frac{U_1}{U_{\text{Ином}}} = \alpha = \frac{f_1}{f_{\text{Ином}}}$ при

векторном управлении, описывается выражением $\gamma = \alpha \sqrt{A^2 + \left(B + \frac{\rho}{\alpha}\right)^2}$, где A , B , ρ – коэффициенты, зависящие от параметров вентильного двигателя [5, 6].

Таким образом, алгоритм и скалярного и векторного управления ВД со всеми их достоинствами и недостатками формируется на основе достоверной информации об электромеханических параметрах вентильного двигателя, которые обычно отсутствуют в справочной литературе [6 – 9]. Процедура расчета параметров машины базируется на известных соотношениях для электромагнитного момента и фазной ЭДС взаимоиндукции, является итерационной [6, 7] и дает удовлетворительные результаты при номинальном режиме работы вентильного двигателя. Синтез корректирующих устройств электроприводов с вентильными двигателями, который осуществляется на основе известных значений параметров при недостоверных результатах вычислений может привести к невыполнению требуемых показателей качества переходных процессов, возникновению автоколебаний, а также потере устойчивости и работоспособности электропривода и, в свою очередь, нарушению технологического процесса [8, 9].

К параметрам вентильного двигателя относятся коэффициенты при фазовых координатах уравнений динамики машины: активные сопротивления R и индуктивности обмоток L , а также момент инерции J . Как было отмечено выше, данные параметры не

всегда имеются в паспортных данных, а их значения, имеющиеся в справочной литературе, в целях получения достоверной информации требуют, как правило, экспериментального подтверждения. В этой связи анализ динамических характеристик ВД в условиях параметрической неопределенности, а также вычисление отклонений нестабильных параметров ВД с применением методов теории чувствительности для оптимизации процесса управления мехатронной системой является актуальной задачей [10 – 12].

Материалы и методы.

Уравнения электромеханического преобразования энергии в вентильном двигателе в целях исключения гармонических входных воздействий удобно рассматривать во вращающейся со скоростью ротора декартовой системе координат с продольной d и поперечной q осями [13, 14]. Уравнения для проекций тока статора на координатные оси d - q имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_2 i_q; \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_2 i_d - \frac{\Psi_0 p\omega_2}{L_q}; \\ M &= \frac{m}{2}p \left[\Psi_0 i_q + (L_d - L_q)i_d i_q \right]; \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{1}{J}(M - M_c). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Данные уравнения справедливы при синусоидальном или квазисинусоидальном питающем напряжении.

В операторной форме с учетом электромагнитных постоянных времени $T_d = \frac{L_d}{R}$, $T_q = \frac{L_q}{R}$ и проекции потокоцепления ротора Φ_0 на продольную ось ВД с нестабильными (квазистационарными) параметрами описывается системой уравнений (2) и соответствующей ей структурной схемой (рис. 1), полученной на основе уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned} U_d &= R(t)(T_d s + 1)i_d + \omega L_q(t)i_q; \\ U_q &= R(t)(T_q s + 1)i_q + \omega L_d(t)i_d - \Phi_0 \omega; \\ M &= \frac{3}{2}p \left(\Phi_0 i_q + (L_d(t) - L_q(t))i_d i_q \right); \\ s\omega_2 &= \frac{M - M_c}{J}, \quad \omega = p\omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Третье уравнение системы (2) для вращающего момента M является алгебраическим и учитывает число фаз $m = 3$ и число пар полюсов p , а четвертое уравнение представляет собой уравнение механического равновесия относительно скорости вращения ротора ω_2 при работе двигателя под нагрузкой с моментом сопротивления M_c .

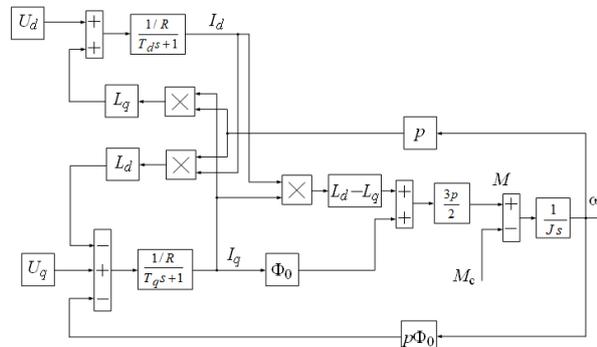


Рис. 1. Структурная схема вентильного двигателя во вращающейся системе координат Fig. 1. Structural diagram of a PMSM with a rotating coordinate system

Перепишем систему операторных уравнений (2) с учетом следующих обозначений $x_1 = i_d$; $x_2 = i_q$; $x_3 = \omega_2$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{R}{L_d} x_1 - p \frac{L_q}{L_d} x_2 x_3 + \frac{u_d}{L_d}; \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R}{L_q} x_2 + \frac{L_d}{L_q} x_1 x_3 + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3 + \frac{u_d}{L_d}; \\ \dot{x}_3 &= \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1 x_2 + \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2 - \frac{M_c}{J}; \\ M &= \frac{3}{2} p (L_d - L_q) x_1 x_2 + \frac{3}{2} p \Phi_0 x_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Продифференцируем систему уравнений (3) по каждому нестабильному параметру и получим соответствующие уравнения чувствительности.

Уравнения чувствительности по активному сопротивлению обмотки статора R :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^R &= -\frac{1}{L_d} x_1^0 - \frac{R}{L_d} x_1^R - p \frac{L_q}{L_d} x_2^R x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^R; \\ \dot{x}_2^R &= \frac{L_d}{L_q} x_1^R x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^R - \frac{1}{L_q} x_2^0 - \frac{R}{L_q} x_2^R + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^R; \\ \dot{x}_3^R &= \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^R x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^R + \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^R. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Уравнения чувствительности по индуктивности L_d обмотки статора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^{L_d} &= \frac{R}{L_d^2} x_1^0 - \frac{R}{L_d} x_1^{L_d} + p \frac{L_q}{L_d^2} x_2^0 x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^{L_d} x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^{L_d} - \frac{u_d}{L_d^2}; \\ \dot{x}_2^{L_d} &= \frac{1}{L_q} x_1^0 x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^{L_d} x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^{L_d} - \frac{R}{L_q} x_2^{L_d} + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^{L_d}; \\ \dot{x}_3^{L_d} &= -\frac{3}{2J} p L_q x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^{L_d} x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_d} + \\ &+ \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^{L_d}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнения чувствительности по индуктивности L_q обмотки статора:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^{L_q} &= -\frac{R}{L_d} x_1^{L_q} - p \frac{1}{L_d} x_2^0 x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^{L_q} x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^{L_q}; \\ \dot{x}_2^{L_q} &= -\frac{L_d}{L_q^2} x_1^0 x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^{L_q} x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^{L_q} + \frac{R}{L_q^2} x_2^0 - \frac{R}{L_q} x_2^{L_q} - \\ &- p \frac{\Phi_0}{L_q^2} x_3^0 + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^{L_q} - \frac{u_q}{L_q^2}; \\ \dot{x}_3^{L_q} &= \frac{3}{2J} p L_d x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^{L_q} x_2^0 + \frac{3}{2J} p (L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_q} + \\ &+ \frac{3}{2J} p \Phi_0 x_2^{L_q}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения чувствительности по моменту инерции J :

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1^J &= -\frac{R}{L_d} x_1^J - p \frac{L_q}{L_d} x_2^J x_3^0 - p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 x_3^J; \\ \dot{x}_2^J &= \frac{L_d}{L_q} x_1^J x_3^0 + \frac{L_d}{L_q} x_1^0 x_3^J + \frac{R}{L_q} x_2^J + p \frac{\Phi_0}{L_q} x_3^J; \\ \dot{x}_3^J &= \frac{3}{2J^2} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p(L_d - L_q) x_1^J x_2^0 + \\ &\frac{3}{2J} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^J - \frac{3}{2J^2} p\Phi_0 x_2^0 + \frac{3}{2J} p\Phi_0 x_2^J + \frac{M_c}{J^2}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Уравнение чувствительности относительно вектора параметров χ в векторно-матричной форме

$$\dot{\mathbf{x}}_\chi = \mathbf{A}_\chi \mathbf{x}_\chi + \mathbf{B}_\chi \mathbf{u}_0 + \mathbf{F}_\chi \quad (8)$$

содержит вектор чувствительности \mathbf{x}_χ , блочную матрицу Якоби \mathbf{A}_χ , матрицу входа \mathbf{B}_χ , матрицу свободных членов \mathbf{F}_χ и вектор входных координат $\mathbf{u}_0 = [u_d \ u_q \ 0]^T$. Векторно-матричная структурная схема, полученная по уравнению (8), приведена на рисунке 2.

Основная матрица системы уравнений (8) имеет размерность (12×12)

$$\mathbf{A}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_R & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_{L_d} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_{L_q} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_J \end{bmatrix} \quad (9)$$

и содержит блоки по каждому из нестабильных параметров ВД:

$$\mathbf{A}_R = \mathbf{A}_{L_d} = \mathbf{A}_{L_q} = \mathbf{A}_J = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & -p \frac{L_q}{L_d} x_3^0 & -p \frac{L_q}{L_d} x_2^0 \\ \frac{L_d}{L_q} x_3^0 & -\frac{R}{L_q} & \left(\frac{L_d}{L_q} x_1^0 + p \frac{\Phi_0}{L_q} \right) \\ \frac{3}{2J} p(L_d - L_q) x_2^0 & \frac{3}{2J} p[(L_d - L_q) x_1^0 + \Phi_0] & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Матрица входа \mathbf{B}_χ размерностью (12×3) представлена блочной матрицей

$$\mathbf{B}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_R \\ \mathbf{B}_{L_d} \\ \mathbf{B}_{L_q} \\ \mathbf{B}_J \end{bmatrix}, \quad (11)$$

а её блоки запишутся как:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_R &= [\mathbf{0}], (3 \times 3); \\ \mathbf{B}_{L_d} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_{L_q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{B}_J &= [\mathbf{0}], (3 \times 3). \end{aligned} \quad (12)$$

Третье слагаемое уравнения чувствительности (8) представляет собой матрицу свободных членов размерностью (12×1)

$$\mathbf{F}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{F}_{L_d} \\ \mathbf{F}_{L_q} \\ \mathbf{F}_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d}x_1^0 \\ -\frac{1}{L_q}x_2^0 \\ 0 \\ -\frac{R}{L_d^2}x_1^0 + \frac{L_q}{L_d^2}x_2^0x_3^0 \\ \frac{1}{L_q}x_1^0x_3^0 \\ -\frac{3}{2}pL_qx_1^0x_2^0 \\ -\frac{1}{L_q}x_2^0x_3^0 \\ -\frac{L_d}{L_q^2}x_1^0x_3^0 + \frac{R}{L_q^2}x_2^0 - \frac{\Phi_0}{L_q^2}x_3^0 \\ \frac{3}{2}pL_dx_1^0x_2^0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{3}{2J^2}p\left[(L_d - L_q)x_1^0x_2^0 + \Phi_0x_2^0\right] + \frac{M_c}{J^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Четвертое уравнение системы (3) предполагает получение векторного уравнения моментов $\mathbf{M}_\chi = \mathbf{C}_\chi \mathbf{x}_\chi$, которое включает блочно-диагональную матрицу выхода \mathbf{C}_χ размерностью (4×12) , равную

$$\mathbf{C}_\chi = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_R^0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{L_d}^0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_{L_q}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{M}_J^0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\mathbf{0} = [0 \ 0 \ 0]$ – нулевая вектор-строка.

Блоки матрицы выхода запишутся как

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_R^0 &= \left[\frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_2^0 \quad \frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_1^0 + \frac{3}{2}p\Phi_0 \quad 0 \right]; \\ \mathbf{M}_{L_d}^0 &= \left[\frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_2^0 \quad \frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_1^0 + \frac{3}{2}p\Phi_0 \quad 0 \right]; \\ \mathbf{M}_{L_q}^0 &= \left[\frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_2^0 \quad \frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_1^0 + \frac{3}{2}p\Phi_0 \quad 0 \right]; \\ \mathbf{M}_J^0 &= \left[\frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_2^0 \quad \frac{3}{2}p(L_d - L_q)x_1^0 + \frac{3}{2}p\Phi_0 \quad 0 \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Уравнения чувствительности по нестабильным параметрам R, L, J в случае, когда выходной координатой является момент на валу, представим системой:

$$\left. \begin{aligned}
 M_R &= \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^R x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^R + \frac{3}{2} p\Phi_0 x_2^R; \\
 M_{L_d} &= -\frac{3}{2} pL_q x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^{L_d} x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_d} + \\
 &+ \frac{3}{2} p\Phi_0 x_2^{L_d}; \\
 M_{L_q} &= \frac{3}{2} pL_d x_1^0 x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^{L_q} x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^{L_q} + \\
 &+ \frac{3}{2} p\Phi_0 x_2^{L_q}; \\
 M_J &= \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^J x_2^0 + \frac{3}{2} p(L_d - L_q) x_1^0 x_2^J + \frac{3}{2} p\Phi_0 x_2^J.
 \end{aligned} \right\} (16)$$

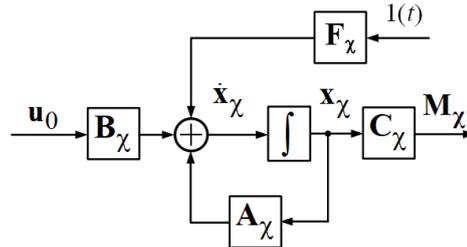


Рис. 2. Векторно-матричная структурная схема для определения дополнительного движения координат вентильного двигателя

Fig. 2. Vector-matrix structural scheme for calculating the additional coordinate movement of a PMSM

Приведенная схема позволяет в компактной форме осуществить анализ динамических характеристик ВД в условиях параметрической неопределенности. Для анализа дополнительного движения скорости вращения ротора ω_2 матрица выхода C_χ не учитывается.

Результаты и обсуждение

На основе известных номинальных значениях параметров исследуемого вентильного двигателя типа LSRPM [10, 15] для момента на валу M и скорости вращения ротора $x_3 = \omega_2$ на рисунке 3 показана Simulink-модель для определения дополнительного движения по указанным координатам.

Вычисление компонентов вектора чувствительности по сопротивлению, индуктивностям и моменту инерции осуществляется в подсистемах R, Ld, Lq, J соответственно. На рисунке 4 представлена Simulink-модель для определения дополнительного движения выходных координат M_{L_q} и ω_{2L_q} при изменении индуктивности по поперечной оси обмотки статора.

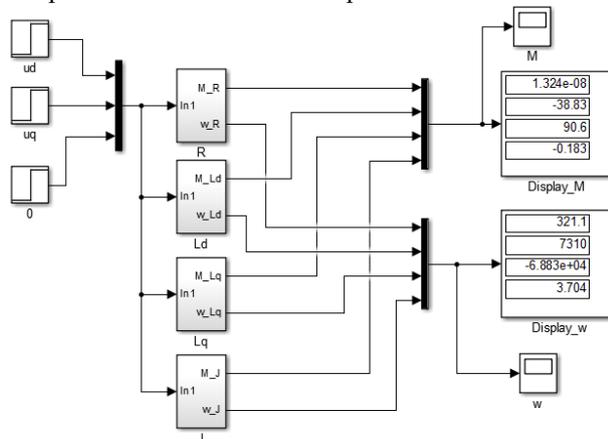


Рис. 3. Simulink-модель для вычисления дополнительного движения вентильного двигателя.

Fig. 3. Simulink-model for calculating the additional movement of a PMSM.

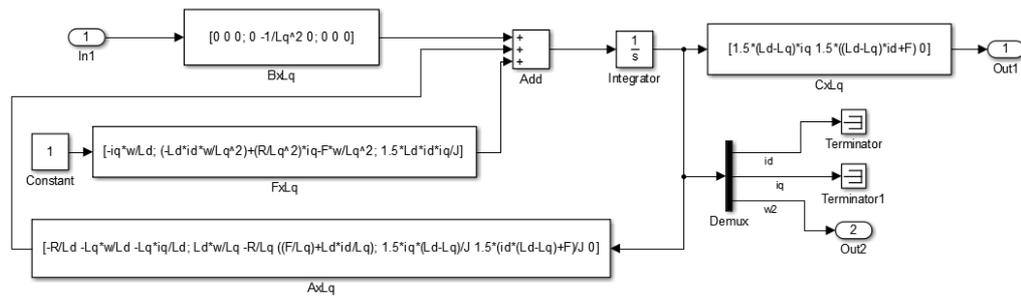


Рис. 4. Simulink-модель для вычисления функций чувствительности M_{Lq} , ω_{2Lq} Fig. 4. Simulink Model for Calculating Sensitivity Functions M_{Lq} , ω_{2Lq}

В блоках AxLq, VxLq, FxLq и CxLq реализованы компоненты уравнений (9), (11), (13), (14) относительно индуктивности L_q . Подсистемы R, Ld и J построены по тому же принципу. На выходе Out1 регистрируются изменения проекции M_{Lq} вектора выходных координат \mathbf{M}_x , а на выходе Out2 – проекции ω_{2Lq} вектора скорости вращения ротора \mathbf{x}_3^x .

При необходимости имеется возможность получить информацию о дополнительном движении проекций тока статора на оси d и q в условиях параметрической неопределенности. При этом к выходам Terminator и Terminator1 следует подключить соответствующие регистрирующие устройства. В блоки подсистем R, Ld, Lq и J A_i , B_i , F_i , C_i перед началом моделирования вводятся номинальные значения параметров вентильного двигателя в соответствии с данными таблица 1, а также установившиеся значения промежуточных координат, полученных при моделировании ВД с номинальными значениями параметров:

$$R^0 = 0,96 \text{ Ом}; L_d^0 = 0,00525 \text{ Гн}; L_q^0 = 0,00225 \text{ Гн}; \Phi^0 = 0,183 \text{ Вб}; J^0 = 0,013 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$\omega^0 = 138 \text{ рад/с}; i_d^0 = -61 \text{ А}; i_q^0 = 188,6 \text{ А}.$$

Результаты моделирования представлены на рисунках 5 – 8.

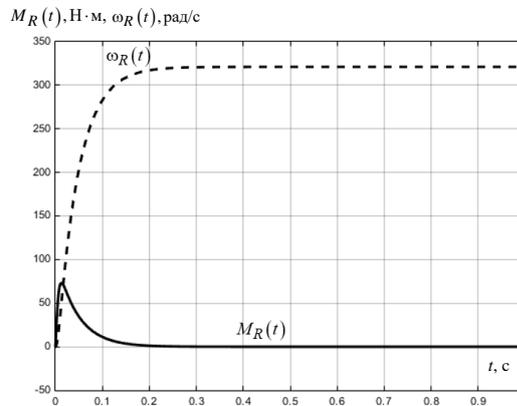


Рис. 5. Зависимости $M_R(t)$, $\omega_R(t)$ Fig. 5. Dependencies $M_R(t)$, $\omega_R(t)$

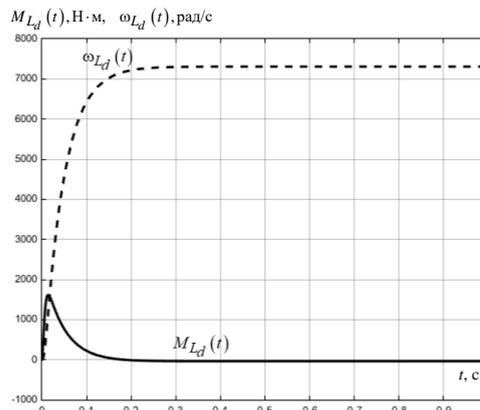


Рис. 6. Зависимости $M_{Ld}(t)$, $\omega_{Ld}(t)$ Fig. 6. Dependencies $M_{Ld}(t)$, $\omega_{Ld}(t)$

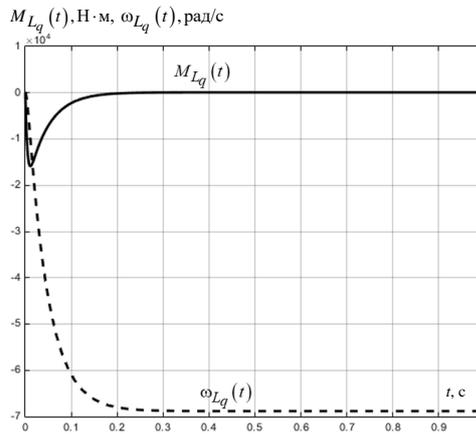


Рис. 7. Зависимости $M_{L_q}(t)$, $\omega_{L_q}(t)$

Fig. 7. Dependencies $M_{L_q}(t)$, $\omega_{L_q}(t)$

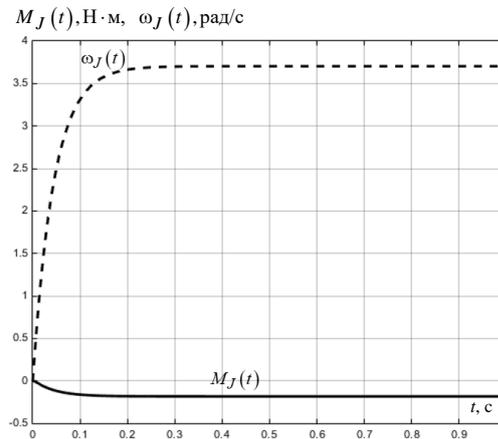


Рис. 8. Зависимости $M_J(t)$, $\omega_J(t)$

Fig. 8. Dependencies $M_J(t)$, $\omega_J(t)$

Из анализа результатов моделирования видно, что полученные графики функций чувствительности при малых отклонениях нестабильных параметров характеризуются устойчивыми переходными процессами, что говорит об отсутствии неустойчивых предельных циклов исследуемого нелинейного объекта [16]. Максимальный вклад в дополнительное движение координат вентильного двигателя вносит изменение индуктивности L_q и установившиеся значения выходных координат при вариации указанного параметра составляют: $\omega_{L_q}^{уст} = -6,883 \cdot 10^4$ рад/с и $M_{L_q}^{уст} = 90,6$ Н·м (см. рис. 3, 7). Зависимости $M_{L_d}(t)$ и $\omega_{L_d}(t)$ (рис. 6) инвертированы в вертикальной плоскости по отношению к рис. 7, а установившиеся значения функций чувствительности равны $\omega_{L_d}^{уст} = 7310$ рад/с и $M_{L_q}^{уст} = -38,83$ Н·м. Изменения R (рис. 5) и J (рис. 8) вентильного двигателя в меньшей степени влияют на выходные координаты ВД и установившиеся значения функций чувствительности равны: $\omega_R^{уст} = 321,1$ рад/с, $\omega_J^{уст} = 3,704$ рад/с, $M_R^{уст} \approx 0$ Н·м, $M_J^{уст} = -0,183$ Н·м. В результате максимальное установившееся значение дополнительного движения зарегистрировано у скорости вращения ВД при изменении индуктивности L_q .

Обобщенное математическое описание [17], характеризующее решение уравнений чувствительности при вариациях нестабильных параметров соответствует выражению

$$x(\chi + \Delta\chi, t) = x(\chi, t) + u^{(1)}\Delta\chi + \frac{1}{2!}u^{(2)}\Delta\chi^2 + \dots + \frac{1}{r!}u^{(r)}\Delta\chi^r + \dots, \quad (17)$$

где показатель степени в круглых скобках означает порядок функций чувствительности u .

Функция чувствительности r -го порядка для системы (3) описывается уравнением

$$\frac{\partial f}{\partial \ddot{x}} \ddot{u}^{(r)} + \frac{\partial f}{\partial \dot{x}} \dot{u}^{(r)} + \frac{\partial f}{\partial x} u^{(r)} = \Phi \left[u^{(r-1)}, \dots, u^{(2)}, u^{(1)}, x, \chi, t \right]. \quad (18)$$

Наличие устойчивого предельного цикла решения уравнений чувствительности обеспечивает ограниченную амплитуду возмущающего дополнительного движения (правая часть уравнения (18)). Следовательно, если решение уравнений чувствительности представляет собой устойчивый предельный цикл, то ряд Тейлора, в который раскладывается решение уравнения движения ВД (четвертое уравнение системы (3)) всегда сходится.

Понятие параметрической неопределенности предполагает недетерминированный характер изменения параметров [16 – 19] и для анализа динамических свойств вентильного двигателя в данных условиях оправданным является применение аппарата теории чувствительности [20, 21]. В первом приближении для анализа статистических характеристик объекта исследования примем к рассмотрению гипотезу о нормальном (гауссовском) распределении отклонений параметров [22, 23] в соответствии с выражением:

$$f(\chi) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\chi - m_\chi)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (19)$$

где m_χ – математическое ожидание возможного отклонения нестабильного параметра χ ; σ_i – среднеквадратичное отклонение i -го нестабильного параметра.

С учетом правила 3 σ среднеквадратическое отклонение σ i -го параметра при нормальном распределении определяется по формуле

$$\sigma_i = \frac{\Delta\chi_i}{3}. \quad (20)$$

Тогда дисперсия отклонения параметра $\Delta\chi_i$ запишется как

$$D_{\chi_i} = \sigma_i^2 = \frac{\Delta\chi_i^2}{9}. \quad (21)$$

Суммарная дисперсия фазовых координат ВД при нормальном распределении определяется выражением

$$D_{x_i} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n (x_{\chi_i} \Delta\chi_i)^2. \quad (22)$$

Еще одно количественное выражение оценки влияния нестабильных параметров на дополнительное движение координат ВД представляется относительной оценкой

$$S_i = \frac{x_{\chi_i}^2 D_{x_i}}{\sum_{i=1}^n x_{\chi_i} D_{x_i}}. \quad (23)$$

Сформируем соответствующую Simulink-модель для определения указанных статистических характеристик и построим графики дисперсий и относительных оценок в соответствии с выражениями (21), (22), (23) (рис. 9).

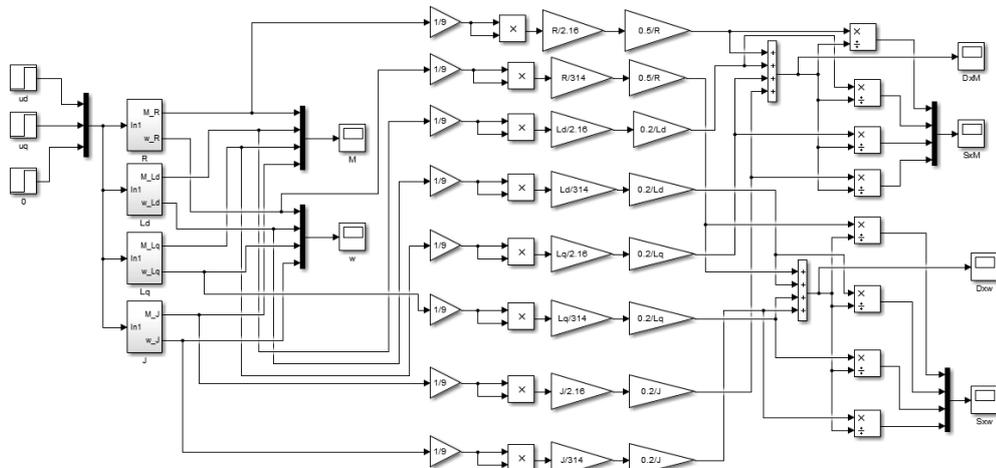


Рис. 9. Simulink-модель вычисления суммарной дисперсии и относительных оценок вентильного двигателя

Fig. 9. Simulink-model for calculating total variance and relative estimate of a PMSM s

Графики дисперсий при вариациях нестабильных параметров представлены на рис. 10, 11.

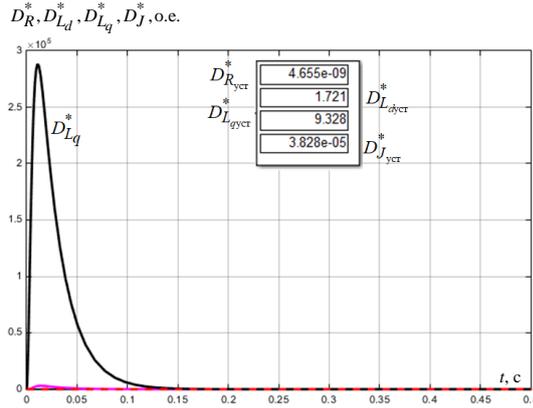


Рис. 10. Относительные дисперсии выходной координаты M по нестабильным параметрам

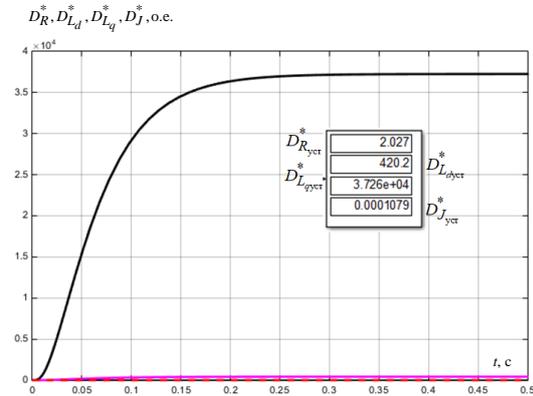


Рис. 11. Относительные дисперсии выходной координаты ω по нестабильным параметрам

Графики относительных дисперсий, полученные с применением модели на рис. 9 позволили зарегистрировать следующие результаты: установившиеся значения относительных дисперсий составили соответственно $D_{Lq}^{*уст,\omega} = 3,726 \cdot 10^4$ о.е. и $D_{Lq}^{*уст,M} = 9,328$ о.е., причем зависимость $D_{Lq}^{*M}(t)$ имеет динамический выброс около $2,8 \cdot 10^5$ о.е.; $D_{Ld}^{*уст,\omega} = 420,2$ о.е. и $D_{Ld}^{*уст,M} = 1,721$ о.е.; влияние вариаций R и J на выходные координаты ВД пренебрежимо мало.

На рисунках 12, 13 показаны графики относительных оценок.

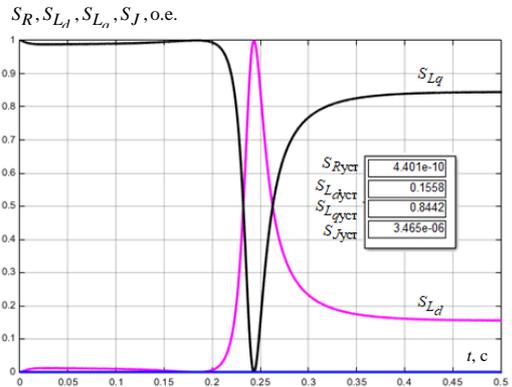


Рис. 12. Относительные оценки выходной координаты M по нестабильным параметрам

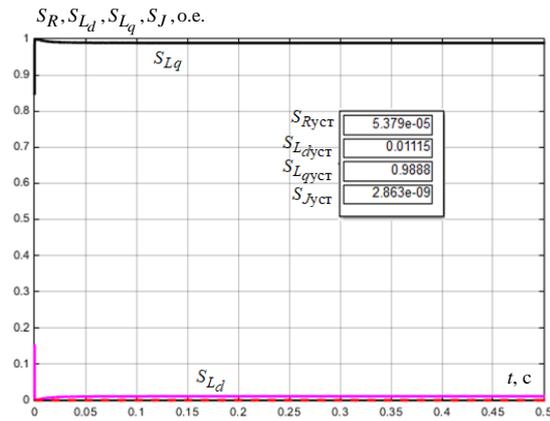


Рис. 13. Относительные оценки выходной координаты ω по нестабильным параметрам

Fig. 13. Relative estimate of the output coordinate ω by unstable parameters

Здесь в целом картина повторяется и наибольшие отклонения выходных координат ВД вызывают изменения проекций индуктивности обмотки статора: $S_{Lq}^{уст,\omega} = 0,9888$ о.е.,

$$S_{Lq}^{уст,M} = 0,8442 \text{ о.е.}, \text{ а } S_{Ld}^{уст,\omega} = 0,01115 \text{ о.е.}, \text{ } S_{Ld}^{уст,M} = 0,1558 \text{ о.е.}$$

Анализ динамических характеристик вентильного двигателя мехатронной системы в условиях параметрической неопределенности, состоящий в совместном решении дифференциальных уравнений объекта исследования и уравнений чувствительности позволяет не только выявить характер и установившиеся значения дополнительного движения фазовых координат в зависимости от чувствительности к изменениям нестабильных параметров, но, на основе полученной информации, обеспечить экстремум некоторого показателя качества управления мехатронной системы:

$$I(\Delta\chi_1, \Delta\chi_2, \dots, \Delta\chi_r) \rightarrow \min_{\Delta\chi}. \quad (24)$$

В соответствии с условием (24) можно сформировать систему алгебраических уравнений относительно вектора приращений нестабильных параметров $\Delta\chi$. Для этого необходимо вычислить частные производные от показателя качества I по каждому из нестабильных параметров и приравнять их к нулю. Решение полученной системы уравнений позволит получить оценки $\Delta\chi$, которые будут линейно зависеть от результатов моделирования (количества итераций компьютерного эксперимента). Точность вычисления оценок приращений $\Delta\chi$ определяется количеством поддиапазонов в пределах заданного диапазона вариаций нестабильных параметров, а результаты этих вычислений могут быть использованы при решении задач проектирования мехатронных систем на этапе синтеза алгоритмов оптимального управления технологическими процессами.

Выводы

Моделирование уравнения чувствительности (8) с применением *Simulink*-моделей показало, что определяющую роль в формировании дополнительного движения выходных координат ВД в условиях параметрической неопределенности играет составляющая L_q индуктивности статорной обмотки, а скорость вращения ротора является наиболее чувствительной к параметрическим возмущениям выходной координатой ВД.

Анализ параметрических возмущений вентильного двигателя как многосвязного нелинейного квазистационарного объекта позволяет судить о применимости векторных моделей чувствительности для оценки динамических свойств различных объектов исследования в условиях параметрической неопределенности путем математического моделирования в программной среде *MatLab*. Уравнения чувствительности вне зависимости от сложности математического описания объекта исследования являются линейными и могут быть сравнительно просто решены известными численными методами. Исследование моделей чувствительности вентильного двигателя в условиях параметрической неопределенности показало, что результаты моделирования характеризуются устойчивыми процессами и при случайных вариациях параметров в соответствии с нормальным распределением в заданном диапазоне значений полученные решения являются корректными, адекватными поставленной задаче и, кроме того, не требуют больших вычислительных мощностей. Данные обстоятельства приводят к выводу о возможности использования метода получения разработанных для вентильного двигателя моделей чувствительности для оценки нестабильных параметров различных элементов мехатронных

систем на стадии проектирования, изготовления и эксплуатации. На основе предварительных экспериментально-аналитических исследований может быть сформирован алгоритм оценки параметров мехатронных систем в процессе функционирования, позволяющий в автоматическом режиме получать значения нестабильных параметров в режиме реального времени с возможностью применения данной информации при расчетах проектируемых компонентов мехатронных систем на основе принципов оптимизации.

Полученные для вентильного двигателя уравнения чувствительности и *Simulink*-модели могут быть применены для решения комплексной задачи многопараметрической идентификации и построения алгоритмов адаптивного управления мехатронных систем при оптимизации автоматизированных технологических процессов.

Литература

1. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with a Blend of Magnet Types, 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 1303-1310.
2. Huynh T.A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*. 2018; 11(6):1385.
3. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 92-97.
4. Базылев Д.Н., Пыркин А.А., Бобцов А.А. Алгоритм адаптивного бессенсорного управления синхронным двигателем // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 24–31.
5. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2011. V. 19. N 3. P. 601–614.
6. A. K. Morya et al. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 3-20, March 2019.
7. J. He et al., "Multi-Domain Design Optimization of dv/dt Filter for SiC-Based Three-Phase Inverters in High-Frequency Motor-Drive Applications" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 5214-5222, Sept.-Oct. 2019.
8. R. A. Torres, H. Dai, W. Lee, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, Development of Current-Source-Inverter-based Integrated Motor Drives using Wide-Bandgap Power Switches, 2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2019, pp. 1-6.
9. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2018;20(7-8):107-116.
10. N. A. Malev, A. I. Mukhametshin and O. V. Pogoditsky. Analysis and Study of the Dynamic Processes of a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Wide Range of Parameter Variations Using the Reference Model, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6.
11. S. Akita, T. Higuchi, Y. Yokoi, H. Saikusa, T. Abe, S. Makino, "Experimental Characteristics of a Line-Start Permanent Magnet Motor", The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016) DS2G–1–17, 2016.
12. Joost Bolder, Stephan Kleinendorst, and Tom Oomen. "Data-driven multivariable ILC: enhanced performance by eliminating L and Q filters." *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(12):3728–3751, 2018.
13. T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto and M. Sanada, "Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 5, pp. 3620-3628, Sept.-Oct. 2015.
14. S. Li and Z. Liu, "Adaptive Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor System With Variations of Load Inertia," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3050-3059, Aug. 2009.
15. C. He and T. Wu, "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 94-100, March 2019.
16. M. Bucolo, A. Buscarino, L. Fortuna and C. Famoso, "Stochastic resonance in imperfect electromechanical systems," *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020, pp. 210-214.

17. Bolzern, P., P. Colaneri, G. de Nicolao, and U. Snaked, "Guaranteed H_∞ Robustness Bounds for Wiener Filtering and Prediction," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, 12, 41–56, 2001.

18. Афанасьев А.Ю., Макаров В.Г., Загирова В.Н. Идентификация параметров и частоты вращения ротора асинхронного двигателя на основе функций чувствительности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020.Т.6. С.128-131.

19. Eremin E.L. Combined system with an implicit standard for a class of uncertain a priori singlechannel non-affine control plants on the set of operation states. *Information Science and Control Systems*. 2018. No. 3(57). pp. 93-103.

20. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Цветкович А.М. Особенности применения теории чувствительности для анализа влияния параметрических возмущений на динамические свойства электромеханических преобразователей. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2019;21(6):101-110.

21. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., Чичков П.В. Сравнительный анализ аппаратно-программного обеспечения метода контроля функционирования электромеханических преобразователей постоянного тока. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020;22(5):142-154.

22. Dr. Sasi Bhanu J, Dr. Baswaraj D, Sunitha Devi Bigul, and Dr. JKR Sastry. Generating Test cases for Testing Embedded Systems using Combinatorial Techniques and Neural Networks based Learning Model, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 7, is. 7, p.p. 417-429, 2019.

23. S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk and other. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis, *Journal of Electronic Testing*, vol. 35, is.148, p.p. 1-9, 2019.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – канд. техн. наук, 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.

Дюрягин Андрей Михайлович – канд. техн. наук, ведущий специалист КАЗ им. С.П Горбунова – филиал ПАО "Туполев".

References

1. Ma Q., El-Refaie A., Lequesne B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with a Blend of Magnet Types. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 2019; 1303-1310.

2. Huynh T.A., Hsieh M-F. Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EV) Traction Considering Driving Cycles. *Energies*, 2018; 11(6):1385.

3. Frolov V. Y. & Zhiligitov R. I. Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink, *Journal of Mining Institute*, 2018; 229: 92.

4. Bazylev D.N., Pyrkin A.A., Bobtsov A.A. Algorithm for adaptive sensorless control of synchronous motors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018; 18(1): 24–31.

5. Ortega R., Praly L., Astolfi A., Lee J., Nam K. Estimation of rotor position and speed of permanent magnet synchronous motors with guaranteed stability // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011; 19(3): 601–614.

6. A. K. Morya et al. Wide Bandgap Devices in AC Electric Drives: Opportunities and Challenges, in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019; 5(1): 3-20.

7. J. He et al., Multi-Domain Design Optimization of dv/dt Filter for SiC-Based Three-Phase Inverters in High-Frequency Motor-Drive Applications" in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019; 55(5): 5214-5222.

8. R. A. Torres, H. Dai, W. Lee, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, Development of Current-Source-Inverter-based Integrated Motor Drives using Wide-Bandgap Power Switches, 2019 *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2019; 1-6.
9. Petrov T.I., Safin A.R., Ivshin I.V., Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu. MODEL OF THE CONTROL SYSTEM ROCKING MACHINES OF OIL THE BASIC OF A SYNCHRONOUS ENGINES WITH THE SENSORLESS METHOD. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(7-8):107-116. (In Russ.).
10. N. A. Malev, A. I. Mukhametshin and O. V. Pogoditsky. Analysis and Study of the Dynamic Processes of a Permanent Magnet Synchronous Motor with a Wide Range of Parameter Variations Using the Reference Model, 2019 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Vladivostok, Russia, 2019; 1-6.
11. S. Akita, T. Higuchi, Y. Yokoi, H. Saikusa, T. Abe, S. Makino, "Experimental Characteristics of a Line-Start Permanent Magnet Motor", *The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2016) DS2G-1-17*, 2016.
12. Joost Bolder, Stephan Kleinendorst, and Tom Oomen. "Data-driven multivariable ILC: enhanced performance by eliminating L and Q filters." *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018; 28(12):3728–3751.
13. T. Inoue, Y. Inoue, S. Morimoto and M. Sanada, "Mathematical Model for MTPA Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Stator Flux Linkage Synchronous Frame," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015; 51(5): 3620-3628.
14. S. Li and Z. Liu, "Adaptive Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor System With Variations of Load Inertia," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009; 56(8): 3050-3059.
15. C. He and T. Wu, "Analysis and design of surface permanent magnet synchronous motor and generator," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2019; 3(1): 94-100.
16. M. Bucolo, A. Buscarino, L. Fortuna and C. Famoso, "Stochastic resonance in imperfect electromechanical systems," *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2020; 210-214.
17. Bolzern, P., P. Colaneri, G. de Nicolao, and U. Snaked, "Guaranteed H_∞ Robustness Bounds for Wiener Filtering and Prediction," *Int. J. Robust Nonlinear Contr.*, 2001; 12: 41–56.
18. Afanasiev A.Y., Makarov V.G., Zagirova V.N. Identification of parameters and rotor speed of the induction motor with the sensitivity functions // *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*. 2020; 6: 128-131.
19. Eremin E.L. Combined system with an implicit standard for a class of uncertain a priori singlechannel non-affine control plants on the set of operation states. *Information Science and Control Systems*. 2018; 3(57): 93-103.
20. Malev N.A., Pogoditsky O.V., Cvetkovich A.M. Features of application of sensitivity theory for analysis of influence of parametric disturbances on dynamic properties electromechanical converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(6):101-110. (In Russ.).
21. Malev N.A., Mukhametshin A.I., Pogoditsky O.V., Chichkov P.V. Comparative analysis of hardware and software of the monitoring method of functioning electromechanical DC converters. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(5):142-154. (In Russ.).
22. Dr. Sasi Bhanu J, Dr. Baswaraj D, Sunitha Devi Bigul, and Dr. JKR Sastry. Generating Test cases for Testing Embedded Systems using Combinatorial Techniques and Neural Networks based Learning Model, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 2019; 7(7): 417-429.
23. S. Herasimov, V. Pavlii, O. Tymoshchuk and other. Testing Signals for Electronics: Criteria for Synthesis, *Journal of Electronic Testing*, 2019; 35(148): 1-9.

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.

© Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, О.В. Козелков, А.М. Дюрягин

Andrei M. Dyuryagin –KAP name for S.P. Gorbunov – branch of PJSC "Tupolev".

Получено *15.03.2022г.*

Отредактировано *25.03.2022г.*

Принято *02.04.2022г.*



МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

Андреев¹ В.П., Плетенев^{1,2} П.Ф.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Россия

²АО «ВНИИЖТ», г. Москва, Россия

andreevipa@yandex.ru

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6286-112X>, cpp.create@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Анализ существующих и перспективных методов динамического перепрограммирования, пригодных для использования в мобильном роботе с модульной архитектурой системы управления (СУ). Кратко описана функционально-модульная архитектура системы управления мобильного робота, реализующая распределённые вычисления, что позволяет обеспечить режим работы СУ в реальном времени при использовании в СУ модулей встраиваемых систем – микроконтроллеров невысокой производительности. Рассмотрены особенности применения 4-х методов по 6 критериям: применимость на разных встраиваемых микропроцессорных системах, объём требуемой оперативной памяти и памяти программ, скорость вычислений, теоретическая сложность создания реализации метода, теоретическая сложность использования метода конечным пользователем (настройщиком), гибкость создаваемого метода. В качестве результата исследования приведены рекомендации по применению рассмотренных методов.

Ключевые слова: *мобильный робот; модульный робот; система управления; коммуникационный канал; динамическое перепрограммирование; встраиваемые системы.*

Благодарности: *Результаты получены в рамках работ по гранту РФФИ № 19-07-00892а.*

Для цитирования: Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Методы динамического перепрограммирования для мобильного робота с модульной архитектурой // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 175-184. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-175-184.

DYNAMIC REPROGRAMMING METHODS FOR A MOBILE ROBOT WITH MODULAR ARCHITECTURE

VP. Andreev¹, PF. Pletenev^{1,2}

¹Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

²АО «ВНИИЖТ», Moscow, Russia

andreevipa@yandex.ru

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6286-112X>, cpp.create@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE* of this article is to analyze existing and promising methods of dynamic reprogramming suitable for use in a mobile robot with a modular control system architecture. The article briefly describes functional-modular architecture of the control system (CS) of a mobile robot implementing distributed computing, which makes it possible to ensure the real-time operation of the modules' CS even when it's built using low-power embedded systems. The article describes features of 4 different methods according to 6 criteria: applicability on different embedded systems, the amount of operating and program memory required, the speed of calculations, the theoretical complexity of creating an implementation of the method, the theoretical complexity of using the method by the end user (tuner), the flexibility of the method being created. The results of this study are given in form of recommendations for the application of the considered methods in different environments and purposes.

Keywords: mobile robot; modular robot; control system; communications channel; dynamic reprogramming; embedded systems.

Acknowledgments: Research was supported by the Russian Foundation for Basic Research: Grant 19-07-00892a.

For citation: Andreev VP, Pletenev PF. Dynamic reprogramming methods for a mobile robot with modular architecture. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 175-184. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-175-184.

Введение

Опыт применения робототехнических комплексов (РТК) в экстремальных условиях (авария на чернобыльской АЭС в 1986 г.) показал, что для точного соответствия функционала РТК поставленной задаче при работе в агрессивных для человека средах (космос, зоны химического или радиоактивного заражения) требуются не только роботы в специальном исполнении (экстремальная робототехника), но может потребоваться **оперативное** изменение состава и/или структуры РТК непосредственно на месте проведения работ. На необходимость данного функционала для экстремальной робототехники указывали такие известные отечественные учёные, как академик РАН д.т.н. Попов Евгений Павлович [1], д.т.н. Юревич Евгений Иванович [2] и д.ф.-м.н. Платонов Александр Константинович [3]. Иными словами, для таких применений необходимы реконфигурируемые роботы.

Реконфигурация – изменение конфигурации модульного робота для достижения запланированного изменения функции модульного робота¹.

Фактически реконфигурация – это целенаправленное изменение конфигурации и/или технических характеристик мобильного робота (МР) при изменении состава его функциональных узлов без необходимости перенастройки программного обеспечения его системы управления (СУ). Но подобная реконфигурация возможна лишь при модульном решении архитектуры системы управления РТК. Пример такой архитектуры приведён на рис.1 [4].

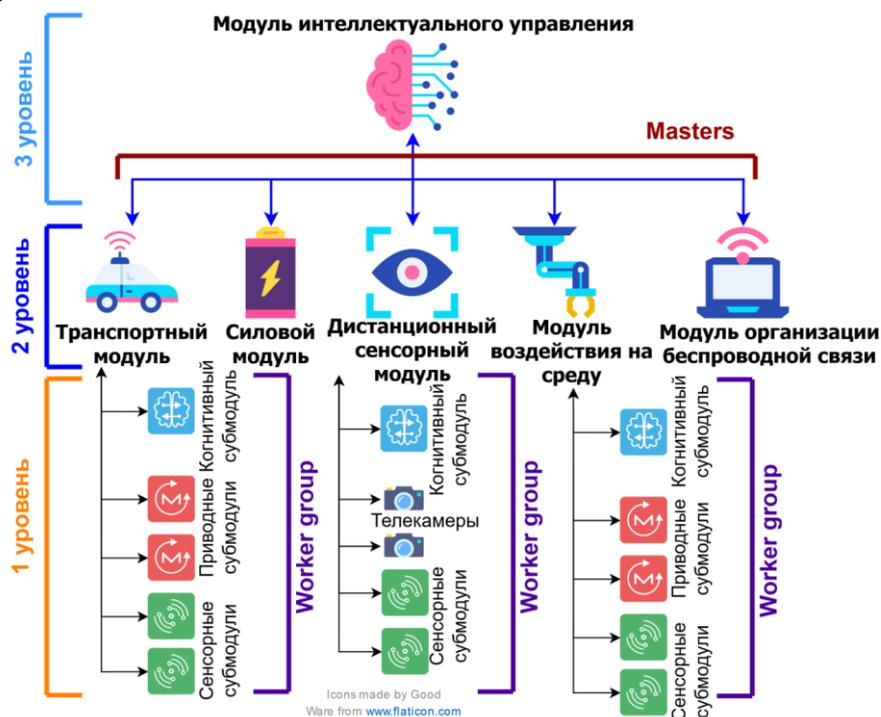


Рис. 1 Функционально-модульная архитектура системы управления мобильного робота

Fig. 1. Functional-modular architecture of a control system of a mobile robot

На вершине архитектуры располагается модуль интеллектуального управления, отвечающий за планирование и распределение задач по функциям между модулями второго

¹ ISO/DIS 22166-1:2021(E). 2021.

уровня – общесистемное управление. В этой архитектуре модули на третьем и втором уровне иерархии отвечают за одну укрупнённую функцию целого робота согласно принципу полной функциональности [5]: *каждый модуль робота должен быть способен любым удобным ему способом выполнять свою целевую функцию, используя только собственные средства для выполнения команд от внешней системы управления*. На первом уровне иерархии располагаются субмодули, выполняющие функцию низкоуровневого управления исполнительными устройствами, например, приводами; фактически это группа субмодулей (*Worker group*). Взаимодействие модулей второго и первого уровня выполняется по принципу «*Master-Worker group*».

Системы управления большинства современных МР строятся на основе одного вычислительного устройства, на котором выполняются все вычислительные операции (как высокоуровневого, так и низкоуровневого управления), что не допускает *оперативную* перенастройку СУ робототехнической системы; реализация перенастройки СУ таких роботов на практике означает создание нового робота с заданной новой функциональностью. Модульное решение СУ означает разбиение функционала РТК на более простые подфункции (рис.1), которые реализуются отдельными полнофункциональными мехатронными модулями, обладающими собственной системой управления [4]. Следует особо отметить, что для обеспечения минимизации массогабаритных параметров и энергопотребления автономных мобильных роботов системы управления модулей должны реализовываться на встраиваемых системах – микроконтроллерах невысокой производительности. Для синхронизации работы такой распределённой структуры необходимо обеспечить соответствующее межмодульное информационное взаимодействие, которое реализуется объединением систем управления всех модулей и субмодулей в локальную вычислительную сеть (ЛВС) [6]. В результате, реализуются распределённые вычисления по аналогии с мультиагентными системами [7].

В МР с модульной архитектурой целевая задача решается за счёт правильного подбора функциональных узлов-модулей и их автоматической программной интеграции в СУ робота в целом без переработки программных аспектов как общей СУ, так и СУ самих модулей. Однако, вследствие неопределённости требований к параметрам СУ в случаях, когда заранее невозможно определить условия окружающей среды, в которых предстоит работать роботу (например, разведывательный МР на иных планетах или в зонах техногенных катастроф), возникает необходимость перенастройки СУ или, даже, замены его программного обеспечения (ПО) – удалённой и управляемой извне адаптации, настройки и подстройки к ситуации. Возникает *необходимость оперативного дистанционного перепрограммирования* программных аспектов систем управления отдельных модулей робота без остановки функционирования РТК, поскольку в указанных условиях доставить робот его разработчику или изготовителю оказывается крайне затратным или даже невозможным. В то же время при наличии связи с роботом возможно дистанционно выполнить эту работу с помощью разработчика ПО.

Цель настоящей работы – анализ существующих и перспективных методов динамического перепрограммирования, пригодных для использования в мобильном роботе с модульной архитектурой системы управления. Основная проблема использования динамического перепрограммирования для модульного робота – необходимость использования в СУ модулей встраиваемых микроконтроллерных систем и обновление программной части «на лету» через основную шину данных, используемую микроконтроллером, без отключения и демонтажа блоков. Поскольку системы управления модулей и субмодулей объединены в ЛВС, то в основе решения данной задачи лежит поиск соответствующих методов межмодульной коммуникации (ММК) и сетевых протоколов, отвечающих определённым требованиям.

Авторами из разных стран и научных школ были предложены разные методы, как построения модульных роботов [8-10], так и методов межмодульной коммуникации [11-13]. В нашей работе [14] показано, что спецификация *Cyphal* [15] (ранее известная как *UAVCAN*) и её реализация *OpenCyphal* являются наиболее эффективными с точки зрения применения в качестве ММК. Поэтому, различные механизмы динамического перепрограммирования, рассматриваемые в данной статье, будут использовать в качестве ММК сообщения из спецификации *Cyphal*.

Материалы и методы

В рамках настоящей работы будем рассматривать встраиваемую (реализуемую на микроконтроллере) программно-аппаратную систему, которая управляет некоторым физическим процессом. Управление производится «основным алгоритмом». Любые изменения в основной алгоритм производятся «побочным алгоритмом».

На данный момент существует множество разных и значительно отличающихся друг от друга методов динамического перепрограммирования. Каждый из них имеет свои уникальные свойства и отличается разным распределением сложности задач по изменению «основного алгоритма» между человеком-разработчиком системы управления, человеком-настройщиком (конечным пользователем) системы управления, программным обеспечением на ЭВМ разработчика/настройщика встраиваемой системы и непосредственной системой управления встраиваемой системы. Отличия также заключаются в широте гибкости решений, которые возможно создать с помощью каждого из этих методов. Ниже рассмотрены 4 основных метода динамического перепрограммирования:

M1. Параметрическое перепрограммирование.

M2. Замена кода микроконтроллера.

M3. Замена байткода.

M4. Замена скрипта на интерпретируемом языке программирования.

Анализ каждого из перечисленных методов выполняется по следующим критериям:

K1. Применимость на разных встраиваемых системах – микроконтроллерах невысокой производительности.

K2. Объём требуемой оперативной памяти и памяти программ.

K3. Скорость вычислений (процессорное время).

K4. Теоретическая сложность создания реализации метода в виде базовой управляющей программы.

K5. Теоретическая сложность использования метода для адаптации к оперативной ситуации базовой управляющей программы конечным пользователем.

K6. Гибкость метода – глубина и сложность внесения возможных изменений в основной алгоритм работы встраиваемой системы при использовании данного метода.

Важным критерием для методов *дистанционного* динамического перепрограммирования является возможность обеспечения информационной безопасности, поскольку дистанционность обычно реализуется за счёт использования радиоканала. Рассмотренные ниже методы дают возможность удалённого исполнения кода (*Remote Code Execution*), что является одной из крупнейших уязвимостей для любого комплекса программ. Но авторы не являются специалистами в сфере информационной безопасности, поэтому обеспечение информационной безопасности представленных ниже методов – это тема для отдельного рассмотрения соответствующими специалистами. В данном случае считается, что все взаимодействия происходят внутри помехозащищённой внутренней шины робота, недоступной для внешних воздействий. Также ПО того узла внутренней сети, которое производит обмен информацией с внешними, потенциально открытыми сетями, написано достаточно надёжно, что не допускает загрузку и исполнение кода из недостоверных и потенциально вредоносных источников.

Результаты анализа

M1 – Параметрическое перепрограммирование

Одним из первых и самых простых методов динамического перепрограммирования является параметрическое перепрограммирование – то есть замена неизменных (с точки зрения основного алгоритма управления) внутренних величин, которые играют существенную роль в работе этого алгоритма. Пример – подстройка значений пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей в регуляторе скорости вращения электродвигателя в системе управления модуля движения. Значения (например, по умолчанию) для таких параметров могут храниться в энергонезависимой памяти вычислительного устройства. Именно такой способ перепрограммирования предоставляют типы данных с доступом сервис (запрос-ответ): *uavcan.register.Access* и *uavcan.register.List* из спецификации *Cyphal*. Оба эти сервиса предоставляют информацию об именованных параметрах прошивки – так называемых регистрах. Каждый регистр обладает именем и значением. Список имён регистров можно получить с помощью последовательных вызовов службы *uavcan.register.List*; получить существующее или установить новое значение в именованный регистр можно с помощью команды *uavcan.register.Access*. Реализация *OpenCyphal* предоставляет возможность массовой установки данных параметров с помощью файла конфигурации, что облегчает настройку всей взаимодействующей системы целиком. Необходимо отметить, что использование регистров позволяет не только установить значения параметров отдельного алгоритма, но и предоставляет возможность «на лету» менять и сам основной алгоритм путём выбора одного из возможных сценариев.

Оценивая метод по критерию K1, можно отметить, что данный метод подходит для подавляющего большинства встраиваемых систем, так как он не подразумевает

модификацию энергонезависимой памяти вообще или модификацию лишь небольшой её части. Многие современные встраиваемые микроконтроллеры и встраиваемые системы или обладают возможностью записывать данные напрямую в энергонезависимую память программ, или содержат отдельную небольшую энергонезависимую встроенную область памяти, которая предназначена именно для хранения параметров. Если же микроконтроллер не обладает ни одной из перечисленных возможностей, то такая память может быть установлена извне.

С точки зрения потребления оперативной памяти и памяти программ (критерий K2), данный метод требует начального «вложения» в объёме реализаций метода приёма и передачи перечисленных ранее сообщений, метода доступа к энергонезависимой памяти, а также дополнительных затрат на хранение как названий параметров, так и самих параметров. Спецификация *Cyphal* предполагает максимальную длину сообщения на чтение и/или модификацию одного параметра в 515 байт. Из них 256 байт отведены на название регистра, а 259 байт – на его значение.

Дополнительная нагрузка также ложится на вычислительную сложность и самого основного алгоритма (критерий K3). Если бы параметры были установлены в тексте программы как константы, известные при создании машинных кодов, то открывается простор для оптимизаций, реализовать которые сложно или просто невозможно, если эти параметры могут меняться во время работы. Эту нагрузку сложно предсказать и нужно заранее замерять. На современных микроконтроллерах с широкой (32 бита) шиной данных, при использовании ограниченного количества параметров и хорошего оптимизирующего компилятора, можно предполагать ухудшение производительности не более чем на несколько процентов.

С точки зрения, как разработчика управляющей программы (критерий K4), так и пользователя (критерий K5), использование данного метода оказывается довольно простым. Разработчику достаточно добавить ещё одну функцию, обрабатывающую соответствующие сообщения. Пользователь же может использовать готовые интерфейсы, как командной строки, так и графические, чтобы настроить готовое устройство, не открывая его исходный код.

Основной недостаток этого метода в отсутствии гибкости. Невозможно адаптировать модуль к совершенно новому сценарию, который не был описан в исходном коде. Для работы данного метода нет необходимости останавливать работу микроконтроллера.

M2 – Замена кода микроконтроллера

Следующий метод динамического перепрограммирования основан на замене машинного кода, записанного в памяти программ во встраиваемой системе. Примеры реализации подобного подхода обсуждаются в [16, 17].

Для работы данного метода со спецификацией *Cyphal* нужно реализовать обработку сообщений для сервиса вызова обобщённых команд *uavcan.node.ExecuteCommand.1.0*. Одна из обобщённых команд – *COMMAND_BEGIN_SOFTWARE_UPDATE* (запуск обновления программ на встраиваемой системе). Имя файла с новой программой указывается в параметре запроса на эту команду. В ответ на эту команду узел сети совершает сначала запрос *uavcan.file.GetInfo* для получения информации о файле с новыми машинными кодами, а затем *uavcan.file.Read* для получения этого файла по частям.

Существует несколько реализаций данного метода:

1. Отдельная программа – загрузчик.
2. Обновление внутри программы.

Загрузчик (M2.1)

Самым простым и одновременно сложным вариантом обновления машинного кода является использование отдельной программы – загрузчика. Эта программа вызывается средствами самой встраиваемой системы до загрузки основной программы и может выполнять базовую настройку микроконтроллера, а затем вызвать основную программу на исполнение. Вместе с этим у программы загрузчика есть более широкие возможности управления встраиваемой системой, в частности – возможность получить извне и перезаписать управляющую программу.

Далеко не все встраиваемые системы аппаратно поддерживают загрузку с использованием загрузчика (критерий K1). На таких устройствах работу загрузчика нужно либо восполнять программными средствами, либо не пользоваться загрузчиком вообще.

Использование загрузчика уменьшает максимальный объём памяти программ на размер самого загрузчика (критерий K2).

По критерию К3, использование загрузчика не влияет на работу основного алгоритма. Правильно написанный загрузчик полностью отдаёт управление основной подпрограмме, не оставляя следов в оперативной памяти или настройке всей периферии.

Основная сложность загрузчиков кроется, с точки зрения разработчика (критерий К4), в создании (а) достаточно надёжной и (б) небольшой программы. Первое – нужно, чтобы встраиваемая система оставалась в сети, несмотря на ошибки при передаче и/или записи в энергонезависимую часть памяти программ встраиваемой системы. Второе – нужно, чтобы загрузчик смог поместиться в ограниченную и небольшую область памяти программ.

С точки зрения пользователя (критерий К5) сложность этого метода довольно высока – нужно вносить правки напрямую в исходные тексты программ для встраиваемой системы, нужно знать язык программирования исходных текстов, нужно иметь среду программирования и достаточно производительный компьютер. Одна из основных проблем здесь – создание повторяемой у пользователя среды разработки со всеми необходимыми инструментами.

Данный метод предоставляет максимальную гибкость (критерий К6) в модификации и адаптации программного обеспечения, но зависит от поставки исходных кодов программ встраиваемой системы. Также большим как недостатком, так и достоинством данного метода является необходимость останавливать и перезагружать микроконтроллер для обновления программы. Основной алгоритм должен уметь адекватно реагировать на запреты на обновление программного обеспечения.

Обновление внутри программы (M2.2)

Метод обновления внутри программы и следующий метод – обновление части машинного кода – решают проблему обновления программного обеспечения путём сращивания основного и побочного алгоритмов. Обновление производится параллельно с работой основного алгоритма, машинные коды новой программы записываются в отдельную область памяти программ, она проверяется на ошибки и копируется вместо основной программы. После этого управляющая программа запускается вновь.

К сожалению, далеко не все встраиваемые системы могут использовать данный метод, так как для него необходимо иметь возможность менять память программ во время работы (критерий К1).

Данный метод несколько эффективнее использует память программ (критерий К2) за счёт использования тех же коммуникационных механизмов, что и основная программа. Однако основным недостатком данного метода заключается в максимальном объёме памяти программ, который программа может использовать – он сокращён в два раза, чтобы в любой момент работы алгоритм обновления мог записать в память программ очередной кусочек обновления.

Работа алгоритма обновления не занимает дополнительного процессорного времени (критерий К3) в режиме ожидания, а в режиме обновления может работать с низким приоритетом, не мешая режиму реального времени основной программы.

С точки зрения разработчика (критерий К4), реализация данного метода не несёт особой сложности – достаточно создать дополнительный обработчик команд и отдельный «поток», производящий обновление. Но, по сравнению с отдельным загрузчиком, сложность оказывается ниже за счёт снижения требований к объёму кода и наличия возможности разделить код сетевого взаимодействия с основной программой.

Для пользователя (критерий К5) использование данного метода по сложности сравнимо со сложностью метода с загрузчиком – также нужно получить правильно настроенную среду разработки, знать и уметь использовать язык программирования, на котором написаны исходные тексты. Однако, в связи с ограничением на размер прошивки, пользователь также может быть вынужден проводить дополнительную оптимизацию программы, чтобы она смогла поместиться в сокращённую вдвое область памяти программ.

Гибкость применения (критерий К6) данного метода выше, чем у метода с загрузчиком из-за меньшего времени простоя микроконтроллера – долгие операции получения новой прошивки интегрированы в основной алгоритм, основное время простоя происходит в момент копирования и перезапуска управляющей программы.

M3 – Замена байткода

Метод замены байткода основан на том, что на встраиваемой системе вместо основной программы запускается программный интерпретатор кодов, отличных от машинного кода самой встраиваемой системы, т.е. программный процессор байткода. На данный момент существует множество разных программных процессоров байткода со своими особенностями. Пример такого программного процессора приведён в работе [18].

Данный метод может использовать методы межмодульной коммуникации согласно спецификации *Cyphal* по аналогии с двумя предыдущими методами. В случае использования параметрического перепрограммирования, байткод управляющей программы записывается в параметр (регистр) типа «неструктурированный массив». Если же используется обновление через файл (см. прошлый раздел), то вместо обновления машинных кодов, производится обновление области памяти программ, отвечающей за хранение байткода.

С точки зрения производительности, программный процессор байткода будет всегда кратно медленнее, чем аналогичный код в машинных кодах. Сам программный процессор может занимать значительные объёмы памяти программ и данных. Небольшого улучшения скорости работы можно добиться за счёт переноса сложных вычислительных операций в машинный код программного процессора. Из-за этого данный метод может быть неприменим на встраиваемых системах с узкой (8 и 16 бит) шиной данных и небольшими (до 1 кБ) объёмами памяти программ и данных (критерии К1-К3).

С точки зрения разработчика (критерий К4) программного обеспечения, в данном методе основную сложность составляет выбор и перенос на встраиваемую систему существующего программного процессора, а также разработка дополнительных механизмов взаимодействия этого программного процессора с периферийными устройствами микроконтроллера. Также разработчик должен предоставить пользователю программу-транслятор какого-либо языка высокого уровня в байткод программного процессора. Если используется байткод существующего интерпретируемого языка программирования, то эта задача существенно упрощается.

Для пользователя (критерий К5) данный метод оказывается проще, чем использование замены машинных кодов (М2), но требует знания и использования какого-либо языка высокого уровня или даже программирования в байткодах. Однако цикл разработки существенно упрощается, так как программа-транслятор с языков высокого уровня может быть гораздо проще в настройке и установке, чем наборы инструментов для работы с машинным кодом встраиваемой системы.

Гибкость (критерий К6) данного метода существенно ниже, чем у метода замены машинных кодов из-за меньшего объёма возможных алгоритмов: сложный алгоритм в байткоде может не уложиться в ограничение на скорость работы в реальном времени, а тот же алгоритм, преобразованный в машинный код и интегрированный в программный процессор, может не дать ту гибкость подстройки, которую дала бы полная замена машинных кодов. Из-за этого разработчику приходится балансировать в месте реализации алгоритмов основной программы (байткод или машинный код), а пользователь вынужден мириться с этим балансом при адаптации своих алгоритмов.

М4 - Замена скрипта на интерпретируемом языке программирования

Данный метод базируется на методе замены байткода и имеет схожие характеристики. В этом методе на встраиваемую систему присылается не байткод, а исходный код на языке высокого уровня, который далее исполняется напрямую или с использованием трансляции в байткод. Пример такого интерпретатора приведён в работе [18].

Данный метод требует более высокой производительности встраиваемой системы – необходимо выполнить такой же или больший объём вычислений, по сравнению с программным процессором байткода (критерии К1, К3). Из-за необходимости разбирать текст языка программирования для прямой интерпретации или преобразования в байткод, повышаются объём машинного кода и объём данных. Также из-за использования текста в качестве программы повышаются требования к объёму памяти интерпретируемых программ (критерий К2).

По сравнению с байткодом на плечи разработчика (критерий К4) также ложится перенос и оптимизация программы-транслятора на встраиваемой системе. Также в данном методе повышаются требования к механизмам обработки и информирования об ошибках – пользователь должен получать сообщения, если в его программе допущены какие-либо синтаксические или логические ошибки.

С точки зрения пользователя (критерий К5) данный метод несколько сложнее параметрического перепрограммирования, т.к. подразумевает владение языком программирования высокого уровня. Однако же этот метод существенно проще метода замены байткода – нет необходимости устанавливать программу-транслятор.

В смысле гибкости (критерий К6) данный метод сравним с методом замены байткода. Однако, из-за необходимости работать с текстовым представлением команд

разработчику приходится ещё усерднее искать баланс между алгоритмами, закладываемыми в машинный код, и алгоритмами, предоставляемыми пользователем.

Заключение

На данный момент существует множество разных способов динамического перепрограммирования. Среди представленных в статье, наиболее простым в применении является метод М1 – параметрическое перепрограммирование. Метод реализуем на любых встраиваемых системах, в отличие от остальных методов, которые требуют или аппаратной поддержки некоторых функций (замена машинного кода – М2), и/или большого объёма памяти программ и данных (замена байткода (М3), или программы на интерпретируемом языке программирования (М4)), однако он наименее гибок. Самыми простыми для пользователя являются методы М1 и М4, так как не требуют специального программного обеспечения или дополнительных знаний. Метод М2 идеален для случаев использования встраиваемых систем с наименьшим объёмом памяти программ и данных. Метод М3 хорош в том случае, если необходима гибкость метода М4, но применить М4 не позволяет использование встраиваемой системы, которая не обладает соответствующими параметрами.

Кроме проведённого анализа перечисленных методов по шести критериям предполагается в перспективе экспериментально проверить реализуемость каждого метода на микроконтроллерах семейств *STM32F103*, *GD32VF103*, *ESP32* и микрокомпьютерах *Raspberry Pi* и *Orange Pi*.

Литература

1. Попов Е.П., Письменный Г.В. Основы робототехники: введение в специальность. – М.: Высшая школа, 1990. 224 с.
2. Лопота А.В., Юревич Е.И. Этапы и перспективы развития модульного принципа построения робототехнических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 1. С. 98-103.
3. Платонов А.К. Робототехника лунной базы // XXXIV Чтения по космонавтике. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2010.
4. Андреев В.П., Ким В.Л., Эприков С.Р. Аппаратно-программный фреймворк для разработки модульных мобильных роботов с иерархической архитектурой // Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел IV. Связь, навигация и наведение. Таганрог: Изд-во ФГАОУ ВО Южный федеральный университет, ISSN 1999-9429. 2020. №1(211). С. 199-218.
5. Андреев В.П., Ким В.Л., Плетенев П.Ф. Принцип полной функциональности модулей в гетерогенных модульных мобильных роботах / Экстремальная робототехника (ЭР-2017). Труды международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017. С.81–91.
6. Андреев В.П., Плетенев П.Ф. Метод информационного взаимодействия для систем распределённого управления в роботах с модульной архитектурой // Труды СПИИРАН. 2018. № 2 (57). С. 134-160.
7. Андреев В.П. Система управления модульных мобильных роботов как мультиагентная система с пирамидальной топологией // "Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки", ISSN 1560-3644. 2020. № 3(207). С. 41-54.
8. S. Herbrechtsmeier, T. Korthals, T. Schopping, U. Ruckert AMiRo: a modular & customizable open-source mini robot platform // 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia. 2016. pp.687-692.
9. Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities / Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang & Aiguo Song // Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2012. pp.1331-1336.
10. Baca J., Ferre M., Aracil R. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks // Robotics and Autonomous Systems. 2012. vol. 60. no. 4. pp. 522–531.
11. R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping / A. Bonarini, M. Matteucci, M. Migliavacca, D. Rizzi // Robotics and Autonomous Systems. 2014. No.62. pp.1073-1084.
12. Distributed and modular CAN-based architecture for hardware control and sensor data integration / D.P. Losada, J.L. Fernández, E. Paz, Rafael Sanz // Sensors. 2017. No.17. pp.1013-1030.
13. L. Peng, F. Guan, L. Perneel, H. Fayyad-Kazan and M. Timmerman EmSBoT: A lightweight modular software framework for networked robotic systems // 2016 3rd International

Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), Beirut, 2016, pp.216-221. doi: 10.1109/ACTEA.2016.7560142.

14. Andreev, Victor & Pletenev, Pavel. Problems of Choosing an Intermodule Information Interaction Protocol for Mobile Robots with Modular Control System Architecture, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, pp.0151-0157, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.

15. Kirienko P., Dixon S, et al. OpenCyphal: Open technology for real-time intravehicular distributed computing and communication based on modern networking standards. URL: https://opencyphal.org/specification/Cyphal_Specification.pdf.

16. Lobdell M. Robust over-the-air firmware updates using program flash memory swap on kinetis microcontrollers // Freescale Application Note, p. AN4533. 2012.

17. Jaouhari S. E., Bouvet E. Secure firmware Over-The-Air updates for IoT: Survey, challenges, and discussions // Internet of Things. 2022. (18). C. 100508.

18. Zandberg K., Baccelli E. Minimal virtual machines on IoT microcontrollers: The case of berkeley packet filters with rbpf // arXiv preprint arXiv:2011.12047. 2020.

Авторы публикации

Андреев Виктор Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Сенсорные и управляющие системы» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»).

Плетенев Павел Филиппович – аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»), инженер АО «ВНИИЖТ».

References

1. Popov E.P., Pis'mennyi G.V. *Osnovy robototekhniki: vvedenie v spetsial'nost'*. M.: Vysshaya shkola, 1990. 224 p.

2. Lopota A.V., Yurevich E.I. Etapy i perspektivy razvitiya modul'nogo printsipa postroeniya robototekhnicheskikh system. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*. 2013. № 1. Pp. 98-103.

3. Platonov A.K. Robototekhnika lunnoi bazy. XXXIV Chteniya po kosmonavtike. IPM im. M.V. Keldysha RAN, 2010.

4. Andreev V.P., Kim V.L., Eprikov S.R. Apparato-programmnyi freimvork dlya razrabotki modul'nykh mobil'nykh robotov s ierarkhicheskoi arkhitekturoi. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Razdel IV. Svyaz', navigatsiya i navedenie*. Taganrog: Izd-vo FGAOU VO Yuzhnyi federal'nyi universitet, ISSN 1999-9429. 2020. №1(211). p. 199-218.

5. Andreev V.P., Kim V.L., Pletenev P.F. *Printsip polnoi funktsional'nosti modulei v geterogennykh modul'nykh mobil'nykh robotakh*. Ekstremal'naya robototekhnika (ER-2017). Trudy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii. Sankt-Peterburg: IPTs OOO «Politekhnika-print», 2017. pp.81-91.

6. Andreev V.P., Pletenev P.F. *Metod informatsionnogo vzaimodeistviya dlya sistem raspredelenogo upravleniya v robotakh s modul'noi arkhitekturoi*. Trudy SPIIRAN. 2018. № 2 (57).pp. 134-160.

7. Andreev V.P. Sistema upravleniya modul'nykh mobil'nykh robotov kak mul'tiagentnaya sistema s piramidal'noi topologiei. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Tekhnicheskie nauki*", ISSN 1560-3644. 2020. № 3(207). pp. 41-54.

8. Herbrechtsmeier, T. Korthals, T. Schopping, U. Ruckert *AMiRo: a modular & customizable open-source mini robot platform*. 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia. 2016. pp.687-692.

9. *Design of Transmote: a Modular Self-Reconfigurable Robot with Versatile Transformation Capabilities*. Guifang Qiao, Guangming Song, Jun Zhang, Hongtao Sun, Weiguo Wang & Aiguo Song. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2012. pp.1331-1336.

10. Baca J., Ferre M., Aracil R. A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks. *Robotics and Autonomous Systems*. 2012. vol. 60. no. 4. pp. 522–531.

11. R2P: An open source hardware and software modular approach to robot prototyping / A. Bonarini, M. Matteucci, M. Migliavacca, D. Rizzi . *Robotics and Autonomous Systems*. 2014. No.62. pp.1073-1084.

12. D. P. Losada, J. L. Fernández, E. Paz, Rafael Sanz Distributed and modular CAN-based architecture for hardware control and sensor data integration. *Sensors*. 2017. No.17. pp.1013-1030.
13. EmSBOT: A lightweight modular software framework for networked robotic systems / L. Peng, F. Guan, L. Perneel, H. Fayyad-Kazan and M. Timmerma. 2016 3rd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), Beirut, 2016, pp.216-221. doi: 10.1109/ACTEA.2016.7560142.
14. Andreev Victor & Pletenev Pavel. Problems of Choosing an Intermodule Information Interaction Protocol for Mobile Robots with Modular Control System Architecture, Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium, pp.0151-0157, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-33-4, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria.
15. Kirienko P, Dixon S, et al. OpenCyphal: Open technology for real-time intravehicular distributed computing and communication based on modern networking standards. URL: https://opencyphal.org/specification/Cyphal_Specification.pdf.
16. Lobdell M. Robust over-the-air firmware updates using program flash memory swap on kinetis microcontrollers // Freescale Application Note, p. AN4533. 2012.
17. Jaouhari S. E., Bouvet E. Secure firmware Over-The-Air updates for IoT: Survey, challenges, and discussions // Internet of Things. 2022. (18). C. 100508.
18. Zandberg K., Baccelli E. Minimal virtual machines on IoT microcontrollers: The case of berkeley packet filters with rbpf // arXiv preprint arXiv:2011.12047. 2020.

Authors of the publication

Victor P. Andreev – Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia.

Pavel F. Pletenev – Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia, engineer at AO "VNIIZhT", Moscow, Russia.

Получено 23.05.2022г.

Отредактировано 30.05.2022г.

Принято 30.05.2022г.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С ПОВЫШЕННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МОМЕНТОМ

А.Г. Городнов¹, В.Ю. Корнилов², Е.Ю. Федоров¹

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ, г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
gorodnov_kai@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы определения энергетических параметров мехатронных модулей электротехнических комплексов для добычи нефти с погружными электроцентробежными насосами. Разработать методику определения параметров схемы замещения погружного электродвигателя, как электромеханического модуля движения центробежного насоса для добычи нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя. Разработать методику расчета энергетических показателей мехатронных модулей электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами. Провести имитационное моделирование погружного электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись методы оптимизации по коэффициенту полезного действия, методы коррекции коэффициента мощности, методы расчета электромагнитного поля конечными элементами, методы математического и компьютерного моделирования в программном комплексе ELCUT. РЕЗУЛЬТАТЫ. Повышение энергоэффективности и снижение затрат при эксплуатации погружных насосных установок добычи нефти представляет собой актуальную проблему и требует обоснованного решения. Цена извлеченной нефти зависит от следующих показателей, таких как климатические условия, используемое оборудование, глубина залежей нефти, отдаленность месторождения от центральных дорог и так далее. К наиболее существенным энергоемким процессам при добыче нефти относятся: электромеханизированное извлечение нефти, транспортировка нефти, система поддержания пластового давления. Предложена методика нахождения параметров схемы замещения погружного электродвигателя для добычи нефти и исследование воздействия компенсации реактивной мощности на электрический двигатель в нефтяной скважине при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса. Предложена методика расчета энергетических показателей мехатронных модулей электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами. Расчет компенсирующего устройства в нефтяной скважине для электроцентробежного насоса с частотно-регулируемым электроприводом нужно реализовывать с учетом наибольшего значения выдаваемой частоты сети. Произведено имитационное моделирование электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством для установления воздействия компенсирующего устройства реактивной мощности внутри нефтяной скважины на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти. Представлены показатели электромагнитного момента и электромагнитного поля электродвигателя для добычи нефти без подключенного компенсирующего устройства и с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. При проведении исследования влияния непосредственно подключенного компенсирующего устройства на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти определено, что дополнительные обмотки непосредственно подключенного компенсирующего устройства реактивной мощности, проложенные под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя повышают коэффициент полезного действия и электромагнитный момент

электрического двигателя для добычи нефти соответственно на 11% и 15%.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; мехатронные модули; нефтедобыча; погружной электродвигатель, как электромеханический модуль движения; реактивная мощность; схема замещения; электромагнитный момент

Для цитирования: Городнов А.Г., Корнилов В.Ю., Федоров Е.Ю. Методика определения параметров схемы замещения электромеханического модуля с повышенным электромагнитным моментом // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 185-197. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197.

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A SUBSTITUTION SCHEME FOR AN ELECTROMECHANICAL MODULE WITH AN INCREASED ELECTROMAGNETIC MOMENT WITH INCREASED ELECTROMAGNETIC TORQUE

A.G. Gorodnov¹, V.Yu. Kornilov², E.Yu. Fedorov¹

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gorodnov_kai@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the problems of determining the energy parameters of electrical equipment elements of electrical complexes for oil production with submersible electric centrifugal pumps. Develop a methodology for determining the parameters of the equivalent circuit of an electric motor for oil production when connecting compensating devices to the terminals of the electric motor of a submersible pump. Develop a methodology for calculating the energy performance of electrical equipment elements of an electrical complex with electric centrifugal pumps. Carry out simulation modeling of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device. *METHODS.* When solving the tasks set, optimization methods were used in terms of efficiency, power factor correction methods, methods for calculating the electromagnetic field by finite elements, methods of mathematical and computer modeling in the ELCUT software package. *RESULTS.* Improving energy efficiency and reducing costs in the operation of submersible pumping units for oil production is an urgent problem and dictates a reasonable solution. The price of extracted oil depends on the following indicators, such as climatic conditions, equipment used, depth of oil deposits, remoteness of the field from central roads, and so on. The most significant energy-intensive processes in oil production include: electromechanized oil extraction, oil transportation, reservoir pressure maintenance system. A technique for finding the parameters of the equivalent circuit of an electric motor for oil production and a study of the effect of reactive power compensation on an electric motor in an oil well when compensating devices are connected to the terminals of the electric motor of a submersible pump are proposed. A method for calculating the energy performance of electrical equipment elements of an electrical complex with electric centrifugal pumps is proposed. The calculation of a compensating device in an oil well for an electric centrifugal pump with a frequency-controlled electric drive must be implemented taking into account the highest value of the output network frequency. Simulation modeling of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device was carried out to establish the effect of a reactive power compensating device inside an oil well on the rotating electromagnetic moment of an electric motor for oil production. The indicators of the electromagnetic torque and the electromagnetic field of an electric motor for oil production without a connected compensating device and with a directly connected compensating device are presented, the supply wires of which in the first version are laid along a single route and in the second version are laid at an angle of 120 ° relative to each other in the corresponding grooves of the stator winding of the electric engine for oil production. *CONCLUSION.* When conducting a study of the effect of a directly connected compensating device on the electromagnetic torque of an electric motor for oil production, it was determined that additional windings of a directly connected reactive power compensating device, laid at an angle of 120 ° relative to each other in the corresponding grooves of the stator winding of the electric motor, increase the efficiency and

electromagnetic torque of an electric motor for oil production by 11% and 15%, respectively.

Keywords: *electrotechnical complex; oil production; submersible motor; reactive power; equivalent circuit; electromagnetic torque.*

For citation: Gorodnov A.G, Kornilov V.Yu., Fedorov E.Yu. Method for determining the parameters of a substitution scheme for an electromechanical module with an increased electromagnetic moment with increased electromagnetic torque. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 185-197. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-185-197.

Введение

Актуальность темы заключается в повышении энергоэффективности элементов электрооборудования при извлечении нефти и снижении расходов при использовании насосных установок добычи нефти. В существующих условиях нефтегазовые предприятия являются важнейшим бюджетным сектором стран, обладающими соответствующими нефтяными и газовыми ресурсами. Цена извлеченной нефти зависит от следующих показателей, таких как климатические условия, используемое оборудование, глубина залежей нефти, отдаленность месторождения от центральных дорог и т.д. К наиболее существенным энергоемким процессам при добыче нефти относятся: электромеханизированное извлечение нефти, транспортировка нефти, система поддержания пластового давления [1-3]. Например, в Российской Федерации общее энергопотребление нефтяной промышленностью достигает около 50 миллиардов киловатт в час за год.

При электромеханизированном извлечении нефти применяются насосы следующих видов: электроцентробежные насосы, винтовые насосы, глубинные штанговые насосы. Большая часть нефтяных скважин (54%) оборудована погружными электроцентробежными насосами и с помощью погружных электроцентробежных насосов извлекается около 75% нефти [4-6].

Высокая волатильность нефти и большие колебания цены нефти, с постоянно происходящим возрастанием тарифов на электрическую энергию приводят к нестабильности рынка энергоресурсов. Это в свою очередь побуждает искать способы и методы уменьшения расходов нефтедобывающих предприятий, к которым можно отнести повышение энергоэффективности элементов электрооборудования электротехнического комплекса добычи нефти.

Потребность в увеличении энергоэффективности элементов электрооборудования электротехнического комплекса добычи нефти имеет важное значение в труднодоступных областях, где доступность централизованной системы электроснабжения проблематична. Создание автономной системы электроснабжения на нефтедобывающем промысле имеет огромную стоимость, которая приводит в последующем к увеличенной стоимости тарифов на электрическую энергию.

Система электроснабжения на нефтедобывающем промысле охватывает следующие энергоемкие процессы:

- а) электромеханизированное извлечение нефти;
- б) система транспортирования нефти;
- в) система поддержания пластового давления.

Основная часть скважин с электромеханизированным извлечением нефти (54%) оснащена электроцентробежными насосами (ЭЦН), около 41% нефтяных скважин применяют штанговые глубинные насосы (ШГН). Остальные технологии извлечения нефти применяются реже: 3% фонтанирующие нефтяные скважины и 2% это все остальные способы извлечения нефти.

С использованием электрических центробежных насосов извлекается около 75% всей нефти, однако эффективность данных установок ниже чем погружных насосов. Главными потребителями электрической энергии на нефтедобывающих предприятиях являются электроприводы погружных насосов.

Для подъема и перекачки нефти, поддержания пластового давления на нефтедобывающих предприятиях используются управляемые электроприводы с соответствующими преобразователями частоты. Применение таких устройств с одной стороны приводит к целесообразному потреблению электрической энергии, но, с другой точки зрения это приводит к несинусоидальности токов и напряжений в электрической сети, что в свою очередь снижает качество электрической энергии.

Основным фактором данной проблемы является аппаратура, обладающая нелинейностью вольт-амперной характеристики. Преобразователь частоты - это характерная нелинейная нагрузка. Преобразователь частоты с широтно-импульсной модуляцией широко применяется в электроприводе для регулирования скорости асинхронного двигателя, что позволяет классифицировать такой привод, как электромеханический модуль движения мехатронной системы основного оборудования добывающей скважины. Применение таких преобразователей частоты в электротехнических комплексах с различными режимами работы может уменьшить потребление электрической энергии на 10-25%.

Основной проблемой использования погружных насосных установок добычи нефти (рис. 1) является низкий коэффициента полезного действия (0,75) кабельной линии, протяжённость которой составляет до 3 км [7-9]. Среди немногочисленных способов и методов увеличения коэффициента полезного действия элементов электрооборудования электротехнического комплекса возможно применение компенсирующих устройств для уменьшения реактивной мощности, которая в свою очередь приводит к уменьшению полной мощности [10-12].

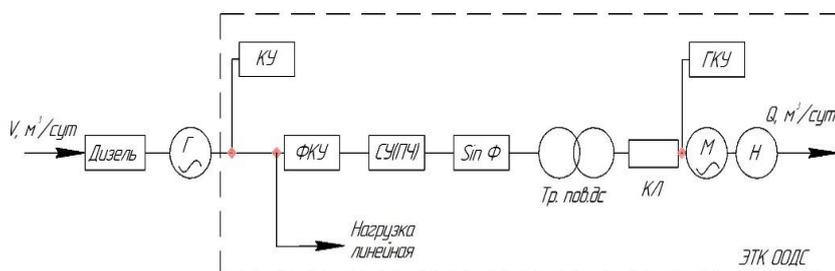


Рис. 1. Элементы электротехнического комплекса нефтедобычи

Fig. 1. Elements of the electrical complex of oil production

На рис. 1 отмечено: ЭТК ООДС – электротехнический комплекс основного оборудования добывающей скважины; Г – генератор; Тр. пов.дс – повышающий трансформатор добывающей скважины; ФКУ – фильтрокомпенсирующее устройство (выполняет роль сетевого фильтра); СУ (ПЧ) – станция управления с преобразователем частоты; SinФ – синус-фильтр; КЛ – кабельная линия; М – погружной электродвигатель; КУ – компенсирующее устройство; ГКУ – глубинное компенсирующее устройство; Н – насос; V – суточный расход топлива в центрах генерации, м³/сут; Q – суммарный дебит добывающей скважины, м³/сут.

Преобразователь частоты, входящий в ЭТК ООДС способствует плавному пуску и управлению скоростью вращения электрического двигателя для добычи нефти, но из негативных явлений следует отметить, что данное устройство формирует в общую сеть высшие гармонические составляющие, приводящие к уменьшению коэффициента мощности. Для устранения высших гармонических составляющих возможно применение фильтрокомпенсирующих устройств с одновременным увеличением коэффициента мощности [13-14].

Расходуемая насосом мощность состоит из мощности, потребляемой на извлечение нефти, то есть полезной мощности, а также потерь мощности в насосе. Основные потери мощности при извлечении нефти электроцентробежным насосом изображены на рис. 2.

В данной работе предлагается методика нахождения параметров схемы замещения погружного электродвигателя для добычи нефти и исследование воздействия компенсации реактивной мощности на электрический двигатель в нефтяной скважине при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса.

Научная значимость заключается в разработке методики определения параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя для добычи нефти при непосредственном подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса и методики расчета энергетических показателей элементов электрооборудования электротехнического комплекса с электроцентробежными насосами, обеспечивающие повышение коэффициента полезного действия электротехнического комплекса добывающей скважины.

Практическая значимость заключается в повышении коэффициента полезного действия электротехнического комплекса добывающей скважины с асинхронным погружным электродвигателем с дополнительными обмотками и устройством компенсации реактивной мощности для установки электроцентробежного насоса добычи нефти и техническими рекомендациями по проектированию электротехнического комплекса с погружным электродвигателем для установки электроцентробежного насоса добычи нефти, которые обеспечивают снижение удельного расхода электроэнергии на единицу объема добываемой нефти не менее чем на 10%.

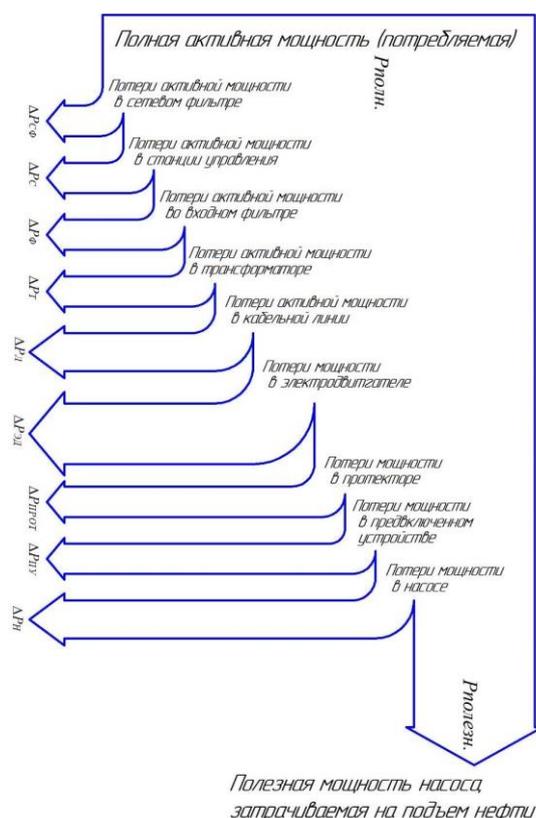


Рис. 2. Потери активной мощности при извлечении нефти ЭЦН

Fig. 2. Loss of active power during oil extraction by an electric submersible pump

Материалы и методы

Поправка коэффициента мощности благодаря применению компенсирующих устройств реактивной мощности и поправка коэффициента мощности благодаря уменьшению гармоник тока позволяет получить некоторые положительные результаты. Первый результат сводится к тому, что уменьшается полная мощность, что далее приводит к снижению расхода электрической энергии. Второй результат сводится к тому, что с понижением реактивной мощности снижается ток, проходящий через элементы электрооборудования электротехнического комплекса для извлечения нефти.

Методика нахождения параметров элементов электрооборудования электротехнического комплекса ЭЦН состоит из следующих пунктов [15-16]:

1. Определение параметров электродвигателя для извлечения нефти согласно характеристикам ЭЦН.
2. Определение мощности отдельного компенсирующего устройства электродвигателя для извлечения нефти.
3. Определение параметров кабельной линии электрического двигателя для извлечения нефти.
4. Определение параметров синус-фильтра, исходя из поправки коэффициента мощности.
5. Определение параметров трансформатора, повышающего напряжение.
6. Определение параметров преобразователя частоты для частотно-регулируемого электропривода.
7. Определение параметров фильтрокомпенсирующего устройства.

8. Определение параметров компенсирующего устройства на стороне 0,4кВ понижающего трансформатора.

9. Определение параметров трансформатора 0,4кВ.

10. Разработка системы электроснабжения элементов электрооборудования электротехнического комплекса для добычи нефти.

Определение параметров отдельного глубинного компенсирующего устройства электродвигателя для извлечения нефти с частотно-регулируемым электроприводом нужно производить исходя из наибольшей частоты электрической сети, данное условие обосновано для предупреждения режима перекомпенсации.

Результаты исследования соотношений емкостной реактивной мощности и индуктивной реактивной мощностей компенсирующего устройства электрического двигателя для извлечения нефти от частоты электрической сети изображены на рис. 3. Согласно данным исследованиям, например, для частоты 55Гц необходимо подобрать поправочный коэффициент, составляющий значение 0,77.

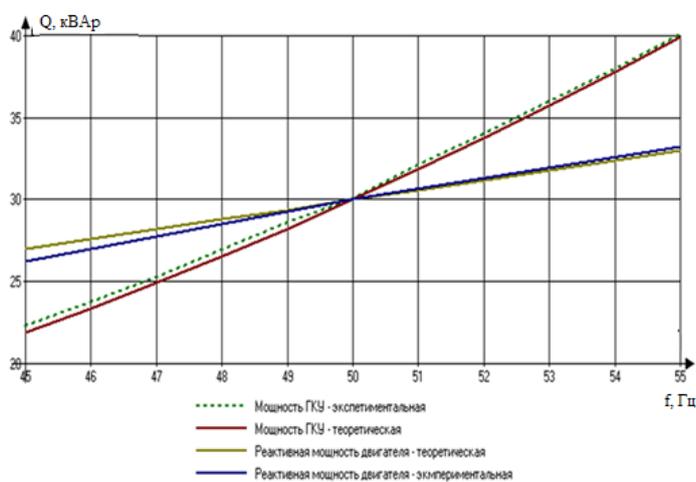


Рис. 3. Соотношения емкостной реактивной мощности и индуктивной реактивной мощностей компенсирующего устройства электрического двигателя для извлечения нефти от частоты электрической сети

Fig. 3. Ratios of capacitive reactive power and inductive reactive power of the compensating device of the electric motor for oil extraction from the frequency of the electrical grid

Для нахождения параметров элементов электрооборудования электротехнического комплекса ЭЦН разработана схема замещения электродвигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти [17] (рис. 5).

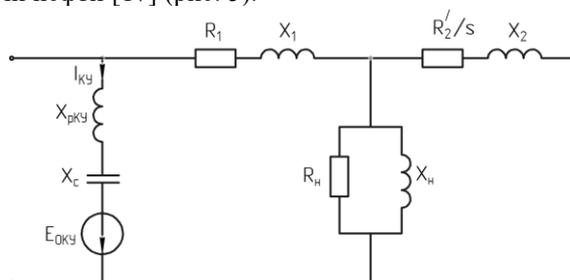


Рис. 4. Схема замещения электрического двигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующего устройства к клеммам электродвигателя ЭЦН

Fig. 4. The equivalent circuit of an electric motor for oil recovery when a compensating device is connected to the terminals of the ESP motor

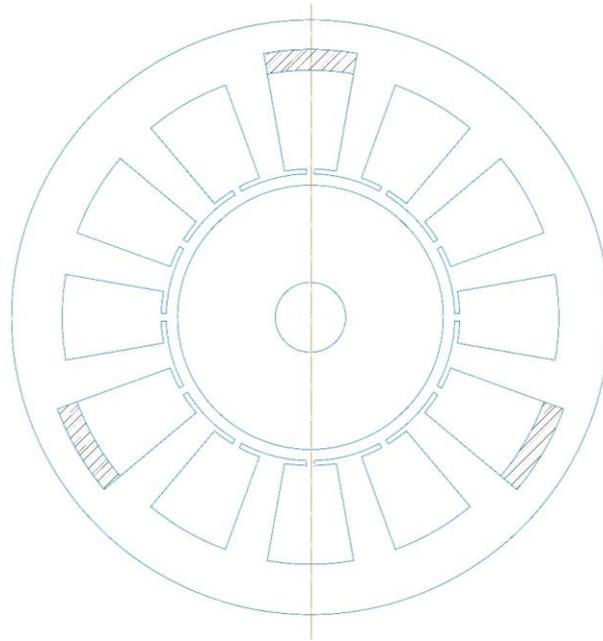


Рис. 5. Расположение проводов компенсирующего устройства в пазах обмотки статора электродвигателя

Fig. 5. Arrangement of the wires of the compensating device in the grooves of the stator winding of the electric motor

Емкостное реактивное сопротивление:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

где ω - угловая частота, C - емкость конденсатора.

Полная реактивная мощность компенсирующего устройства (КУ):

$$Q_{КУ} = \frac{U^2}{X_c} \quad (2)$$

где U - напряжение в сети.

Напряжение на емкостном элементе:

$$U_c = U_1 - jX_{pКУ} I_{КУ} - E_{0КУ} \quad (3)$$

где U_1 - напряжение в статоре, $X_{pКУ}$ - сопротивление компенсирующего устройства, $I_{КУ}$ - ток компенсирующего устройства, $E_{0КУ}$ - ЭДС КУ.

$$Q_{КУ} = Q_{pКУ} + Q_1 + Q_2 + Q_n \quad (4)$$

где $Q_{pКУ}$ - реактивная мощность КУ, Q_1 - реактивная мощность в статоре двигателя, Q_2 - реактивная мощность в роторе двигателя, Q_n - реактивная мощность нагрузки.

$$Q_{pКУ} = X_{pКУ} I_{КУ}^2 \quad (5)$$

$$Q_1 = X_1 I_2^2 \quad (6)$$

где X_1 - реактивное сопротивление статора, I_2 - ток ротора.

$$Q_2 = X_2 I_2^2 \quad (7)$$

где X_2 - реактивное сопротивление ротора.

$$Q_n = X_n I_n^2 \quad (8)$$

где X_n - реактивное сопротивление нагрузки, I_n - ток нагрузки.

$$E_{0КУ} = \kappa_{обКУ} E_1 \quad (9)$$

где $\kappa_{обКУ}$ - обмоточный коэффициент компенсирующего устройства, E_1 - ЭДС статора.

Так как $E_1 \approx U_1$, тогда:

$$E_{\text{ОКУ}} = \kappa_{\text{обКУ}} U_1 \quad (10)$$

$$\kappa_{\text{ОКУ}} = \frac{W_1 \kappa_{\text{об1}}}{\kappa_{\text{обКУ}}} \quad (11)$$

$$\kappa_{\text{обКУ}} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

Результаты и обсуждение

Для создания имитационной модели разработанной установки ЭЦН с электродвигателем, к клеммам которого подключено компенсирующее устройство, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя можно воспользоваться специализированной программой ELCUT. ELCUT - это актуальная программа для имитационного моделирования тепловых, механических и электромагнитных задач способом конечных элементов. Данная специализированная программа позволяет осуществлять решение таких задач как:

а) определение параметров электрического поля:

- электростатическое поле.
- электрическое поле от постоянных токов.
- электрическое поле от переменных токов.
- электрическое поле нестационарное.

б) определение параметров магнитного поля:

- магнитостатическое поле.
- магнитное поле от переменных токов (в том числе вихревых токов).
- магнитное поле нестационарное (в том числе нелинейных материалов и вихревых токов).

Для решения задачи имитационного моделирования магнитного поля, возникающего от переменных токов необходимо указать электропроводность, две составляющих магнитной проницаемости и реальный источник электромагнитного поля.

К первоначальным параметрам электрического двигателя для извлечения нефти относятся: коэффициент полезного действия, коэффициент мощности, мощность, напряжение, ток статора, скольжение, частота электрической сети, число пар полюсов, кратность пускового момента, частота вращения вала, момент инерции, кратность пускового тока [18-19].

Цель эксперимента – определение воздействия компенсирующего устройства реактивной мощности, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя ЭЦН для извлечения нефти.

План эксперимента:

1. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента погружного электродвигателя без компенсатора реактивной мощности.

2. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента электродвигателя ЭЦН для извлечения нефти, питающие провода компенсирующего устройства прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенными по одной трассе.

3. Получить значение полного вращающего электромагнитного момента электродвигателя ЭЦН для извлечения нефти, питающие провода компенсирующего устройства прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенные под углом 120° относительно друг друга

На рис. 6-8 представлены результаты исследования электромагнитного поля и электромагнитного момента погружного электродвигателя без компенсирующего устройства реактивной мощности и с компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя, проложенные по одной трассе и под углом 120° относительно друг друга.

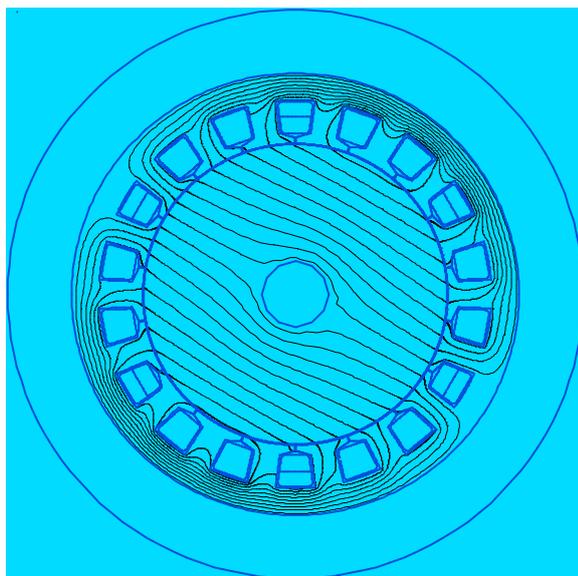


Рис. 6. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя ЭЦН без компенсирующего устройства реактивной мощности ($M = 14301 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

Fig. 6. Total electromagnetic torque of the ESP motor without a reactive power compensating device ($M = 14301 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя ЭЦН без компенсирующего устройства реактивной мощности $M = 14301 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются по единой трассе в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя $M = 14265 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя $M = 16111 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

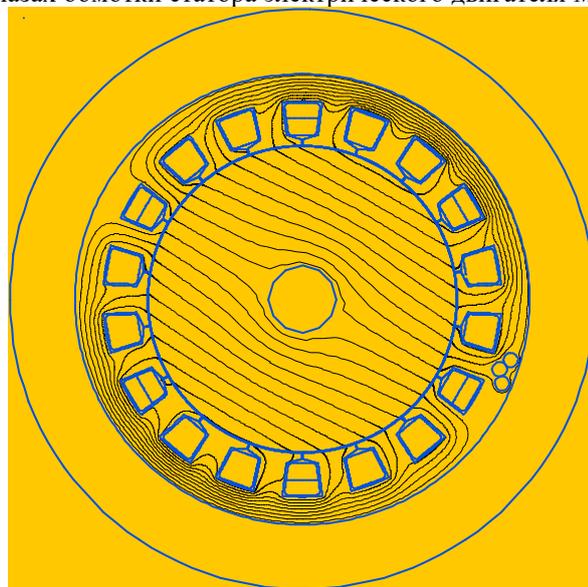


Рис. 7. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются по единой трассе ($M = 14265 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

Fig. 7. Total electromagnetic torque of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device, the supply wires of which are laid along a single route ($M = 14265 \text{ N}\cdot\text{m}$)

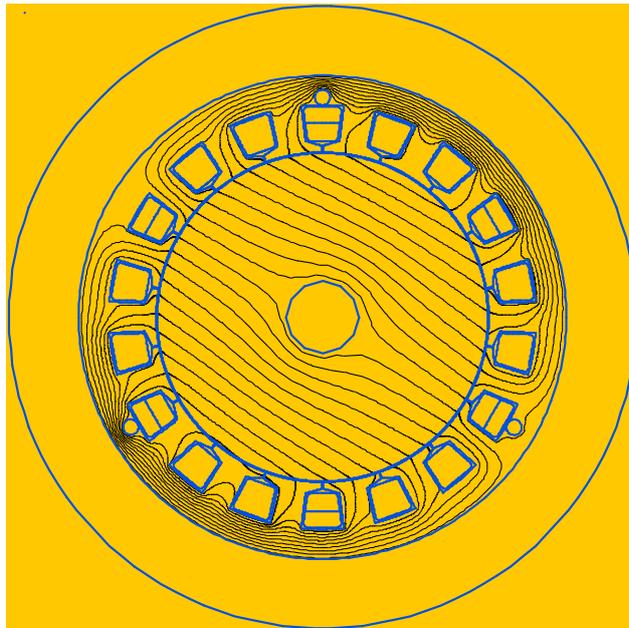


Рис. 8. Полный вращающий электромагнитный момент электродвигателя для добычи нефти с непосредственно подключенным компенсирующим устройством, питающие провода которого прокладываются под углом 120° относительно друг друга ($M = 16111 \text{ Н}\cdot\text{м}$)

Fig. 8. Total electromagnetic torque of an electric motor for oil production with a directly connected compensating device, the supply wires of which are laid at an angle of 120° relative to each other ($M = 16111 \text{ N}\cdot\text{m}$)

Выводы

При проведении исследования влияния непосредственно подключенного компенсирующего устройства на вращающий электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти определено, что дополнительные обмотки непосредственно подключенного компенсирующего устройства реактивной мощности, проложенные под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя повышают коэффициент полезного действия и электромагнитный момент электрического двигателя для добычи нефти соответственно на 11% и 15%.

Разработана методика расчета и определения параметров схемы замещения электродвигателя для извлечения нефти при подключении компенсирующих устройств к клеммам электродвигателя погружного насоса, питающие провода которого в первом варианте прокладываются по единой трассе и во втором варианте прокладываются под углом 120° относительно друг друга в соответствующих пазах обмотки статора электрического двигателя для добычи нефти.

Литература

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. - 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. - 440 p.
2. Xiaodong Liang, Ahmad El-Kadri, "Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation" in Electrical Power and Energy Conference (EPEC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
3. O.V. Thorsen, M. Dalva, "Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps" in Transactions on Industry Applications, 2001, Volume 37, Issue 2. pp. 541-547
4. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. - Volume 53, Issue 3. – pp. 3164-3174
5. A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat, "A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system" in International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). Conference Paper. Publisher: IEEE. 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.

6. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez, "Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique" in *ANDESCON*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.

7. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. ABB. 2018. 58 p.

8. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, F. F. Khusainov and I. N. Shafikov, "Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076285.

9. J. Zhang and J. Wan, "Application of the cable laying coiled tubing in electric submersible pump," 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP), 2021, pp. 293-296, doi: 10.1109/ICMSP53480.2021.9513368.

10. I. Shafikov and M. Khakimyanov. Assessment of Reliability of the Electric Submersible Pump Variable Frequency Drive. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112074.

11. F.A. Gizatullin, M.I. Khakimyanov and F.F. Khusainov. Technological Parameters Influence on Energy Intensity of Oil Wells Pumps. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728790.

12. A. Yashin and M. Khakimyanov, "Characteristics Analysis of Linear Submersible Electric Motors for Oil Production," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 15-19, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234346.

13. Букреев В. Г. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия / В. Г. Букреев, Н. Ю. Сипайлова, В. А. Сипайлов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 75-84.

14. Невоструев, В. А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. 2017. № 8. С. 28-32.

15. Городнов А.Г. Построение энергоэффективных электротехнических комплексов с автономной системой электроснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 4. С. 64-78.

16. Gorodnov A., Fedorov E., Kornilov V., Al-Ali M.A. Submersible pumping unit with increased electromagnetic moment of the submersible electric motor/ Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems. 2021. С. 363-366.

17. Городнов А.Г., Корнилов В.Ю., Федоров Е.Ю. Погружная насосная установка с повышенным электромагнитным моментом погружного электродвигателя Патент на полезную модель RU 205204 U1, 02.07.2021.

18. V. A. Kopyrin, A. L. Portnyagin, A. V. Logunov, N. V. Shatalova, M. V. Deneko and R. N. Khamitov, "Investigation of Resonance Effect in the Oil Production Electrotechnical Complex with the Downhole Reactive Power Compensator," 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944635.

19. V. A. Kopyrin, M. V. Deneko, E. A. Engel and R. N. Khamitov, "Determination of the Downhole Compensator's Optimal Power Considering the Cable Line's Length and Cross Section," 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.

Авторы публикации

Городнов Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ.

Корнилов Владимир Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета.

Федоров Евгений Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ.

References

1. Gabor Takacs. Electrical Submersible Pumps Manual. - 1st Edition. Gulf Professional Publishing, 2009. - 440 p.
2. Xiaodong Liang, Ahmad El-Kadri, "Factors Affecting Electrical Submersible Pump Systems Operation" in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 10-11 Oct. 2018. doi: 10.1109/EPEC.2018.8598331.
3. O.V. Thorsen, M. Dalva, "Combined electrical and mechanical model of electric submersible pumps" in *Transactions on Industry Applications*, 2001, Volume 37, Issue 2. pp. 541-547
4. Xiaodong Liang, Omid Ghoreishi, Wilsun Xu. Downhole Tool Design for Conditional Monitoring of Electrical Submersible Motors in Oil Field Facilities // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2017. - Volume 53, Issue 3. – pp. 3164-3174
5. A. Hussain, Bahareh Anvari, Hamid A. Toliyat, "A control method for linear permanent magnet electric submersible pumps in a modified integrated drive-motor system" in *International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2017. doi: 10.1109/IEMDC.2017.8002315.
6. Jorge Andrés Prada Mejía, Luis Angel Silva, Julián Andrés Peña Flórez, "Control Strategy for Oil Production Wells with Electrical Submersible Pumping Based on the Nonlinear Model-Based Predictive Control Technique" in *ANDESCON*. Conference Paper. Publisher: IEEE. 2018. doi: 10.1109/ANDESCON.2018.8564581.
7. Power factor correction and harmonic filtering in electrical installations // Series of a design engineer. - ABB. - 2018. -- 58 p.
8. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov, F. F. Khusainov and I. N. Shafikov, "Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor," 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076285.
9. J. Zhang and J. Wan, "Application of the cable laying coiled tubing in electric submersible pump," 2021 3rd International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing and Intelligent Oil Field (ICMSP), 2021, pp. 293-296, doi: 10.1109/ICMSP53480.2021.9513368.
10. I. Shafikov and M. Khakimyanov, "Assessment of Reliability of the Electric Submersible Pump Variable Frequency Drive," 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112074.
11. F. A. Gizatullin, M. I. Khakimyanov and F. F. Khusainov, "Technological Parameters Influence on Energy Intensity of Oil Wells Pumps," 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728790.
12. A. Yashin and M. Khakimyanov, "Characteristics Analysis of Linear Submersible Electric Motors for Oil Production," 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 2020, pp. 15-19, doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234346.
13. Bukreev V. G., Bukreev V. G., Sipailova N. Yu., Sipailov V. A. Management strategy for the electrical complex of mechanized oil production based on economic criteria // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. - 2017. - T. 328. - No. 3. - pp. 75-84.
14. Nevostruev, V. A. Integrated approach to energy efficiency in oil production ESP. *Inzhenernaya praktika*. - 2017. - No. 8. - S. 28-32.15. Gorodnov A.G. Construction of energy-efficient electrical engineering complexes with an autonomous power supply system. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2020. V. 22. No. 4. pp. 64-78.
16. Gorodnov A., Fedorov E., Kornilov V., Al-Ali M.A. Submersible pumping unit with increased electromagnetic moment of the submersible electric motor/ *Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems*. 2021. C. 363-366.
17. Gorodnov A.G., Kornilov V., Yu., Fedorov E.Yu. Submersible pumping unit with increased electromagnetic torque of the submersible motor Utility model patent RU 205204

U1, 07/02/2021.

18. V. A. Kopyrin, A. L. Portnyagin, A. V. Logunov, N. V. Shatalova, M. V. Deneko and R. N. Khamitov, "Investigation of Resonance Effect in the Oil Production Electrotechnical Complex with the Downhole Reactive Power Compensator," 2019 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944635.

19. V. A. Kopyrin, M. V. Deneko, E. A. Engel and R. N. Khamitov, "Determination of the Downhole Compensator's Optimal Power Considering the Cable Line's Length and Cross Section," 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Dynamics50954.2020.9306151.

Authors of the publication

Anton G. Gorodnov - Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev- KAI.

Vladimir Yu. Kornilov - Dr. Tech. Sciences, Professor, Professor of the Instrument Engineering and Mechatronics Department, Kazan State Power Engineering University.

Evgenii Yu. Fedorov - Cand. Tech. Sciences, Associate Professor, Department of Electrical Equipment, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev- KAI.

Получено

12.04.2022г.

Отредактировано

25.04.2022г.

Принято

30.04.2022г.



ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КАМЕРЫ РАДИАЦИИ ПЕЧИ ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДОВ

Вафин Д.Б.

Нижекамский химико-технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический
университет, г. Нижнекамск, Россия
ORCID: 0000-0002-6411-3640
vafdanil@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Смоделировать взаимосвязанные физико-химические процессы в камерах радиации трубчатых печей пиролиза углеводородов. Провести численные расчеты тепло и массообмена в топочной камере печи с многоярусным расположением настенных горелок на боковых футерованных стенах. *МЕТОДЫ.* С помощью собственного пакета прикладных программ, основанного на численном решении системы дифференциальных уравнений сохранения энергии и уравнений радиационной газовой динамики, рассчитаны поля скоростей и температуры продуктов сгорания природного газа в камере радиации трубчатой печи пиролиза углеводородов. В камере радиации происходят взаимосвязанные процессы горения природного газа, лучисто-конвективного теплообмена, турбулентного течения дымовых газов. Эти процессы смоделированы двухмерными уравнениями модели горения, переноса энергии излучением и уравнениями движения. В боковых стенках камеры радиации с обеих сторон в восьми горизонтальных ярусах установлены настенные горелки в количестве 128 штук. Продукты сгорания, выходящие из сопел этих горелок создают сложные поля скоростей и температуры в объеме камеры. За счет излучения дымовых газов, мельчайших частиц сажи и раскаленных футерованных стен камеры радиации формируются тепловые потоки к трубчатому экрану, где происходит пиролиз углеводородов с целью получения этилена. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В результате расчетов получены поля скоростей, температуры в объеме камеры радиации и концентрации основных компонентов продуктов сгорания. Вычислены локальные значения поверхностных плотностей лучистых тепловых потоков к реакционным трубам для печей пиролиза метана и пропана. Проведены сравнения некоторых полученных результатов с показаниями приборов действующих технологических установок. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Расчеты показывают, что разработанный пакет программ позволяет получить реалистические значения локальных скоростей и температуры в камерах радиации трубчатых печей, значения поверхностных плотностей конвективных и лучистых тепловых потоков к граничным поверхностям и другие тепловые и газодинамические параметры в объеме топки.

Ключевые слова: излучение; теплообмен; горение; турбулентность; температура; численный эксперимент; пиролиз углеводородов.

Для цитирования: Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С198-210.. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-198-210.

THERMAL AND AERODYNAMIC PARAMETERS RADIATION CHAMBERS OF THE HYDROCARBON PYROLYSIS FURNACE

DB. Vafin

Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) Kazan National Research
Technological University, Nizhnekamsk, Russia
vafdanil@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-6411-3640

Abstract: *THE PURPOSE.* To carry out mathematical modeling of interrelated physico-

chemical processes in radiation chambers of tubular furnaces of pyrolysis of hydrocarbons. Perform numerical calculations of heat and mass transfer in the furnace chamber with a multi-tiered arrangement of wall burners on the side lined walls. METHODS. Using our own package of applied programs based on the numerical solution of a system of differential equations of energy conservation and equations of radiation gas dynamics, the fields of velocities and temperatures of natural gas combustion products in the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis tubular furnace are calculated. Interrelated processes of natural gas combustion, radiant-convective heat transfer, and turbulent flow of flue gases take place in the radiation chamber. These processes are modeled by two-dimensional equations of the combustion model, energy transfer by radiation, and equations of motion. In the side walls of the radiation chamber on both sides in eight horizontal tiers there are wall burners in the amount of 128 pieces. Combustion products emerging from the nozzles of these burners create complex velocity and temperature fields in the chamber volume. Due to the radiation of flue gases, the smallest soot particles and hot lined walls of the radiation chamber, heat flows are formed to the tubular screen, where hydrocarbons are pyrolyzed to produce ethylene. RESULTS. As a result of calculations, the velocity fields, the temperature in the volume of the radiation chamber and the concentration of the main components of the combustion products were obtained. Local values of surface densities of radiant heat fluxes to reaction pipes for methane and propane pyrolysis furnaces are calculated. Comparisons of some of the results obtained with the readings of the devices of existing technological installations are carried out. CONCLUSION. Calculations show that the developed software package makes it possible to obtain realistic values of local velocities and temperatures in the radiation chambers of tube furnaces, surface densities of convective and radiant heat fluxes to boundary surfaces, and other thermal and gas-dynamic parameters in the furnace volume. With a multi-row arrangement of a large number of wall burners of low thermal power, a complex field of temperature and velocities of combustion products in the furnace volume is formed on the side walls of the radiation chamber of the furnace. At the same time, this arrangement of the burners ensures a fairly uniform distribution of heat flows over the surface of the tubular screen of the hydrocarbon pyrolysis furnace.

Keywords: radiation; heat transfer; combustion; turbulence; temperature; numerical experiment; pyrolysis of hydrocarbons.

For citation: Vafin DB. Thermal and aerodynamic parameters radiation chambers of the hydrocarbon pyrolysis furnace. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 198-210. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-198-210.

Введение

В нефтехимической промышленности для получения этилена широко используются трубчатые печи пиролиза углеводородов. Выход целевого продукта зависит от правильной организации подвода теплоты нагреваемому продукту в трубчатых реакторах за минимальный период времени. Поэтому необходимо обеспечить высокую степень теплообмена, что приводит к большой теплонпряженности реакционных труб экрана, которые находятся на пределе жаростойкости материалов труб. Более 90 % теплоты трубчатому экрану поступает за счет лучистых потоков продуктов сгорания и раскаленных стен топочной камеры. Расчет тепловых потоков требует знания распределения температуры и концентрации излучающих компонентов продуктов сгорания в объеме камеры радиации печи. Эти данные можно получить путем численного решения дифференциальных уравнений сохранения энергии, импульса, неразрывности, переноса энергии излучением, моделей турбулентности и горения топливного газа. Применяемые до сих пор интегральные методы расчета трубчатых печей основываются на имеющихся опытных данных, требуют предположения не известных заранее параметров топки и позволяют прогнозировать только суммарные тепловые потоки к трубчатому экрану.

В данной работе дается краткое описание метода моделирования физических процессов, протекающих в камерах радиации трубчатых печей двухмерными дифференциальными уравнениями в частных производных, метода численного решения системы алгебраических уравнений, аппроксимирующих исходные уравнения. С помощью пакета прикладных программ, реализующий дифференциальный метод расчета топок проведен тепловой расчет печей пиролиза этана и пропана с

многоярусным расположением настенных горелок на боковых стенах камеры радиации. Показаны поля температуры и течения в объеме камеры радиации, приведено распределение тепловых потоков по высоте трубчатого экрана.

Сравнение температуры дымовых газов на выходе из камеры радиации с экспериментальными значениями реальной печи показывает, что предлагаемый метод позволяет прогнозировать параметры трубчатой печи при проектировании. В то же время видно, что задание одинаковой температуры дымовых газов во всем объеме камеры радиации не соответствует действительности. При многорядном расположении большого количества настенных горелок малой тепловой мощности на боковых стенах камеры радиации печи образуется сложное поле температуры и скоростей продуктов сгорания в топочном объеме. В то же время такое расположение горелок обеспечивает достаточно равномерное распределение тепловых потоков по поверхности трубчатого экрана печи пиролиза углеводородов.

Литературный обзор

Достаточно подробный обзор литературы по методам теплового расчета топков и по вопросам анализа отдельных аспектов тепло и массообмена имеется в работах [1,2]. Компьютерные методы теплового расчета топков, которые учитывали бы различные физико-химические процессы в их взаимосвязи, начали появляться в 80-е годы двадцатого столетия. Имеются, так называемые, интегральные, зональные и дифференциальные методы теплового расчета.

Интегральные методы основываются на некоторых физических закономерностях дополненных опытными зависимостями между безразмерными критериями подобия. Интегральные методы не позволяют определить локальные температуры стенки реакционных труб, футеровки, продуктов сгорания изменение плотностей тепловых потоков по длине реакционных труб и другие параметры. В то же время при корректном использовании опытных данных для аналогичных печей эти методы позволяют определить суммарные тепловые потоки к трубчатому экрану и температуру продуктов сгорания на выходе из радиационной секции. До сих пор при проектировании новых трубчатых печей еще используются интегральные методы и появляются научные статьи, использующие такие методы [3,4].

Современные варианты зонального метода теплового расчета топков основаны на замене ограничивающих поверхностей топков и объема продуктов сгорания совокупностью эквивалентных оптически однородными и однородными подсистемами. В объеме топки и ограничивающих поверхностях выделяют некоторое количество излучающих объемных и поверхностных зон. В каждой зоне задаются постоянные значения термодинамических и оптических свойств, которые скачкообразно изменяются при переходе в соседнюю зону. Перенос энергии излучением определяется решением интегрального уравнения путем аппроксимации системой алгебраических уравнений для осредненных в пределах зоны поверхностной плотности потоков излучения. Полученная система уравнений, равная количеству выделенных зон, решается совместно с уравнениями тепло и массообмена в различных постановках. Имеются различные варианты зональных методов.

Значительный вклад для возможности применения зональных методов при тепловых расчетах топочных устройств внесли Невский А.С., Адрианов В.Н., Лисиенко В.Г., Седелкин В.М. и др. Появляется достаточно много публикаций, использующих варианты зональных методов для теплового расчета от теплиц [5] до топков котельных агрегатов [6]. При большом градиенте газодинамических и радиационных свойств среды приходится использовать большое количество поверхностных и объемных зон и задавать соответствующие эмпирические или определенные по другим методам данные. Это приводит к увеличению трудоемкости расчетов и уменьшению их точности.

Дифференциальный метод теплового расчета топков применительно к камерам радиации трубчатых печей был предложен автором данной статьи [7].

Под дифференциальным методом мы подразумеваем метод, основанный на моделировании физико-химических процессов в топочном объеме дифференциальными уравнениями переноса в частных производных и на решении кинетического уравнения переноса энергии излучением. Имеется большое количество публикаций, посвященных методам решения уравнения переноса излучением и уравнений радиационной газовой динамики, анализ некоторых из них можно найти в работе [8].

В работе [9] дается анализ некоторых методов сложного теплообмена в трубчатых печах. В [10] расчет теплообмена в топке парогенератора проведен комбинированным методом, когда уравнение энергии решается методом конечных разностей, а

дивергенция поверхностной плотности теплового излучения определяется методом Монте-Карло. Сравнивая полученные результаты, с соответствующими данными при использовании зонального метода указывается, что для получения одинаковой точности топочный объем надо разбить более чем на 100 зон.

Дифференциальными методами теплообмена в настоящее время рассматриваются различные задачи. Разработаны различные универсальные коммерческие вычислительные пакеты программ типа *ANSYS FLUENT*, *CFX*, *FlowVision* и др. Имеются статьи, подготовленные с помощью пакета программ *VP2/3*, σ -Flow [11], *FLOREAN* [12], позволяющие рассчитывать пространственные течения с учетом горения газообразного, жидкого и твердого топлива и сложный теплообмен. Для решения полной системы уравнений радиационной газовой динамики в трехмерной геометрии применительно к спускаемым космическим аппаратам имеется компьютерная платформа *NEART-ASTEROID* [11]. В работе [12] численными методами анализируется турбулентное горение бедной метано-воздушной смеси в модельной камере сгорания. Публикациями, посвященные изучению различных проблем в топочных объемах и подготовленные с использованием коммерческих программ являются работы [13-16]. В работе программный комплекс *ANSYS Fluent 19.2* для исследования теплопроводности композитного материала.

Достоинством дифференциальных методов является возможность более полного учета всех взаимосвязанных физических процессов в топке. Некоторые вопросы изучения тепло и массообмена в трубчатой печи пиролиза этана были рассмотрены в [18].

Материалы и методы

Трубчатые печи пиролиза углеводородов применяются для термического разложения газообразного этана или бутан-пропановых фракций. Термический крекинг углеводородов в трубчатых реакторах камер радиации печи (рис. 1) за счет подвода теплоты от продуктов сгорания природного газа (или смеси природного и синтез газа) и раскаленных футерованных стен радиационной секции печи сопровождается образованием этилена, пропилена, метана, водорода и других продуктов. Этилен, используемый в качестве сырья для получения полимеров и каучуков, получается в процессе пиролиза углеводородов в трубчатых печах [19]. В данной работе анализируются тепловые и аэродинамические параметры в радиационной секции универсальной трубчатой печи пиролиза газообразного этана-рецикла или бутан-пропана типа *SRT-II*, предназначенного для получения этилена.

Трубчатые печи пиролиза имеют конвекционную и радиационные секции. При пиролизе этана, при правильной организации подвода теплоты к змеевикам камеры радиации, в основном, образуется этилен (~48 % по массе), водород (~3,51 %), метан. Количество не разложившегося этана – сырья на выходе печи составляет около 39,4 % по весу. При пиролизе пропана выход этилена меньше, чем при пиролизе этана и составляет 30,2 % по массе, однако пропан дает высокий выход пропилена (до 15,2 %). Выход водорода составляет 1,3 % по массе. Конверсия пропана при его пиролизе (отношение количества расщепившегося при пиролизе сырья к количеству поданного сырья) достигает 85...90 %.

Процесс пиролиза углеводородов происходит при температуре 800...855 °С в присутствии пара разбавления. Пар разбавления снижает парциальное давление углеводородов, что способствует увеличению селективности процесса в направлении повышения выхода этилена и пропилена, а также уменьшает образование кокса в трубчатом реакторе и смол на теплообменных поверхностях труб ЗИА.

Чем выше температура пирогаза на выходе из радиантных змеевиков печи, тем выше конверсия сырья. Для интенсификации процесса пиролиза углеводородов стремятся повысить температуру процесса крекинга и уменьшить продолжительность в трубчатых реакторах. В результате температура поверхности металла труб может достигнуть значения 1100 °С и выше [20]. Таким образом, материал труб находится на пределе жаропрочности и при проектировании печей необходимо обеспечить организацию горения топливного газа так, чтобы можно было достигнуть подвода необходимого количества теплоты нагреваемому продукту при допустимой температуре материала труб реактора.

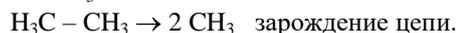
При отклонении от оптимального теплового режима в камере радиации выход целевого продукта снижается. Поэтому на этапе проектирования печи необходимо правильно подобрать тип горелок и их расположение, обеспечивающее желаемое распределение тепловых потоков по высоте трубчатого реактора. Для этого нужен надежный метод теплового расчета печей. До сих пор проектировщики в основном пользуются интегральными методами теплового расчета, основанными на эмпирических данных. Нами в работе [7] был предложен дифференциальный метод теплового расчета

трубчатых печей, основанный на моделировании взаимосвязанных процессов происходящих в топках дифференциальными уравнениями сохранения энергии, уравнениями турбулентного движения газов и интегро-дифференциальным уравнением переноса энергии излучением. Применение предложенного метода для расчета трубчатых печей с многоярусным расположением настенных горелок в двухмерной и трехмерной постановках приводится в работах [1, 2, 21]. В указанных работах проанализированы тепловые параметры печей при использовании веерных и акустических горелок настольного сжигания газообразного топлива. Основы такого подхода к тепловому расчету топок были заложены еще в работе [4]. Различные аспекты применения дифференциального метода теплового расчета имеются в [5-9].

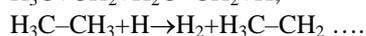
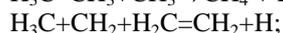
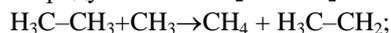
На рисунке 1 показана одна четвертая часть камеры радиации печи. Высота камеры радиации по оси x составляет 11 м, глубина вдоль оси z – 10 м и ширина вдоль оси y – 2 м. На боковых футерованных стенах камеры радиации на восьми рядах размещены 64 горелки с каждой стороны типа *LPMW-5* фирмы «ДЖОН ЦИНК» с номинальной мощностью 186 кВт. Процентный состав топливного газа: H_2 – 18,5; CH_4 – 78,35; C_2H_6 – 1,6; N_2 – 1,3; O_2 – 0,25%. Низшая теплотворная способность топлива – 29 МДж/нм³. В расчетах используемый топливный газ был заменен метаном, расход которого обеспечивал такую же мощность теплоты сгорания, что и используемый газ. Температура метана подаваемого на горелки принята равной 60°C. Температура воздуха подаваемого к горелкам принята равной 2°C. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1$.

В камере радиации расположены четыре трубчатых змеевика двухстороннего обогрева. В конвекционной секции печи происходит предварительный подогрев сырья, пара разбавления, питательной воды, перегрев пара высокого давления. Пар разбавления смешивается с углеводородным сырьем, затем направляется в верхнюю секцию подогрева смешанного сырья. Смесь углеводородного сырья и пара разбавления подается в камеру радиации после нижней секции подогрева по внешнему переходному трубопроводу. Перед подачей в трубчатый реактор температура сырья измеряется термопарами T_1 , а на выходе из трубчатого реактора измеряется температура продуктов крекинга T_2 (рис. 1). Установлены также термопары T_3 для измерения температуры дымовых газов, поступающих из камер радиации в конвекционную секцию T_3 . Распределение нагреваемого сырья в виде смеси пара и углеводородов по четырем змеевикам пиролиза камеры радиации осуществляется после конвекционной секцией. Температура сырьевой смеси на входе в радиантную часть для исследованной печи составляет около 650°C, а температура продуктов пиролиза (пирогаза) на выходе из трубчатого реактора ~835°C.

В процессе пиролиза этана происходит разрыв связи «углерод-углерод», в результате образуются свободные радикалы CH_3 :

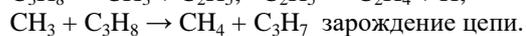
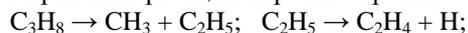


Затем эти две свободные радикалы реагируют с другими молекулами этана образуя целевой продукт этилен $H_2C = CH_2$ и побочные продукты (метан, ацетилен ...):



Тепловой крекинг пропана в трубчатых реакторах сопровождается образованием этилена, метана, водорода и других продуктов.

Первичные реакции пиролиза пропана:



В течении процесса пиролиза происходят еще целый ряд реакций, которые приводят к образованию ароматических углеводородов. Из-за конденсации ароматических углеводородов образуется кокс. Чтобы добиться наибольшего выхода этилена необходимо во время остановить процесс развития вторичных реакций. С этой целью пирогаз после выходе из трубчатого реактора секции радиации резко охлаждают до температуры 350...470 °C в закалочно-испарительном аппарате (ЗИА).

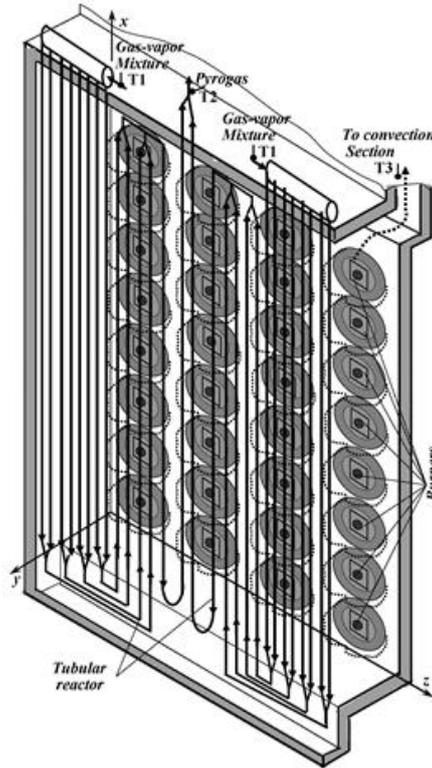


Рис. 1. Схема четвертой части радиационной секции трубчатой печи пиролиза углеводородов

Fig.1. Scheme of the fourth part of the radiation section of a tubular hydrocarbon pyrolysis furnace.

В нашей работе [21] было показано, что многие вопросы теплообмена в трубчатых печах можно анализировать в двухмерной постановке, считая изменения параметров по глубине секции вдоль оси $0z$ (рис. 1) не значительными. Тогда локальные значения температуры продуктов сгорания в топке секции радиации получаются в результате решения дифференциального уравнения сохранения энергии:

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{ef} \frac{\partial T}{\partial y}) + (q_v - \text{div} \mathbf{q}_p). \quad (1)$$

Для вычисления дивергенции лучистых потоков $\text{div} \mathbf{q}_p$, входящего в уравнение энергии решается уравнение переноса энергии излучением в некотором спектральном диапазоне в приближении метода дискретных ординат:

$$\mu_m \frac{\partial I_m^k}{\partial x} + \xi_m \frac{\partial I_m^k}{\partial y} = \alpha_\lambda \int_{\lambda_{k-1}}^{\lambda_k} I_{b\lambda} d\lambda - (\alpha_k + \beta_k) I_m^k + \frac{\beta_k}{4\pi} \sum_{m'=1}^{N_o} w_m \phi_{m'm} I_{m'}^k. \quad (2)$$

Мощность источников тепловых выделений q_v в результате протекания реакций горения компонентов топливного газа можно получить, решая уравнение переноса, записанного в обобщенном виде:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y}) + S_\phi. \quad (3)$$

Компоненты скорости продуктов сгорания u , v в направлениях осей x и y определяются в результате решения уравнений движения:

$$\left. \begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{ef}(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div} \mathbf{v})) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{ef}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + f_1, \\ \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (\mu_{ef}(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_{ef}(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div} \mathbf{v})). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для определения эффективных коэффициентов вязкости μ_{ef} и переноса Γ_ϕ решаются уравнения k - ϵ модели турбулентности, которые в обобщенной форме записи также имеют вид (3). Эти уравнения дополняются уравнениями неразрывности и состояния смеси газов:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad p = \frac{\rho}{\mu_{\text{mix}}} RT. \quad (5)$$

В уравнениях (1-5) приняты следующие обозначения: I_m^k – спектральная интенсивность излучения вдоль ограниченного числа направлений $S_m\{m = 1, N_o\}$ в пределах k -й спектральной полосы, направления лучей задаются набором угловых координат $\{\mu_m, \xi_m\}$; $I_{b\lambda}(T)$ – средняя по Планку спектральная интенсивность излучения черного тела в пределах полосы при температуре T ; α_k, β_k – осредненные в полосе спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния; w_m – весовые коэффициенты [2]; $\phi = \{k, \varepsilon, m_t, m_{\text{ок}}\}$; k, ε – кинетическая энергии турбулентных пульсаций и скорость ее диссипации; $m_{\text{CH}_4}, m_{\text{CO}}, m_{\text{O}_2}, m_{\text{H}_2\text{O}}, m_{\text{CO}_2}$ – массовые концентрации метана, окиси углерода, кислорода воздуха, водяных паров и двуокиси углерода; ρ – средняя плотность газа; c_p – средняя удельная изобарическая теплоемкость; $\lambda_{\text{ef}} = \lambda + \lambda_t$ – эффективный коэффициент теплопроводности продуктов сгорания, где λ и λ_t – молекулярная и турбулентные коэффициенты теплопроводности; q_v – объемная плотность выделений теплоты; $\text{div } \mathbf{q}_p$ – дивергенция потоков излучения; $\mu_{\text{ef}} = \mu + \mu_t$ – эффективный коэффициент вязкости, коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности определяются по соотношениям: $\mu_t = c_\mu \cdot f_\mu \cdot \rho \cdot k^2/\varepsilon$, $\lambda_t = c_p \cdot \mu_t / \text{Pr}_t$; Pr_t – турбулентное число Прандтля; $f_1 = -\rho g(1 - \beta(T - T_\infty))$ – массовая сила, где $\beta = (1/\rho)(\partial\rho/\partial T)$ – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; $T_\infty = 290$ К – начальное значение отсчета температуры; p – статическое давление, μ_{mix} – эффективная молярная масса газа; R – газовая постоянная универсальная; p – статическое давление, μ_{mix} – эффективная молярная масса газа; R – газовая постоянная универсальная; S_ϕ – источниковый член в уравнении (3); $\Gamma_\phi = \mu + \mu_t/\sigma_\phi$ – коэффициент переноса; $S_f = 0,53\rho g_f^{1/2} \varepsilon/k$ – средняя скорость протекания реакций горения, определяемая по модели «обрыва вихрей» [22], $g_i = 2,27(\mu_t k/(\rho\varepsilon)(\partial m_i/\partial y)^2)$ – среднеквадратичная пульсационная составляющая компонента газовой смеси в уравнениях горения; $\Gamma_\phi = \mu/\sigma_t$ коэффициент переноса, где σ_t – Шмидта число.

Определение спектральных коэффициентов поглощения газов рассчитываются исходя из распределения мольных долей H_2O , CO_2 и CO в объеме камеры радиации. Для их определения использовали модель горения метана в две стадии:



Расчеты проводились в предположении полного сгорания метана с образованием в конечных продуктах CO_2 и H_2O , N_2 , O_2 :



Для определения поверхностных плотностей излучения продуктов сгорания уравнение переноса излучения (1) решался для каждой полосы спектральной модели широкой полосы, которая учитывает полосы 1,5; 2,7; 6,3; 10 мкм спектра излучения водяного пара и 2,7; 4,3; 15 мкм у двуокиси углерода. Суммарные плотности потоков излучения определялись затем суммированием по данным спектральным полосам.

Уравнениям (1-5) ставились соответствующие граничные условия, которые подробно рассмотрены в [1, 2]. Методы дискретизации дифференциальных уравнений математической модели и подробное описание методов их численного решения также приведены в [1, 2]. Около мест расположения горелок и трубчатого экрана использовали более сгущенную разностную сетку. Объем одной четверти радиационной секции, для которой проводились расчеты, в результате имели около 16000 контрольных объемов.

Рассмотренные печи снабжены настенными горелками с естественной тягой, в которые подается топливный газ и воздух из окружающей среды. Тепловая нагрузка настенных горелок регулируется за счет управления давлением подачи топливного газа. Номинальное избыточное давление газа перед горелками $\sim 0,15$ МПа. Регулирование подачи воздуха осуществляется с помощью воздушных заслонок. Необходимая для поддержания пониженного давления на $\sim 1,2$ кПа в камере радиации тяга создается дымососом. В проектных расчетах из опыта эксплуатации аналогичных печей предполагается, что горелки обеспечат в камере сгорания равномерное распределение температуры $\sim 1250^\circ\text{C}$ (~ 1550 К).

В наших расчетах трубчатый экран рассматривался как стенка с эффективной степенью черноты 0,79 [1]. Толщина футерованных стен камеры радиации принята равной 0,31 м с эффективным коэффициентом теплопроводности 0,35 Вт/(м·К). Степень черноты

внутренних поверхностей стен 0,67. Температура наружной поверхности стен 40°C. Учитывались потери теплоты за счет теплопроводности через стенки секции радиации.

Из-за большого количества входов для топлива и воздуха сходимость при численном решении не очень хорошая. Для обеспечения устойчивости решения приходилось применять метод нижней релаксации. Удовлетворительная сходимость достигается после двух тысяч итераций.

Результаты

Используя пакет компьютерных программ, реализующий описанный выше метод, выполнен расчет сложного теплообмена в камере радиации печей пиролиза этана и пропан-бутановой фракции. На рисунке 2 показано поле температуры для одной половины камеры радиации печи пиролиза этана, а на рисунке 3 – графики изменения температуры дымовых газов на разных расстояниях y от поверхности боковой стены и график температуры внутренней поверхности футеровки в этом же сечении печи пиролиза пропана.

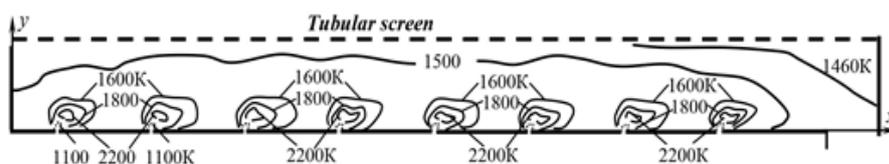


Рис. 2. Вид поля температуры в камере радиации печи пиролиза этана.

Fig. 2. View of isotherms in the radiation chamber of a tubular ethane pyrolysis furnace.

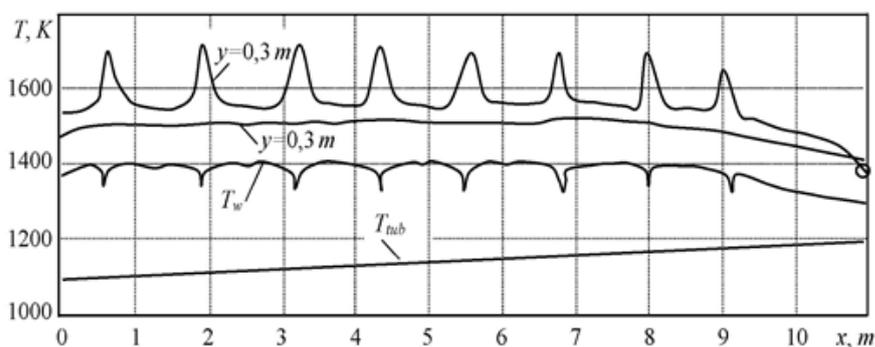


Рис. 3. Изменение температуры по высоте камеры радиации: T_w – температура внутренней поверхности боковой стенки; T_{tub} – температура наружной стенки трубы по длине реактора; \bullet – температура дымовых газов на выходе из камеры радиации, измеренное по датчикам установки.

Fig. 3. Change in temperature along the height of the radiation chamber: T_w – internal lined surface of the side wall; T_{tub} – the outer wall of the coil outlet pipe; \bullet – flue gas temperature at the exit from the radiation chamber according to the thermocouple readings.

Как видно из рисунков 2 и 3 при использовании большого количества настенных горелок, расположенных на боковых стенах камеры радиации имеет место сложное поле температуры и предположение о равномерном поле температуры в секции радиации не является оправданным. На самом деле температура еще меняется и по глубине печи вдоль оси z . На рис. 3 в виде кружочка нанесено значение температуры дымовых газов $t_g = 1190^\circ\text{C}$, измеренное штатной термопарой действующей печи. Видно хорошее соответствие наших расчетных значений с опытным значением. В нижней части рисунка 3 показан график изменения температуры внутренней поверхности боковой стенки камеры радиации. Видно, что при использовании настенных горелок объемного сжигания топлива температура поверхности стенки получается достаточно равномерной, в отличие использования веерных и акустических горелок, обеспечивающих горение вдоль стенки [2].

По рисункам 2 и 3 можно также заметить, что около мест расположения настенных горелок наблюдается большие градиенты температур продуктов сгорания. В то же время в области ближе к трубчатому экрану формируется достаточно равномерное распределение температуры дымовых газов. Непосредственно вблизи трубчатого экрана за пределами теплового пограничного слоя температура продуктов сгорания изменяется в пределах 1420..1460 К (1150...1190°C). На расстояниях около 0,25...0,4 м от трубчатого экрана температура на уровне 1500...1600 К (1230...1330 °C). Ближе к своду и к переходу в конвекционную часть температура дымовых газов снижается до 1420 К, что практически

совпадает с показаниями термопар ТЗ (1146 °С), полученных во время наладочных испытаний печи. Температура внутренней поверхности боковой стенки топочной камеры около 1400К, несколько снижаясь около свода и к выходу, а также около мест расположения горелок. Температура наружной стенки выходной трубы змеевика повышается от 1100К до 1200К. Температура смеси пропана и пара разбавления составляла $T_1 = 650$ °С, а температура пирогаза на выходе из трубчатого экрана по показаниям штатной термопары $T_2 = 815$ °С. Содержание этилена в пирогазе 31 % при расходе пропана 4,53 кг/с.

На рисунке 4 показан вид изолиний функций тока, в сечении xu , проходящей через оси настенных горелок.

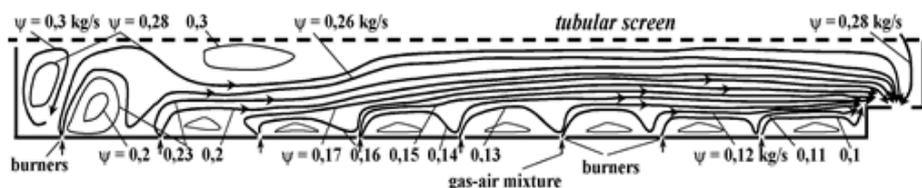


Рис. 4. Вид изолиний функций тока в камере радиации.

Fig. 4. View of streamline functions in the radiation chamber.

Из рисунка 4 видно, что в камере радиации образуется достаточно сложное течение с наличием зон обратных течений в промежутке между горелками. Наличие обратных течений около устья горелок должно способствовать устойчивости горения. Обращает внимание наличие зон обратных течений у пода печи и вблизи трубчатого экрана на уровне 3-го ряда снизу горелок. Данная зона, видимо, и обеспечивает относительно равномерное поле температуры в нижней части топки около трубчатого экрана. Абсолютные скорости дымовых газов в большей части топочной камеры лежат в пределах 0,5...1,5 м. Несмотря на это наблюдается некоторое сходство между полями температуры и скоростей. Это подтверждает влияние конвективного теплопереноса на формирование поля температуры

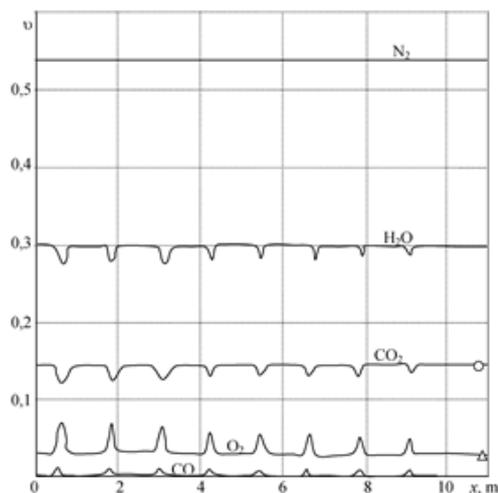


Рис. 5. Изменение объемных концентраций продуктов сгорания по высоте камеры радиации

Fig. 5. Change in volume fractions of combustion products components along the radiation chamber height.

На рисунке 5 показано изменение мольных (объемных) долей основных компонент продуктов сгорания v по высоте камеры радиации.

Как видно из рисунка 5, основные изменения концентрации продуктов сгорания происходят только в областях горения топливо воздушной смеси, а в остальном объеме камеры сгорания имеет место практически постоянные значения концентраций компонент дымовых газов. При выходе из камеры радиации объемная доля CO_2 составляет около 14,5%, а O_2 – 2,5 %, что хорошо согласуется с данными хроматографического анализа состава дымовых газов. Концентрация CO заметна только в области горения, а на выходе из печи составляет 0,0004 ppm. Концентрация окисла азота NO в дымовых газах 0,0044 ppm.

На рисунке 6 приведен график изменения поверхностной плотности тепловых потоков по высоте трубчатого реактора в камере радиации печи пиролиза этана, где и происходят окончательные реакции пиролиза при температуре сырья $\sim 835^{\circ}\text{C}$.

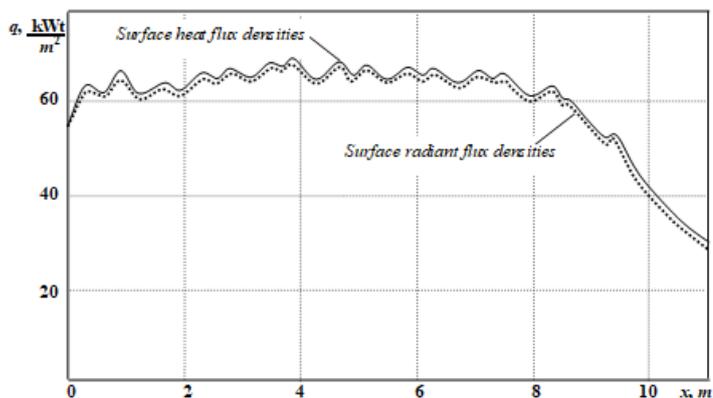


Рис. 6. Изменение поверхностных плотностей теплового излучения по высоте трубчатого экрана. *Fig. 6. Distribution of surface densities of heat fluxes along the height of the tubular screen.*

Как видно из рисунка 6 при небольших скоростях течения продуктов сгорания и при однорядном трубчатом змеевике двухстороннего облучения основное количество теплоты (более 95 %) нагреваемому сырью в трубчатых печах передается за счет излучения дымовых газов и раскаленных стен. Использование большого количества настенных горелок с многоярусным расположением на боковых стенах (в данном случае 8 ярусов) обеспечивает достаточно равномерную теплонапряженность реакционных труб. Меньшее значение тепловых потоков внизу печи можно объяснить с сравнительно низкой температурой поверхности пода печи. Уменьшение тепловых потоков в верхней части труб змеевика связано увеличением температуры наружной поверхности реакционных труб от 1050K внизу до 1200K наверху, а также с уменьшением температуры продуктов сгорания к выходу из камеры радиации.

По результатам расчетов расход теплоты на нагрев сырьевой смеси в камере радиации печи пиролиза этана составил 2,4 МВт; расход теплоты на эндотермическую реакцию углеводородов – 19,33 МВт; общий полезный расход теплоты в камере радиации – 21,73 МВт. Эти данные хорошо согласуются с опытными данными действующей печи. Потери теплоты через стенки камеры радиации составили 0,35 МВт (1,6% полезной теплоты, что примерно в 2 раза меньше, чем в случае использования настенных горелок настильного пламени).

В результате расчетов получили, что мощность передачи теплоты продукту крекинга в камере радиации печи пиролиза пропана составляет 21,03 МВт при удельной энергии пиролиза пропана $39,4 \text{ кДж/моль}$. Это соответствует расходу метана на горение $274 \text{ кг/(т. сырья)}$. При некоторых изменениях режима работы печи по показаниям приборам учета мощность передачи теплоты в секции радиации лежит в пределах $20,4 \dots 22,5 \text{ МВт}$. Передача теплоты в конвекционной части печи составляет $19,2 \dots 20,53 \text{ МВт}$. Потери теплоты через стенки печи составляет 0,453 МВт, а с уходящими газами 0,476 МВт. Температура уходящих газов составляет $276 \dots 279^{\circ}\text{C}$. Как правило, увеличение коэффициента избытка воздуха α на 0,1 приводит приросту потерь с уходящими газами от 0,4 до 0,8 %. Тепловой коэффициент полезного действия печи 92,3 %.

Обсуждение

Как видно из расчетов, использование большого количества настенных горелок хотя и не обеспечивает полностью равномерного поля температуры, но поле температуры в камере радиации трубчатой печи пиролиза углеводородов получается более равномерным, чем при использовании более мощных настильных горелок такой же общей теплопроизводительности. При использовании небольших горелок уменьшается и области с высокими температурами, что приводит к образованию окислов азота.

Необходимо следить за плотностью обшивки печи и вовремя устранять присосы воздуха, так как это приводит к росту потери теплоты с уходящими газами. Рекомендуется периодически следить за температурой уходящих газов, так как увеличение температуры на $10 \dots 15^{\circ}\text{C}$ приводит к возрастанию потерь с уходящими газами на $0,6 \dots 0,8 \%$. Причиной повышения температуры уходящих газов может быть загрязнение наружных поверхностей нагрева в результате химического недожога топливного газа. Это в свою

очередь приведет к уменьшению теплопередачи сырью и к снижению выхода целевого продукта.

Литература

1. Данил Вафин., Saarbrucken, Deutschland Сложный теплообмен / Радиационный теплообмен в энергетических установках: LAP LAMBERT Academic Publishing,. ISBN: 978-3-8433-1124-3, 2011. 250 с.
2. Садыков А.В., Вафин Д.Б. Сложный теплообмен в камерах радиации трубчатых печей: монография. Казань: РИЦ «Школа», 2019. 186 с.
3. Ермолаева В.А., Семочкина К.Ю. Расчет технологических характеристик трубчатой печи // International Journal of Humanities and Natural Sciences . 2021. v.10-1. - P. 220-222.
4. Khujaev P. Radiative heat transfer in the furnace with variable volume // Bulletin of Science and Practice. 2018. v. 4. N 11. – P. 248-253.
5. Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinitsyn A.A., Gudkov A.G. Winter greenhouse combined heating system // Magazine of Civil Engineering. 2020. 95(3). P. 131-139.
6. Кулешов О.Ю., Муслимов Е.И. Седелкин В.М. Математическое моделирование зонального и локального результирующего теплообмена в экранированных топках // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 2. С. 78-83.
7. Abdullin A.M., Vafin D.B. Numerical simulation of local heat transfer in furnaces of tube chambers using the differential approximations for radiative heat transfer // Journal of Engineering Physics. 1991. V.60. N2. P. 237-242.
8. Tencer, J.T. Error Analysis for Radiation Transport / Dissertation doctor of Philosophy. The University of Texas at Austin, 2013. 142 p.
9. Scholand, E. Modern Verfahren zur Berechnung des Strahlungsaustausches in brennstoffbeheizten / E. Scholand // Chem. Ing. Techn. 1981. Vol. 53, No. 12. Pp. 942–950.
10. Xu – Chang, X. Mathematical modeling of three – dimensional heat transfer from the flame in combustion chambers // 18th Sym. (Int.) Combust., Waterloo, Aug. 17-22, 1980. Pittsburgh, Pa, 1981. P. 1919-1925.
11. Дектерев А.А., Гаврилов А.А., Харламов Е.Б., Литвинцев К.Ю. Использование программы σ -Flow для численного исследования технологических объектов // Вычислительные технологии. 2003. Т.8. Ч.1. С. 250.
12. Askarova A.S., Bolegenova S.A. Maximov V.Y., Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. 2015. V. 53. N5. P. 751-757.
13. Xiangcum Qi, Mo Yang, Yuwen Zhang. Numerical analysis of NOx production under the air staged combustion. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, 3 (2017). DOI: 10.5098/hmt.8.3.
14. Oyewola O.M., Ismail O.S., Bosomo J.O. Numerical simulations of the turbulence in the thermal-radiation flow field. Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT), 8, (2022). DOI: 10.5098/hmt.17.8.
15. Sebastian E., Georg L., Kai S., Gabor J., Dominique T. Optimal tube bundle arrangements in side-fired methane steam reforming furnaces. Frontiers in Energy Research. 2020. V. 8. Article 583346.
16. Miroslav R., Andreii K., Marcel F. and others. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. Processes 2020, 8, 469; doi: 10.3390/pr8040469.
17. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. Т. 24, №1. С. 86- 98.
18. Vafin D.B., A.V. Sadykov A.V. Thermal calculation of the radiation chamber of an ethane pyrolysis furnace. JOP Conf. Series: Materials and Engineering **862** 062008 (2020).
19. Litventsev I. Pyrolysis // The Chemical Journal, 2006.V.5. P. 42-46.
20. Afanasiev S.V., Ismaylov O.Z., Pyrkin A.V. et.al. Structural heterogeneity of reaction pipes from austenitic hightemperature alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 022049. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/537/2/022049.
21. Вафин Д.Б., Бутяков М.А. Трехмерное поле температуры и скорости в топках трубчатых печей с акустическими горелками // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2017. - №2. С. 49-55.

22. Spalding D.B. Mixing and Chemical Reaction in Steady Confined Turbulent Flames / 13 th International Symposium of combustion: The Combustion Institute, Pittsburgh, 1970. P. 649 – 657.

Авторы публикации

Вафин Данил Биалович – д-р. техн. наук, профессор кафедры электротехники и энергообеспечения предприятий Нижнекамского химико-технологического института (филиал) «Казанского национального исследовательского технологического университета».

References

1. Danil Wafin. *Complex heat exchange*. Radiation heat exchange in power plants /D.B. Wafin. - Saarbrucken, Deutshland: LAP LAMBERT Academic Publishing,. ISBN: 978-3-8433-1124-3, 2011. - 250 p.
2. Sadykov A.V., Wafin D.B. Complex heat exchange in tubular oven radiation chambers: monograph. Kazan: RIT «School», 2019. - 186 p.
3. Ermolaeva V.A., Semotochkina K.Y. Calculation of the technological characteristics of the tube furnace. *International Journal of Humanities and Naturnal Sciences*. 2021. v.10-1. - p. 220-222.
4. Khujaev P. Radiative heate transfer in the furnace with variable volume. *Bulletin of Science and Practice*. 2018. v. 4. N 11. P. 248-253.
5. Pavlov M.V., Karpov D.F., Sinityn A.A., Gudkov A.G. Winter greenhouse combined heating system. *Journal of Civil Engenering*. 2020. 95(3). P. 131-139.
6. Kuleshov O.Y., Muslimov E.I. Sedelkin V.M. Mathematical modeling of zonal and local resulting heat exchange in shielded furnaces. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2017. t. 5. 2. p. 78-83.
7. Abdullin A.M., Vafin D.B. Numerical simulation of local heat transfer in furnaces of tube chambers using the differential approximations for radiative heat transfer. *Journal of Engineering Physics*. 1991. v.60. N2.- P. 237-242.
8. Tencer, J.T. *Error Analysis for Radiation Transport*. The University of Texas at Austin, 2013. 142 p.
9. Scholand, E. Modern Verfahren zur Berechnung des Strahlungsaustausches in brenntoffbeheizten. *Chem. Ing. Techn*. 1981. Vol. 53, No. 12. Pp. 942–950.
10. Xu – Chang, X. *Mathematical modeling of three – dimensional heat transfer from the flame in combustion chambers*. 18th Sym. (Int.) Combust., Waterloo, Aug. 17 – 22, 1980. Pittsburgh, Pa, 1981. P. 1919 –1925.
11. Decterev A.A., Gavrilov A.A., Kharlamov E.B., Litvintsev K.Y. Using the program - Flow for numerical research of technological objects. *Computing technologies*. 2003. tel. 8. para.1. p. 250
12. Askarova A.S., Bolegenova S.A. Maximov V.Y., Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant. *High Temperature*. 2015. v. 53. N5. P. 751-757.
13. Xiangcum Qi, Mo Yang, Yuwen Zhang. *Numerical analysis of NOx production under the air staged combustion*. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 8, 3 (2017). DOI: 10.5098/hmt.8.3.
14. Oyewola O.M., Ismail O.S., Bosomo J.O. *Numerical simulations of the turbulence in the thermal-radiation flow field*. *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 8, (2022). DOI: 10.5098/hmt.17.8.
15. Sebastian E., Georg L., Kai S., Gabor J., Dominique T. Optimal tube bundle arrangements in side-fired methane steam reforming furnaces. *Frontiers in Energy Research*. 2020. v. 8. Article 583346.
16. Miroslav R., Andreii K., Marcel F. and others. *Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion*. *Processes* 2020, 8, 469; doi: 10.3390/pr8040469.
17. Solovyev S.A., Solovyeva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Yu.V., Shakurova R.Z. Numerical study of heat conductivity of composite heat insulation material with microgranules /Izvestia universities. *Problems of energy*. 2022. t. 24, 1. P. 86 - 98.
18. Vafin D.B., A.V. Sadykov A.V. Thermal calculation of the radiation chamber of an ethane pyrolysis furnace. *JOP Conf. Series: Materials and Engireering* 862 062008 (2020).

© Д.Б. Вафин

19. Litventsev I Pyrolysis. *The Chemical Journal*, 2006.v.5. P. 42-46.

20. Afanasiev S.V., Ismaylov O.Z., Pyrkin A.V. et.al. Structural heterogeneity of reaction pipes from austenitic hightemperature alloys.IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 537 (2019) 022049. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/537/2/022049.

21. Wafin D.B., Butyakov M.A. Three-dimensional field of temperature and speed in furnaces of tube furnaces with acoustic burner. *Bulletin of KGTU them. A.N. Tupolev*. 2017. 2. P. 49-55.

Authors of the publication

Danil B. Vain - Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia.

Получено **10.05.2022г.**

Отредактировано **24.05.2022г.**

Принято **24.05.2022г.**



ОСОБЕННОСТИ ПРОБОПОДГОТОВКИ ВОДНЫХ ВЫТЯЖЕК КОМПОНЕНТОВ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ В ЦЕЛЯХ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

Семенова* М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6644-7663>, smi-2409@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Выявление зависимостей индекса токсичности компонентов кристаллических солнечных панелей EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид) от факторов пробоподготовки водных вытяжек, используемых при биотестировании по хемотаксической реакции тест-объектов *Paramecium caudatum* с использованием в качестве прибора-анализатора Биотестер-2М. К таким факторам были отнесены: температура экстракта, время выдержки экстракта исследуемых объектов в дистиллированной воде и использование других сред экстрагирования. *МЕТОДЫ.* В ходе исследования использовался метод биотестирования по хемотаксической реакции *Paramecium caudatum*. В опытах приготавливалась водная вытяжка согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10. Полученные вытяжки анализировались на приборе Биотестер-2М. Для каждого номера опыта проводилось исследование в трех кюветах, с каждой из которых прибор снимал 10 значений. Для оценки влияния факторов температуры экстракта и времени выдержки проводился эксперимент для температур 4°C и 35°C, позволяющие учитывать температуру на полигонах твердых бытовых отходов в разное время года. Временем экстрагирования были выбраны 1, 7, 21, 28, 42 и 56 суток. Анализ данных проводился с помощью двух факторного дисперсионного анализа с повторениями, реализованный средствами MatLab®. Для оценки влияния среды экстрагирования проводился эксперимент с заменой дистиллированной воды в качестве экстрагента на минеральную воду марки Вонаква и 1% раствор ацетона. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Произведен расчет вероятности ошибки гипотезы о влияние факторов температуры и времени выдержки экстракта на индекс токсичности при заданных уровнях значимости. Произведен сравнительный анализ усредненных индексов токсичности для исследуемых сред экстрагирования с дистиллированной водой, используемой в качестве среды экстрагирования в утвержденных методиках биотестирования. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Для случая сложных органических соединений, таких как EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид), индексы токсичности будут зависеть от ряда факторов: температуры экстракта, времени выдержки компонентов в экстракте и среды экстрагирования.

Ключевые слова: *Paramecium caudatum*; кристаллические солнечные панели; EVA; Tedlar®; среда экстрагирования; температура экстракта; время выдержки экстракта.

Для цитирования: Семенова М.И., Смирнов А.В., Веженкова И.В., Кустов Т.В., Ковалевская А.С. Особенности пробоподготовки водных вытяжек компонентов солнечных панелей в целях биотестирования // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2022. Т.24. № 3. С. 211-220. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-211-220.

FEATURES OF WATER EXTRACTS SAMPLE PREPARATION OF SOLAR PANELS COMPONENTS FOR BIOTESTING

M Semenova*, A Smirnov, I Vezhenkova, T Kustov, A Kovalevskaia

Saint-Petersburg electrotechnical university «LETI», Saint-Petersburg, Russia
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6644-7663>, smi-2409@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Detection of the dependences between the toxicity index of the components of crystalline solar panels EVA and Tedlar® and the factors of sample preparation of water extracts used in biotesting on the chemotactic reaction of *Paramecium caudatum* test

objects using *Biotester-2M* as an analyzer. These factors included: the temperature of the extract, the exposure time of the extract of the studied objects in distilled water, and the use of otherkind of extract. **METHODS.** In the course of the study, the biotesting method for the chemotactic reaction of *Paramecium caudatum* was used. In the experiments, an aqueous extract was prepared in accordance with PND F T 16.3.16-10. The resulting extracts were analyzed on a *Biotester-2M* device. For each experiment number, a study was carried out in three cuvettes, from each of which the device took 10 values. To assess the influence of extract temperature factors and exposure time, an experiment was carried out for temperatures of 4°C and 35°C, which allow taking into account the temperature at solid waste landfills at different times of the year. The extraction times were chosen to be 1, 7, 21, 28, 42 and 56 days. Data analysis was carried out using two-way replicated analysis of variance implemented using *MatLab®* tools. To assess the effect of the extraction medium, an experiment was carried out with the replacement of distilled water as an extract with mineral water of the *Bonaqua* brand and 1% acetone solution. **RESULTS.** The error probability of the hypothesis about the influence of temperature and exposure time factors of the extract on the toxicity index was calculated at given significance levels. A comparative analysis of the average toxicity indices for the studied extraction media with distilled water, which is used as an extraction medium in approved biotesting methods, was carried out. **CONCLUSION.** For complex organic compounds such as *EVA* and *Tedlar®* the toxicity indices will depend on a number of factors: the temperature of the extract, the residence time of the components in the extract, and the extraction medium.

Keywords: *Paramecium caudatum*; crystalline solar panels; *EVA*, *Tedlar®*; extraction medium; extract temperature; extract holding time.

For citation: Semenova M, Smirnov A, Vezhenkova I, Kustov T, Kovalevskaya A. Features of water extracts sample preparation of solar panels components for biotesting. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(3): 211-220. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-211-220.

Введение

В современном мире бурное развитие промышленности и рост производственных технологий не возможны без сопутствующего антропогенного воздействия, что, в свою очередь, приводит к необходимости обеспечения сохранности экосистем и здоровья населения.

Для решения данной проблемы необходим контроль за состоянием природной среды, который должен отвечать критериям точности наблюдений, их достоверности, и, что не менее важно, оперативности получения данных, так как количество потенциальных загрязнителей из года в год только увеличивается [1-3].

Именно поэтому в экологическом мониторинге используются методы биотестирования, которые представляют собой комплексную оценку исследуемой среды с получением информации о токсичности объекта. Токсичность, в свою очередь, представляет собой степень вредного воздействия химического соединения или группы соединений. Биотестирование основывается на использовании живых тест-объектов, а оценка токсичности проводится на основании их поведенческих особенностей, изменения морфологических и метаболических параметров, а также по выживанию вида в целом.

Одним из самых распространённых методов является определение индекса токсичности исследуемой среды по хемотаксической реакции инфузорий *Paramecium caudatum*. А спектр анализируемых сред включает в себя сточные, талые, природные, морские воды, водные вытяжки из грунтов, почв, отходов, донных отложений, продуктов питания как человека, так и животных.

Особое распространение инфузории получили благодаря ярко выраженным геотаксическим и хемотаксическим реакциям. Геотаксическая реакция выражается в свойстве простейших занимать верхние слои жидкости, в которой они находятся. Иными словами, у инфузорий наблюдается отрицательный геотаксис- свойство плыть против силы притяжения. Хемотаксическая реакция представляет собой ответную двигательную реакцию простейших на присутствующие в среде химические элементы-токсиканта. В случае, если химические элементы распознаются, как “непривлекательные”-потенциально опасные для метаболизма, то инфузории будут стремиться в зоны с наименьшими концентрациями данного химического элемента. Важно отметить тот факт, что хемотаксическая реакция простейших сильнее геотаксической.

Метод количественной оценки двигательных реакций *Paramecium caudatum* на

присутствие того или иного химического элемента или группы соединений возможен при создании стабильного во времени градиента концентраций исследуемой среды и среды заведомо благоприятной для инфузорий. При этом градиент должен создаваться таким образом, чтобы исследуемая среда была наслоена поверх среды с простейшими. Геотаксическая реакция вынуждает инфузорий двигаться в верхние слои жидкости, однако, при условии высокой токсичности исследуемой среды, будет наблюдаться минимальный выход простейших из заведомо благоприятных слоев.

Данные принципы лежат в основе устройства Биотестер-2 – прибора, считывающего изменение потока прошедшего излучения. Кювета, содержащая градиентную среду, помещается между источником света и приемником. От излучателя испускается световой поток, определенной площади. Каждый объект при пересечении потока взаимодействует с излучением, как прозрачная сфера, подчиняющаяся законам геометрической оптики, изменяя интенсивность прошедшего излучения. Изменение интенсивности будет фиксировать фотоприемник, на который приходит луч света. При этом количественное изменение интенсивности света пропорционально количеству инфузорий, а количество инфузорий конвертируется в индекс токсичности исследуемой среды. [4-8]

Согласно утвержденным методикам ПНД Ф Т 16.3.16-10 (ред. 2015 г.), ПНД Ф Т 16.1:2.3:3.10-06, ПНД Ф Т 16.3.12-07 и др. для проведения анализа токсичности необходимы этапы пробоподготовки. Стоит отметить тот факт, что при подготовке среды, будь то отходы, грунт или вода, исследуемым объектом будет являться водная вытяжка приготовленная, в большинстве случаев, на основе экстракта с дистиллированной водой. Методы пробоподготовки подразумевают, что перемешивание объекта с дистиллированной водой с помощью центрифугирования в течении получаса и дальнейшее экстрагирование в течении не более, чем двух часов, позволяет получить достаточно репрезентативную водную вытяжку, способную давать полноценную картину об исследуемом объекте. Исключение в пробоподготовке составляют лишь методики для определения токсичности комбикормов, позволяющие использовать водный раствор ацетона, в котором экстрагируется проба.

На данный момент, утвержденных методик пробоподготовки для органических веществ и сред с высоким содержанием органических соединений с использованием в качестве тест-организма инфузорий, не существует. Особый интерес вызывает тот факт, что *Paramecium caudatum* относятся к виду мезосапроб-простейших способных размножаться в полуанаэробных и анаэробных условиях, например, в водоемах с большим количеством органического вещества. Более того органические вещества воспринимаются простейшими как аттрактанты-“привлекательные” соединения, участвующие в метаболизме инфузорий.

Также остро стоит вопрос о достаточности утвержденных методик пробоподготовки для случая труднорастворимых или вовсе нерастворимых в дистиллированной воде соединений.

Одним из примеров таких соединений являются компоненты поликристаллических солнечных панелей.

Несмотря на то, что солнечная энергия сама по себе является возобновляемым, экологически чистым ресурсом, солнечные панели со временем приходят в негодность и их необходимо заменять новыми. В среднем срок службы солнечной панели варьируется от 20 до 30 лет, прежде чем модуль выйдет из строя. Причинами могут служить: воздействие ультрафиолета и влаги, разрушение компонентов устройства, таких как этиленвинилацетатная пленка в кристаллических солнечных панелях и т.д

Многие страны еще не имеют развитой системы их утилизации, так как солнечные батареи введены в эксплуатацию относительно недавно. Сегодня последним этапом жизненного цикла примерно 90% всех солнечных панелей является захоронение. Однако некоторые компоненты, такие как фотоэлектрический элемент, каркас, можно использовать повторно. . [9-11]

Помимо основного фотоэлемента и стекла, кристаллическая солнечная панель включает EVA (этиленвинилацетат) и Tedlar® (поливинилфторид)- полимерные материалы, токсичность и химическая инертность которых мало изучены.

Более того общемировые тенденции на возобновляемые и экологически чистые источники энергии, а также их эффективность и экономическая целесообразность, ведут к общему увеличению объемов использования солнечных панелей.

На данный момент проводились эксперименты по определению индекса токсичности данных компонентов солнечных панелей, представленные в работах [12-13].

Исходя из полученных данных которых можно сделать вывод о том, что *EVA* (этиленвинилацетат) и *Tedlar*® (поливинилфторид) имеют допустимую степень токсичности для случая стандартных методик биотестирования. Однако, в работах замечается тенденции, в которых при увеличении времени экстрагирования и температуры экстракта замечается рост индекса токсичности. Что может говорить о необходимости изучения степени данной зависимости и необходимости выявления других факторов, способных оказывать влияние на получаемый результат.

Таким образом, можно прийти к выводу, что исследование токсичности компонентов солнечных панелей, таких как *EVA* и *Tedlar*®, является крайне актуальным в условиях их распространяющегося использования и неизученности.

В связи с тем, что данные компоненты представляют собой сложные органические соединения, то особый интерес вызывает необходимость выявления факторов способных оказывать влияние на получаемую картину токсичности.

Данная работа направлена на количественное определение индекса токсичности компонентов поликристаллических солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*®, а также определение факторов, влияющих на токсичность данных компонентов.

Научная значимость работы заключается в выявлении зависимостей между значением индекса токсичности и факторов различной природы, влияющих на процедуру пробоподготовки водных вытяжек для проведения биотестового анализа компонентов солнечных панелей с использованием *Paramecium caudatum* в качестве тест-объекта. Среди таких факторов рассматриваются следующие: температура среды экстрагирования, время экстрагирования и среда для экстрагирования. Проводимые ранее исследования уже показывали зависимость индексов токсичности от температуры и выдержки. А особенности используемых тест-объектов и свойства исследуемых компонентов ставят под сомнение целесообразность использования стандартных методик пробоподготовки для биотестового анализа.

Практическая значимость исследования влияния данных факторов состоит в том, что изучение токсичности компонентов солнечных панелей позволит разработать новые методы утилизации солнечных панелей, и, как следствие, к более эффективному их использованию.

Материалы и методы исследования

В ходе представленного исследования основной целью ставилось выявление факторов, способных оказывать влияние на токсичность компонентов поликристаллических солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*®. К таким факторам были отнесены: температура среды экстрагирования, время экстрагирования и среда для экстрагирования.

Для определения вышеизложенных факторов исследование было разделено на несколько частей:

1. Определение зависимости индекса токсичности компонентов солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*® от температуры среды экстрагирования и времени выдержки.

Для выявления зависимости индекса токсичности от температуры и времени выдержки проводился эксперимент для температур 4°C и 35°C, позволяющие учитывать температуру на полигонах твердых бытовых отходов в разное время года. Временем экстрагирования были выбраны 1, 7, 21, 28, 42 и 56 суток.

В качестве тест-организмов использовались инфузории *Paramecium caudatum*. Для каждого значения температуры и времени выдержки приготавливалась водная вытяжка согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10. В качестве прибора-анализатора использовался Биотестер-2М.

Получение индекса токсичности производилось расчетным методом при сравнении индексов токсичности в контрольной пробе и исследуемой. Для каждого значения исследуемой пробы снималось по три показания прибора, согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10/

Для анализа полученных данных применялся двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями, который позволяет проверить следующие гипотезы:

- фактор времени выдержки (фактор столбцов) не влияет на отклик;
- фактор температуры выдержки (фактор строк) не влияет на отклик;
- взаимодействие между факторами отсутствует.

Дисперсионный анализ проводился с помощью *Matlab*, с использованием встроенной функции *anova2*. (*MarDisp.m*).

2. Определение зависимости индекса токсичности от среды экстрагирования компонентов солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*®.

Также проводился эксперимент для определения зависимости индекса токсичности

от среды экстрагирования. В качестве исследуемых сред экстрагирования использовалась минеральная вода марки *Bonaqua* и 1% раствор ацетона.

Выбор марки минеральной воды обусловлен рядом причин. Состав *Bonaqua* жестко ограничен. Сравнительный анализ показал, что качественный состав *Bonaqua* идентичен составу среде Лозина-Лозинского, являющейся оптимальной средой для культивации и содержания инфузорий. Единственное отличие- концентрации ионов в минеральной воде несколько выше, чем в среде Лозина-Лозинского. Данные свойства минеральной воды приближают ее состав к среде полигонов, на которых размещаются кристаллические панели, что объясняет выбор данного экстрагента и его научную значимость. Для исключения возможности губительного воздействия минеральной воды на тест-организмы, сначала был проведен ряд опытов, где *Bonaqua* рассматривалась в качестве анализируемой пробы. Состав минеральной воды представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Состав минеральной воды *Bonaqua*

Основной химический состав, мг/л:			
Катионы:		Анионы:	
Натрий (Na ⁺)	100-200	Гидрокарбонаты (HCO ₃ ⁻)	250-400
Кальций (Ca ²⁺)	25-70	Хлориды (Cl ⁻)	150-250
Магний (Mg ²⁺)	10-50	Сульфаты (SO ₄ ²⁻)	<30
Калий (K ⁺)	<5		
Общая минерализация: 500-1000 мг/л			
Общая жесткость 2-6 мг-экв/л			

Помимо минеральной воды средой экстрагирования был выбран 1% раствор ацетона. Выбор данной среды экстрагирования обуславливается попыткой использовать органический растворитель для получения картины токсичности компонентов солнечной панели в условиях их растворения в среде. Более того, согласно утвержденной методике ГОСТ 31674-2012 для комбикормов, использование раствора ацетона в качестве среды экстрагирования допустимо в следствии малого влияния на тест-организмы. Для исключения возможности губительного воздействия минеральной воды на тест-организмы, сначала был проведен ряд опытов, где 1% раствор ацетона рассматривался в качестве анализируемой пробы.

Для случая обоих сред экстрагирования приготавливалась водная вытяжка согласно ПНД Ф Т 16.3.16-10. В качестве прибора-анализатора использовался Биотестер-2М. Для исключения погрешности, достижения достоверности и релевантности результатов эксперимента проводились многократные измерения: все водные вытяжки проверялись на трех кюветах, с каждой из которых прибор снимал 10 значений. расчет индекса токсичности производился по формуле 1. полученные данные усреднялись для каждого опыта. Всего подобных опытов проводилось 6 и 5 для сред экстрагирования минеральной воды и 1% раствора ацетона соответственно.

Для сравнения влияния сред экстрагирования на получаемые индексы токсичности, также производились опыты с использованием дистиллированной воды в качестве экстрагента. Проведение эксперимента и количество опытов проводилось аналогично опытам с минеральной водой и ацетоном.

Результаты исследования

В ходе исследования были получены следующие результаты:

1. Определение зависимости индекса токсичности компонентов солнечных панелей EVA и Tedlar® от температуры среды экстрагирования и времени выдержки.

В ходе эксперимента были получены следующие матрицы данных индекса токсичности (таблицы 2-3).

Таблица 2

Данные для двух факторного анализа компонента Eva.

t сут/Т гр.	t=	1	7	21	28	42	56
T=4°C		0.0780	0.2440	0.3440	0.3620	0.3910	0.4160
		0.0690	0.2430	0.3490	0.3620	0.3890	0.4250
		0.0860	0.2250	0.3480	0.3590	0.3910	0.4300
T=35°C		0.0910	0.3840	0.4250	0.4520	0.5210	0.5320
		0.0890	0.3540	0.4380	0.4460	0.5190	0.5300
		0.0900	0.3680	0.4330	0.4390	0.5160	0.5410

Данные для двух факторного анализа компонента Tedlar®.

t сут/Т гр.	t=	1	7	21	28	42	56
T=4°C		0.0450	0.3300	0.3680	0.3790	0.4650	0.4760
		0.0440	0.3190	0.3750	0.3830	0.4400	0.4720
		0.0860	0.3660	0.3650	0.3860	0.4320	0.5780
T=35°C		0.0650	0.4140	0.4510	0.4650	0.5120	0.5630
		0.0590	0.3930	0.4430	0.4580	0.5230	0.5860
		0.0077	0.4110	0.4490	0.4610	0.5160	0.5780

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями представлены на рисунках 1-2.

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0.62994	5	0.12599	2516.98	8.18003e-32
Rows	0.07627	1	0.07627	1523.67	3.13939e-23
Interaction	0.0145	5	0.0029	57.93	1.30988e-12
Error	0.0012	24	0.00005		
Total	0.72191	35			

Рис. 1. Результаты двух факторного дисперсионного анализа с повторениями для компонента Eva.

Fig. 1. Results of two factor variance analysis with repetitions for Eva component.

Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0.82806	5	0.16561	1425.99	7.33611e-29
Rows	0.04452	1	0.04452	383.34	2.9005e-16
Interaction	0.00567	5	0.00113	9.76	3.47835e-05
Error	0.00279	24	0.00012		
Total	0.88104	35			

Рис. 2. Результаты двух факторного дисперсионного анализа с повторениями для компонента Tedlar®.

Fig. 2. Results of two factor variance analysis repeated for Tedlar® component.

В графе SS представлены разбросы, связанные с различием средних значений по столбцам, строкам, взаимодействием и ошибкой эксперимента. Параметр MS отражает оценки соответствующих дисперсий. При выполнении нулевых гипотез, которые предполагают влияние факторов эксперимента на индекс токсичности, эти дисперсии не должны значимо различаться. В последней колонке приведены вероятности того, что при нулевой гипотезе различия между дисперсии могут превышать значения, полученные на представленном экспериментальном материале (уровни значимости, с которыми соответствующие нулевые гипотезы могут быть отвергнуты). Таким образом, показано, что рассмотренные факторы практически достоверно оказывают влияние на индекс токсичности (вероятность ошибки меньше $1e^{-11}$)

2. Определение зависимости индекса токсичности компонентов солнечных панелей EVA и Tedlar® среды экстрагирования.

На первом этапе эксперимента проводились опыты по определению индекса токсичности самих сред экстрагирования. Индекс токсичности минеральной воды составил $0,07 \pm 0,01$, что позволяет говорить о безопасности использования минеральной воды в качестве экстрагента. а для случая 1% раствора ацетона все полученные значения находились в диапазоне от 0,01 до 0,07, что свидетельствует об отсутствии подавляющего действия исследуемого экстрагента на тест-организм.

В ходе определения индекса токсичности компонентов солнечных панелей были

получены данные, усредненные для каждого из опытов, представленные на рисунке 3-4.

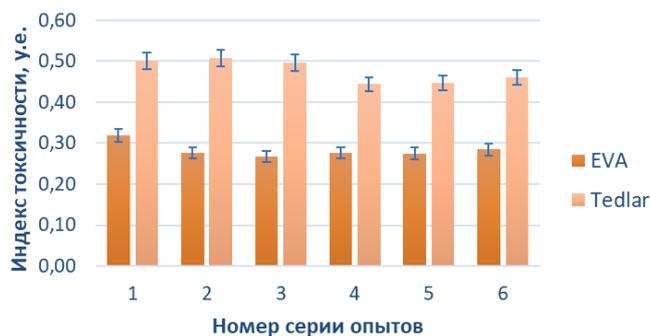


Рис. 3. Результаты определения индексов токсичности для компонентов Eva и Tedlar® при использовании минеральной воды в качестве среды экстрагирования.

Fig. 3. Results of toxicity indices determination for Eva and Tedlar® components when using mineral water as extraction medium.

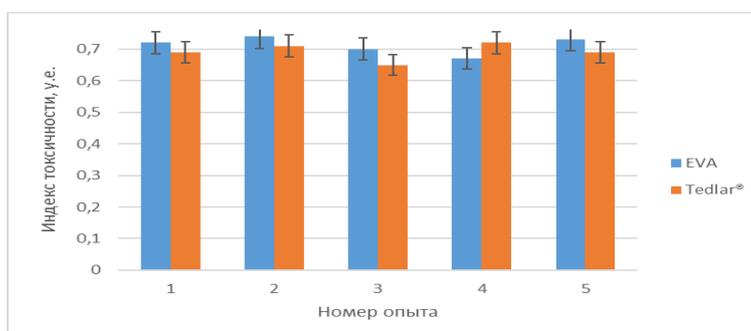


Рис. 4. Результаты определения индексов токсичности для компонентов Eva и Tedlar® при использовании 1% раствора ацетона в качестве среды экстрагирования

Fig. 4. Results of toxicity indices determination for Eva and Tedlar® components using 1% acetone solution as extraction medium

Помимо данных с выбранными средами экстрагирования проводились аналогичные опыты с использованием дистиллированной воды в качестве экстрагента. Данные по всем опытам были усреднены и представлены в таблице 4 с учетом погрешностей.

Таблица 4

Усредненные показатели индекса токсичности компонентов EVA и Tedlar® для случая разных сред экстрагирования

Среда экстрагирования	Усредненные индексы токсичности	
	Eva	Tedlar®
Минеральная вода марки Вонаqua	0,28±0,02	0,47±0,02
1% раствор ацетона	0,71±0,02	0,69±0,02
Дистиллированная вода	0,15±0,02	0,23±0,02

Обсуждение результатов

1. Определение зависимости индекса токсичности компонентов солнечных панелей EVA и Tedlar® от температуры среды экстрагирования и времени выдержки.

Данные результатов анализа были представлены на рисунках 1-2. Согласно полученным данным было показано, что в проведенных экспериментах наши факторы практически достоверно оказывают влияние на индекс токсичности для компонента Eva (вероятности ошибки меньше $1e^{-11}$).

Таким же образом, и для Tedlar показано, что в проведенных экспериментах наши факторы практически достоверно оказывают влияние на индекс токсичности (вероятности ошибки и меньше $1e^{-15}$ для факторов).

Таким образом, из полученных данных следует, что с высокой степенью вероятности индексы токсичности компонентов кристаллических солнечных панелей

зависят от температуры среды экстрагирования и времени выдержки экстракта.

2. Определение зависимости индекса токсичности компонентов солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*® среды экстрагирования.

Согласно данным, представленным в таблице 4 и в соответствии с методикой ФР.1.39.2015Л9244, можно сделать вывод о том, что компоненты *EVA* и *Tedlar*® при стандартных методиках пробоподготовки и использовании в качестве среды экстрагирования дистиллированную воду, не превышающую допустимую степень токсичности и могут считаться безопасными для экосистем и здоровья человека.

Однако, при изменении среды экстрагирования заметен рост среднего индекса токсичности данных компонентов.

При использовании минеральной воды марки *Bonaqua* наблюдается допустимая степень токсичности для компонента *Eva* и умеренная степень токсичности для компонента *Tedlar*.

А в случае использования 1% раствора ацетона оба компонента показывают резкий рост индекса токсичности, который, даже при условии небольшой токсичности ацетона, указывает на достаточно высокую степень токсичности компонентов и, соответственно, высокий риск для экосистем и здоровья человека.

Заключение

В ходе работы проводился ряд экспериментов, направленных на изучение влияния факторов внешней среды различной природы в ходе пробоподготовки водных вытяжек для определения индексов токсичности компонентов кристаллических солнечных панелей *EVA* и *Tedlar*® методом биотестирования, с использованием инфузорий *Paramecium caudatum* в качестве тест-объекта.

Актуальность исследования компонентов солнечных панелей обуславливается ростом их применения и слабой степенью изученности с точки зрения влияния на экосистемы и здоровье человека, что обуславливают необходимость проведения дополнительных экспериментов и проведения математического анализа получаемых данных.

В ходе проведенного исследования было установлено:

1. С высокой степенью вероятности индексы токсичности компонентов кристаллических солнечных панелей зависят от температуры среды экстрагирования и времени выдержки экстракта.

2. Использование в качестве среды экстрагирования минеральной воды марки *Bonaqua* позволяет получить более высокие показатели индекса токсичности по сравнению со стандартными методиками пробоподготовки.

3. Использование в качестве среды экстрагирования 1% раствора ацетона позволяет получить существенно более высокие показатели индекса токсичности по сравнению со стандартными методиками пробоподготовки.

Таким образом можно сделать вывод, что для случая сложных органических соединений, таких как *EVA* (этиленвинилацетат) и *Tedlar*® (поливинилфторид), индексы токсичности будут зависеть от ряда факторов: температуры экстракта, времени выдержки компонентов в экстракте и среды экстрагирования.

Литература

1. Агишев, Р.Р. Возможности экологического мониторинга атмосферного воздуха вокруг предприятий теплоэнергетики методами лазерного зондирования / Р.Р. Агишев, К.Х. Гильфанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 3-4. С. 95-96.

2. Дмитриенко, М.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий / М.А. Дмитриенко, Г.С. Няшина, Н.Е. Шлегель, С.А. Шевырев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т 19. № 3-4. С. 42-43.

3. Афанасьева, О.В. Комплексное использование золошлаковых отходов / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева, А.Д. Добронравов, Э.В. Шамсутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7-8. С. 26

4. Щеткина Т.Н. Использование автоматизированной биотехнической системы и простейших одноклеточных организмов для биотестирования объектов окружающей среды : автореф... дис. кан. био. наук. Калуга.: 207. 27 с.

5. С.М. Chesnokova, N.V. Chugai. Biological methods of estimating quality of environmental objects (Publishing House Vladim. state University, Vladimir, 2008)

6. G.A. Tihanovskay, Y.V. Mashihina, Biological environmental control (VoGU,

Vologda, 2016)

7. Т. Б. Лисицкая. Биотестирование с использованием инфузорий: Автореферат. СПб.: Изд-во СПбГТИ, 2007. 120 с.

8. Завальский Л.Ю. Хемотаксис бактерий // Биология URL: http://window.edu.ru/resource/604/20604/files/0109_023.pdf (дата обращения: 05.06.2022).

9. Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang, Global status of recycling waste solar panels: a review, *Waste Management* 75, 450–458 (2018)

10. R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, C. M. Chong *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550 (2019)

11. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review // *National Renewable energy Laboratory Journal Article* . - June, 2012. - №NREL/ JA-5200-51664. - С. 32-41.

12. Vezhenkova, I., Semenova M., Kovalevskaya, A., Gryaznov A., Rodríguez-Barroso M.R., Jimenez Castañeda R. Chemical composition determination of impurities and effect on the toxicity degree of solar panel components, *E3S Web of Conferences*, 220, 01057 (2020)

13. Semenova M., Vezhenkova I., Stepanova M., Kustov T. Determination of the degree of toxicity of EVA and Tedlar polymers during the disposal of components of crystalline solar panels, *E3S Web of Conferences*, 161, 01085 (2020)

14. К.Е. Кассатсир., М.С. Степанова *Dispersion and regression analysis (SPb, ETU (LETI))*, 2020) - 70 p.

15. N.I. Sidnyaev *Experiment planning theory and statistical data analysis (Moscow .: Yurayt, 2020)* - 496 p.

Авторы публикации

Семенова Маргарита Игоревна – аспирант, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина).

Смирнов Андрей Владимирович – аспирант, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина).

Веженкова Ирина Владимировна – канд. биол. наук, доцент кафедры Инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина).

Кустов Тарас Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры Инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина).

Ковалевская Алла Станиславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры Инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» (им. Ульянова-Ленина).

References

1. Agishev, R.R. Possibilities of environmental monitoring of atmospheric air around thermal power plants using laser sensing methods. *News of higher educational institutions. Energy Problems*. 2016;3-4:95-96.

2. Dmitrienko, M.A. Reduction of anthropogenic emissions during the combustion of coals and wastes of their processing as components of organic-water-coal suspensions / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, N.E. Shlegel, S.A. Shevyrev. *News of higher educational institutions. Energy Problems*. 2017;19:3-4:42-43.

3. Afanas'eva O.V. Integrated use of ash and slag waste. *Izvestia of higher educational institutions. Energy Problems*. 2015;7-8:26

4. Shchetkina T.N. *The use of an automated biotechnical system and the simplest unicellular organisms for biotesting of environmental objects: Abstract of the thesis*. can. bio. Sciences. Kaluga.: 207. 27 p.

5. С.М. Chesnokova, N.V. Chugai. Biological methods of estimating quality of environmental objects (Publishing House Vladim. state University, Vladimir, 2008)

6. G.A. Tihanovskay, Y.V. Mashihina, Biological environmental control (VoGU, Vologda, 2016)

7. T. B. Lisitskaya. Biotesting using infusoria: Author's abstract. St. Petersburg: SPbGTI, 2007. 120 p.
8. Zavalsky L.Yu. Chemotaxis of bacteria. *Biology* URL: http://window.edu.ru/resource/604/20604/files/0109_023.pdf (Accessed: 06/05/2022).
9. Yan Xu, Jinhui Li, Quanyin Tan, Anesia Lauren Peters, Congren Yang, Global status of recycling waste solar panels: a review, *Waste Management* 75, 450–458 (2018)
10. R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, C. M. *Chong Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 532-550 (2019)
11. Jordan D.C., Kurtz S.R. Photovoltaic Degradation Rates – An Analytical Review. *National Renewable energy Laboratory Journal Article* . June, 2012. №NREL/ JA-5200-51664. - C. 32-41.
12. Vezhenkova, I., Semenova M., Kovalevskaya, A., Gryaznov A., Rodríguez-Barroso M.R., Jimenez Castañeda R. *Chemical composition determination of impurities and effect on the toxicity degree of solar panel components*, E3S Web of Conferences, 220, 01057 (2020)
13. Semenova M., Vezhenkova I., Stepanova M., Kustov T. *Determination of the degree of toxicity of EVA and Tedlar polymers during the disposal of components of crystalline solar panels*. E3S Web of Conferences, 161, 01085 (2020)
14. K.E Kassatsier., M.S. Stepanova Dispersion and regression analysis (SPb, ETU (LETI)), 2020). 70 p.
15. N.I. Sidnyaev Experiment planning theory and statistical data analysis (Moscow : Yurayt, 2020). 496 p.

Authors of the publication

Semenova Margarita Igorevna – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Smirnov Andrey Vladimirovich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Vezhenkova Irina Vladimirovna – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Kustov Taras Vladimirovich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Kovalevskaya Alla Stanislavovna – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI".

Получено **04.06.2022г.**

Отредактировано **06.06.2022г.**

Принято **06.06.2022г.**

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
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 12,6
Заказ № 5254
Дата выхода в свет

Формат 70x108/16.
Уч.изд. л. 10,02.
Цена свободная