



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**

(26) 1 / 2024

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

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

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

Главный редактор	АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю.
Второй главный редактор	АХМЕТОВА И.Г.
Заместитель главного редактора	STANIMIR VALTCHEV

Ответственный секретарь	ГРАЧЕВА Е.И.
--------------------------------	--------------

Научный редактор	КАЛИНИНА М.В.
-------------------------	---------------

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

- ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ (ПО ВИДАМ ИЗМЕРЕНИЙ) (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

РИНЦ:

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

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

Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2024
Т.26, № 1
Январь – Февраль
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Свидетельство о регистрации СМИ:

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

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: AKHMETOVA IRINA GAREEVNA

Deputy Chief Editor: STANIMIR VALTCHEV

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

Sections:

Editorial board:

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

Address Krasnoselskaya str. 51, 420066, Kazan, Republic of Tatarstan,
Russian Federation

Tel./fax: +7 (843) 527-92-76

Printing House: LLC «FOLIANT»

Address of the printing house 420111, Republic of Tatarstan, g. Kazan, Str. Trade Union, 17 V

Email: problems_ener@mail.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ИВАНИЦКИЙ М.С. Производственный экологический контроль полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания органического топлива 3

КАЛАЙДА М.Л., САЕТОВ А.Р., ХАМИТОВА М.Ф. Исследование особенностей развития зообентоса в районе размещения рыбозащитного сооружения типа водовоздушная завеса в водоеме-охладителе ГРЭС 13

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

МАНАХОВА П.В., СМЕРНОВ А.В., СЕМЕНОВА М.И., КОВАЛЕВСКАЯ А.С. Влияние растворенного кислорода в среде на индексы токсичности, получаемые различными методами биотестирования 38

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

САВЕНКО А.Е., ГАБРИЭЛЬ И.В. Исследование режимов работы электротехнического комплекса танкера AION 51

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

РУСИНА А.Г., ОСГОНБААТАР ТУВШИН, МАТРЕНИН П.В., СЕРГЕЕВ Н.Н. Ансамблевая модель для прогнозирования выработки ветровых электростанций 64

ДОВГУН В.П., ЕГОРОВ Д.Э., БОЯРСКАЯ Н.П., СИНЯГОВСКИЙ А.Ф., РЫЖОВ Н.А. Широкополосные демпфирующие фильтры лестничной структуры 77

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

БОРУШ О.В., ГРИГОРЬЕВА О.К., ФРАНЦЕВА А.А. Тепловые и аэродинамические характеристики воздушно-конденсационной установки в составе паротурбинного энергоблока 93

МАКЕЕВА Е.Н., ЗВЕРЕВА Э.Р., МОРОЗОВА О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо 107

НИЗАМОВА А.Ш., АБАСЕВ Ю.В. Реконструкция производственно-отопительной котельной ЗАО «НП НЧ КБК им. С.П. ТИТОВА» с расширением здания 118

НОВОСЕЛОВА М.С., МИНГАЛЕЕВА Г.Р., МАРЬИН Г.Е., ТИТОВ А.В. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках 131

ГАПОНЕНКО С.О., КОНДРАТЬЕВ А.Е., КАЛИНИНА М.В., АХМЕТОВА Р.В. Система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта 144

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

СЛЮСАРСКИЙ К.В., АСИЛЬБЕКОВ А.К. Закономерности зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью 151

СОЛОВЬЕВ С.А., СОЛОВЬЕВА О.В., ШАКУРОВА Р.З., ГОЛУБЕВ Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников 165

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

АНДРЕЕВ В.П. Определение формы препятствия сенсорной системой мобильного робота с помощью ик-датчиков расстояния типа GP2Y0A (SHARP) 195

CONTENTS

ECOLOGICAL SAFETY

IVANITSKIY MS. Industrial environmental control of polycyclic aromatic hydrocarbons in organic fuel combustion product	3
KALAIIDA ML., SAETOV AR., KHAMITOVA MF. Study of the features of zoobenthos development in the area of water air curtain type fish protection structure in the cooling reservoir of the SDPP	13

METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT

MANAKHOVA PM., SMIRNOV AV., SEMENOVA MI., KOVALEVSKAYA AS. Influence of dissolved oxygen in the environment on toxicity indices obtained by various bio-testing methods	38
---	----

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

SAVENKO AE., GABRIEL IV. Study of operating modes of the AION tanker electrical power system	51
--	----

ELECTRIC POWER INDUSTRY

RUSINA AG., OSGONBAATAR TUVSHIN, MATRENIN PV., SERGEEV NN. Ensemble machine learning model for forecasting wind farm generation	64
DOVGUN VP., EGOROV DE., BOYARSKAYA NP., SINYAGOVSKIY AF., RYZHOV NA. Ladder broadband damping filters	77

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

BORUSH OV., GRIGORYEVA OK., FRANTSEVA AA. Thermal and aerodynamic characteristics of air cooled condenserfor steam turbine power unit	93
MAKEEVA E.N., ZVEREVA E.R., MOROZOVA O.YU. Conversion of boiler houses to alternative fuel	107
NIZAMOVA ASH., ABASEVYUV. Reconstruction of production and heating boiler plant JSC "NP NC KBK IM. S.P. Titov" with building expansion	118
NOVOSELOVA MS., MINGALEEVA GR., MARIN GE., TITOV AV. Perspectives of using syngas in gas turbine plants	131
GAPONENKO SO., KONDRATIEV AE., KALININA MV., AKHMETOVA RV. System of automated monitoring and forecasting of the remaining resource of pipeline transport	144

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

SLYUSARSKIY KV., ASILBEKOV AK. Features of ignition and combustion of low-grade coal mixed with pyrolysis liquid	151
SOLOVEV SA., SOLOVEVA OV., SHAKUROVA RZ., GOLUBEV YAP. Overview of the application of open cell foam heat exchangers	165

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

ANDREEV VP. Obstacle shape determination by mobile robot sensor system using GP2Y0A (SHARP) type ir distance sensors	195
--	-----

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 621.311.22

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Иваницкий М.С.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском, Россия

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

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в расчетном обосновании выбора места установки многоточечного пробоотборного зонда в измерительном сечении газохода котельных установок энергетических предприятий и ТЭС, оказывающих значительное негативное влияние выбросов на окружающую среду, для повышения достоверности и представительности инструментальных измерений при проведении производственного экологического контроля (ПЭК) загрязняющих выбросов (ЗВ). ЦЕЛЬ. Повышение экологической безопасности тепловых электрических станций в действующих условиях внедрения государственных принципов технологического нормирования выбросов связано с установлением на энергетических предприятиях со значительным негативным влиянием на окружающую среду технологических показателей выбросов для каждого источника загрязнения атмосферы. В этой связи на энергетических предприятиях должен осуществляться круглосуточный мониторинг ЗВ, который требует обеспечения достоверного инструментального контроля содержания маркерных веществ в продуктах сгорания энергетических котлов посредством определения представительной пробоотборной точки на газоходе или дымовой трубе энергетической котельной установки. МЕТОДЫ. В работе применены методы компьютерного моделирования динамики газов для определения локальных полей концентрации ЗВ и скорости потока и оценка их неравномерности в газоходе энергетического котла. РЕЗУЛЬТАТЫ. На примере действующей энергетической котельной установки тепловой электрической станции определено контрольное сечение газохода для обеспечения производственного экологического контроля маркерных веществ в продуктах сгорания органического топлива. Определены средние значения концентрации ЗВ и скорости потока продуктов сгорания локальных полей в расчетных сечениях и их величины на продольной оси газохода котла, выполнены оценки их неравномерности распределения. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты исследования могут быть использованы на энергетических предприятиях и ТЭС при обосновании выбора контрольного представительного измерительного сечения для проведения ПЭК, разработке программы повышения экологической эффективности (ППЭЭ).

Ключевые слова: экологическая безопасность ТЭС; технологическое нормирование выбросов; производственный экологический контроль; полициклические ароматические углеводороды.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Производственный экологический контроль полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания органического топлива // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12.

INDUSTRIAL ENVIRONMENTAL CONTROL OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS IN ORGANIC FUEL COMBUSTION PRODUCTS

Ivanitskiy MS.

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

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

Abstract: RELEVANCE of this study lies in the computational justification of the choice of the installation location of a multipoint sampling probe in the measuring section of the flue of boiler plants of energy enterprises and thermal power plants that have a significant negative impact of emissions on the environment, in order to increase the reliability and representativeness of instrumental measurements during industrial environmental control (PEC) of polluting emissions (PE). PURPOSE. Improving the environmental safety of thermal power plants in the current conditions of the introduction of state principles of technological regulation of emissions is associated with the establishment of technological emission indicators for each source of atmospheric pollution at energy enterprises with a significant negative impact on the environment. In this regard, energy enterprises should carry out round-the-clock monitoring of PE, which requires reliable instrumental control of the content of marker substances in the combustion products of power boilers by determining a representative sampling point on the flue or chimney of an energy boiler installation. METHODS. The paper uses methods of computer simulation of gas dynamics to determine the local fields of concentration of PE and flow velocity and assess their unevenness in the flue of an energy boiler. RESULTS. Using the example of an operating energy boiler plant of a thermal power plant, a control section of the flue was determined to ensure industrial environmental control of marker substances in the combustion products of organic fuels. The average values of the concentration of PE and the flow rate of combustion products of local fields in the calculated sections and their values on the longitudinal axis of the boiler flue are determined, and their uneven distribution is estimated. CONCLUSION. The obtained research results can be used at energy enterprises and thermal power plants to justify the choice of a control representative measuring section for conducting a PEC, and to develop an environmental efficiency improvement program (EEIP).

Keywords: environmental safety of thermal power plants, technological regulation of emissions, industrial environmental control, polycyclic aromatic hydrocarbons

For citation: Ivanitskiy MS. Industrial environmental control of polycyclic aromatic hydrocarbons in organic fuel combustion products. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (1): 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-3-12.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

Охрана окружающей среды в части снижения негативного влияния объектов теплоэнергетики основана на реализации государственной природоохранной политики, которая предусматривает деление всех энергетических предприятий на IV категории по степени воздействия выбросов на атмосферный воздух, технологическое нормирование загрязняющих веществ, сбор и передачу информации в государственный фонд экологического мониторинга. Таким образом, принципы государственного регулирования предполагают необходимость внедрения на действующих ТЭС I категории круглосуточного мониторинга выбросов ЗВ, установленных требованиями ИТС 38-2017 и ПНСТ 187-2017. К маркерным веществам относятся диоксид азота, диоксид серы, монооксид углерода и зола твердого топлива. Однако, в силу того, что технологические показатели выбросов, предложенные в ИТС 38-2017, не были утверждены, в 2022 году разработан и введен в действие актуализированный ИТС 38-2022, предусматривающий новые технологические нормативы [1 – 3].

В соответствии с ИТС 38-2022, утвержденные технологические показатели выбросов маркерных веществ, для топливосжигающих установок тепловой мощностью 50 МВт и более, вступили в силу с 01.09.2023 года. Поэтому энергетические предприятия и ТЭС I категории до 31.12.2024 года должны подготовить и направить заявку на получение комплексного экологического разрешения (КЭР). Следует отметить, в соответствии с

новыми требованиями при подаче заявки на получение КЭР для таких топливосжигающих установок необходимо разрабатывать ППЭЭ. Кроме того, для выполнения технологических показателей выбросов при сжигании органического топлива с различными теплотехническими характеристиками рекомендуется использование малозатратных наилучших доступных технологий (НДТ) (для снижения золы твердого топлива – модернизация или замена батарейных циклонов, внедрение рукавных или электрофильтров; диоксида серы – перевод котлов на сжигание малосернистых топлив, применение мокрых золоуловителей с добавками щелочных вод, мокросухая очистка; диоксида азота – малозатратные режимно-технологические мероприятия из перечня НДТ – нестехиометрическое сжигание, двухступенчатое сжигание, рециркуляция продуктов сгорания, контролируемый химический недожог) [2, 3].

Необходимо отметить, что основное оборудование действующих ТЭС разделено на 3 возрастные группы в соответствии со сроком ввода в эксплуатацию (первая группа (старое оборудование) – до 31.12.2000, вторая группа – в период с 01.01.2001 по 31.12.2025, третья группа – начиная с 01.01.2026). Таким образом, основные проблемы адаптации оборудования реальных ТЭС к технологическим показателям выбросов согласно ИТС 38-2022 связаны с тем, что загрязняющие атмосферу выбросы большей части топливосжигающих установок, эксплуатация которых начата до 31.12.2000, не соответствуют новым актуализированным требованиям технологических показателей, значения которых более ужесточены по сравнению с ИТС 38-2017 [2].

В части реализации новых требований ИТС 38-2022 фактические концентрации маркерных веществ в продуктах сгорания, удаляемых в атмосферу, обеспечиваются установкой (основным и/или вспомогательным оборудованием). Таким образом, возможность удовлетворения выбросов маркерных веществ соответствующим технологическим показателям, согласно основным положениям и требованиям, предусматривается, в том числе для вновь вводимого газоочистного оборудования, особенно, с учетом того, что большая часть топливосжигающих установок была введена в эксплуатацию до 31.12.2000 года. Данная особенность актуализированных требований ИТС 38-2022 позволит энергетическим предприятиям более активно стимулировать технологическое планирование и внедрение НДТ в сложившихся условиях.

Кроме того, согласно Приказам Минприроды РФ от 14.02.2019 года №89 и от 17.12.2018 года №666, энергетические предприятия и ТЭС I категории должны определять для каждого ИЗА нормативы допустимых выбросов канцерогенных и мутагенных веществ. К таким веществам отнесен бенз(а)пирен (БП), который является ярким представителем всей группы полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), образующихся при определенных режимных условиях сжигании любого органического топлива в котельных установках (например, природный газ, мазут, уголь различных марок) [3, 4].

Для организации и проведения круглосуточного мониторинга выбросов маркерных веществ на ТЭС рекомендуется применение многоточечных зондов. Отмечается, что для соблюдения требований ПНСТ 187-2017 и ИТС 22.1-2016 измерительные сечения газохода необходимо определять на стадии проектирования котельных установок, при этом экспериментальным или расчетным способом должно быть доказано, что в измерительном сечении газохода или ствола дымовой трубы обеспечивается требуемая суммарная относительная погрешность измерений, которая для скорости дымовых газов и концентрации газообразных ЗВ не должна превышать $\pm 10\%$, а при измерении массового выброса ЗВ не должна превышать $\pm 25\%$. При этом проведение тарировки измерительного сечения газохода не позволяет достоверно обеспечить представительность измерительной точки. В случае, если однородность измеряемого показателя ЗВ не будет подтверждена, то инструментальные измерения необходимо проводить во всех точках измерительной сетки, для этого измерительное сечение газохода котельной установки разбивают на равные по площади участки. Следует отметить, что автоматический круглосуточный мониторинг выбросов ЗВ на энергетических предприятиях можно организовать путем проведения инструментальных измерений в точках измерительной сетки. Но с учетом необходимости выполнения требований по обеспечению представительности измерительной точки для массового расхода и плотности дымовых газов на разных режимах работы энергетической котельной установки, корректная организация круглосуточного мониторинга выбросов ЗВ в действующих условиях не представляется возможной [5, 6].

В случае установки измерительного оборудования на дымовую трубу обязательно должно быть выполнено условие того, что к конкретной дымовой трубе подключены котельные установки, работающие на одном виде топлива. Таким образом, в соответствии с требованиями ИТС 22.1-2016 на энергетических предприятиях и ТЭС I категории при

осуществлении производственного контроля выбор измерительного сечения должен обеспечить представительность пробы для повышения достоверности выполняемых инструментальных измерений концентрации ЗВ [6].

Аналитическое определение ПАУ в дымовых газах энергетических котлов осуществляют с применением спектрально-флуоресцентного метода и высокоэффективной жидкостной хроматографии. Указанные методы индикации ПАУ включают этапы отбора газовой пробы в представительном измерительном сечении, ее термостатирование для устранения возможной конденсации паров и детектирование компонентов пробы, качество выполнения которых оказывает значительное влияние на общую погрешность аналитического метода определения представителей ПАУ в дымовых газах котельных установок [7, 8].

Существенные сложности аналитического определения концентрации БП в продуктах сгорания возникают вследствие того, что в соответствии с ПНСТ 187-2017 при проведении инструментальных измерений и организации контроля выбросов должны быть определены методики измерений и места установки измерительных систем на стадии проектирования котельных установок. Данные требования могут быть учтены только для третьей возрастной группы основного оборудования ТЭС, введение в эксплуатацию которых планируется, начиная с 01.01.2026 года. При решении проблем адаптации оборудования реальных ТЭС к технологическим показателям выбросов согласно ИТС 38-2022 приведенные условия могут быть использованы на этапах модернизации или реконструкции основного оборудования энергетических предприятий [2].

В работе [5] на основе имеющегося опыта разработки нормативной законодательной базы в области охраны окружающей среды для совершенствования системы нормирования негативного воздействия объектов теплоэнергетики на атмосферный воздух предлагается разработка нового обобщенного нормативного документа, регламентирующего нормы общего действия для котельных установок малой тепловой мощности, в том числе оказывающих незначительное негативное влияние на окружающую среду. Реализация принципов норм общего действия в отношении энергетических объектов направлена на стимулирование внедрения на действующих тепловых электрических станциях и котельных НДТ, позволяющих обеспечить требуемые технологические показатели выбросов. Важно заметить, что в случае отсутствия утвержденных методик расчета концентраций загрязняющих выбросов, в том числе не включенных в перечень маркерных веществ, на энергетических предприятиях существует необходимость проведения инструментальных измерений и оценки реальных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. В этой связи, определение степени негативного воздействия загрязняющих выбросов котельных установок на окружающую среду должно проводиться с учетом результатов расчета параметров рассеивания вредных выбросов в атмосферном воздухе, что необходимо учитывать при разработке программы повышения экологической эффективности для действующих ТЭС I категории.

Следует отметить, что разработка нового обобщенного нормативного документа, регламентирующего нормы общего действия для котельных установок малой тепловой мощности, расположенных в зоне действующих ТЭС I категории, может способствовать развитию и совершенствованию нормативной базы в области охраны окружающей среды, в том числе, системы технологического регулирования негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду, основанной на принципах НДТ [9 – 11].

Таким образом, целью работы является обеспечение достоверности инструментальных измерений маркерных веществ при организации и проведении ПЭК ЗВ на энергетических предприятиях и ТЭС I категории.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что с применением методов компьютерного моделирования в соответствии с ПНСТ 187-2017 расчетным путем доказана возможность выбора представительного измерительного сечения на газоходе котельной установки при организации и проведении ПЭК ЗВ на энергетических предприятиях и ТЭС.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности их использования на энергетических предприятиях и ТЭС I категории, оказывающих значительное негативное влияние на окружающую среду, при обосновании выбора контрольного представительного измерительного сечения для инструментального измерения концентрации ЗВ, в том числе ПАУ.

Для проведения инструментальных измерений, обладающих достоверными результатами, требуется решение всех организационных вопросов создания систем автоматического контроля и учета выбросов загрязняющих веществ, учитывающих

особенности действующих котельных установок ТЭС, несмотря на основные положения, регламентированные ПНСТ 187-2017. Поэтому для проведения ПЭК на этапе проектирования котельных установок необходимо определить методики инструментальных измерений и места установки измерительных пробоотборных зондов [6].

Материалы и методы (Materials and methods)

Моделирование течения потока в газоходе энергетического котла (основное топливо – природный газ), паропроизводительностью 420 т/ч, выполнено с применением пакета прикладных программ *Ansys Fluent* 19.0. На предварительной стадии разработана 3D-модель газохода котла в соответствии с его реальной конфигурацией и геометрическими размерами (общая длина рассмотренного участка газохода 30 м, площадь поперечного сечения газохода 3,5 м²), определены размеры расчетной сетки на поверхности газохода, равной 150×150 мм. Газодинамическое течение продуктов сгорания в моделируемом канале прямоугольного сечения рассмотрено при турбулентном режиме движения потока газов в пределах $0,8 \cdot 10^6 < Re < 2 \cdot 10^6$.

Как было отмечено ранее, аналитическое определение ПАУ в дымовых газах энергетических котлов осуществляют с применением методов высокоэффективной жидкостной хроматографии, которые на ТЭС практически недоступны. При этом с учетом технологических сложностей отбора пробы, необходимостью ее термостатирования, детектирования отдельных представителей ПАУ, относительная погрешность метода может составлять 25% и более [12 – 15]. Однородность потока дымовых газов оказывает влияние на методику отбора пробы для измерения содержания ЗВ. Газовая проба может быть отобрана в отдельной точке измерительного сечения газохода котла в том случае, если будет доказана однородность распределения измеряемого показателя ЗВ в измерительной плоскости. В случае, если однородность измеряемого показателя ЗВ не будет подтверждена, то инструментальные измерения необходимо проводить во всех точках измерительной сетки, которая условно разбивает измерительное сечение газохода энергетического котла на равные по площади участки. В этой связи применение расчетных методов позволяет обосновать возможность выбора представительного измерительного сечения газохода энергетического котла для установки многоточечных пробоотборных зондов с целью повышения достоверности инструментальных измерений маркерных веществ посредством снижения неравномерности распределения скорости потока уходящих газов и концентрации газообразных ЗВ по сечению газохода [6 – 8].

Кроме того, согласно требованиям ПНСТ 187-2017 при проведении инструментальных измерений производственных выбросов экспериментальным или расчетным способом необходимо подтвердить, что погрешность измерения скорости потока и концентрации ЗВ в газоходе находится в диапазоне $\pm 10\%$, а в случае оценки массы ЗВ не превышает $\pm 25\%$ [6].

При организации круглосуточного мониторинга выбросов ЗВ средства измерения должны обеспечивать верхний предел измерений не менее 2,5-кратной величины показателя выбросов ЗВ для каждого конкретного ИЗА. Регламентирован осредненный период передачи информации в государственный фонд экологического мониторинга о выбросах ЗВ ТЭС и энергетических предприятий, который составляет 20 мин, при этом вся информация об измеренных показателях выбросов ЗВ на энергетическом предприятии должна храниться не менее 12 месяцев [5, 6].

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Обеспечение среднеинтегральных значений концентрации ЗВ в представительной измерительной точке газохода котла при проведении инструментальных измерений ПЭК практически невозможно, в силу того, что на разных режимах работы энергетических котлов пробоотборная точка находится в разных сечениях газохода. Поэтому для каждого режима работы котельной установки конкретное измерительное сечение газохода необходимо устанавливать отдельно. Кроме того, для повышения достоверности инструментальных измерений при организации и проведении ПЭК ЗВ для обеспечения требуемой неравномерности концентрационных и скоростных полей рекомендуется использовать многоточечные пробоотборные зонды, которые устанавливают в представительном измерительном сечении по середине каждой стороны газохода.

Важно отметить, относительная погрешность, обусловленная отсутствием представительности газовой пробы вследствие значительных локальных отклонений значений средней концентрации и скорости потока от их величин на продольной оси газохода котельной установки, а также влиянием неравномерности распределения температурных полей, которые могут характеризоваться разными режимами работы энергетического котла в реальных условиях может находиться в пределах от 10 до 40%, что

не удовлетворяет требованиям ПНСТ 187-2017 и ИТС 22.1-2016, предъявляемым к представительным измерительным сечениям (плоскостям) или точкам для выполнения инструментальных измерений компонентов газовой пробы при организации и проведении ПЭК. Вследствие возникновения сложности монтажа, эксплуатации и обслуживания измерительных систем при их расположении на дымовых трубах, на практике пробоотборные системы круглосуточного мониторинга выбросов ЗВ рекомендуется устанавливать в газоходах котлов. Кроме того, такое расположение пробоотборников позволяет осуществлять регулирование топочного процесса конкретного энергетической котельной установки [5, 6].

В части решения поставленной задачи исследования на примере котельной установки паропроизводительностью 420 т/ч, работающей на природном газе, выполнено моделирование газодинамического течения продуктов сгорания в канале газохода прямоугольного сечения для обоснования выбора представительного измерительного сечения, характеризующегося величиной неравномерности концентрационных и скоростных полей ЗВ, не превышающей $\pm 10\%$. Ниже представлены результаты определения неравномерности концентрационных и скоростных полей по расчетным сечениям (после водяного экономайзера, перед дымососом, после дымососа).

Расчетное сечение после водяного экономайзера позволяет по составу продуктов сгорания органического топлива оценить эффективность организации процесса сжигания топлива в котельной установке.

Локальные неравномерности полей в расчетном сечении после водяного экономайзера приведены на рисунке 1.

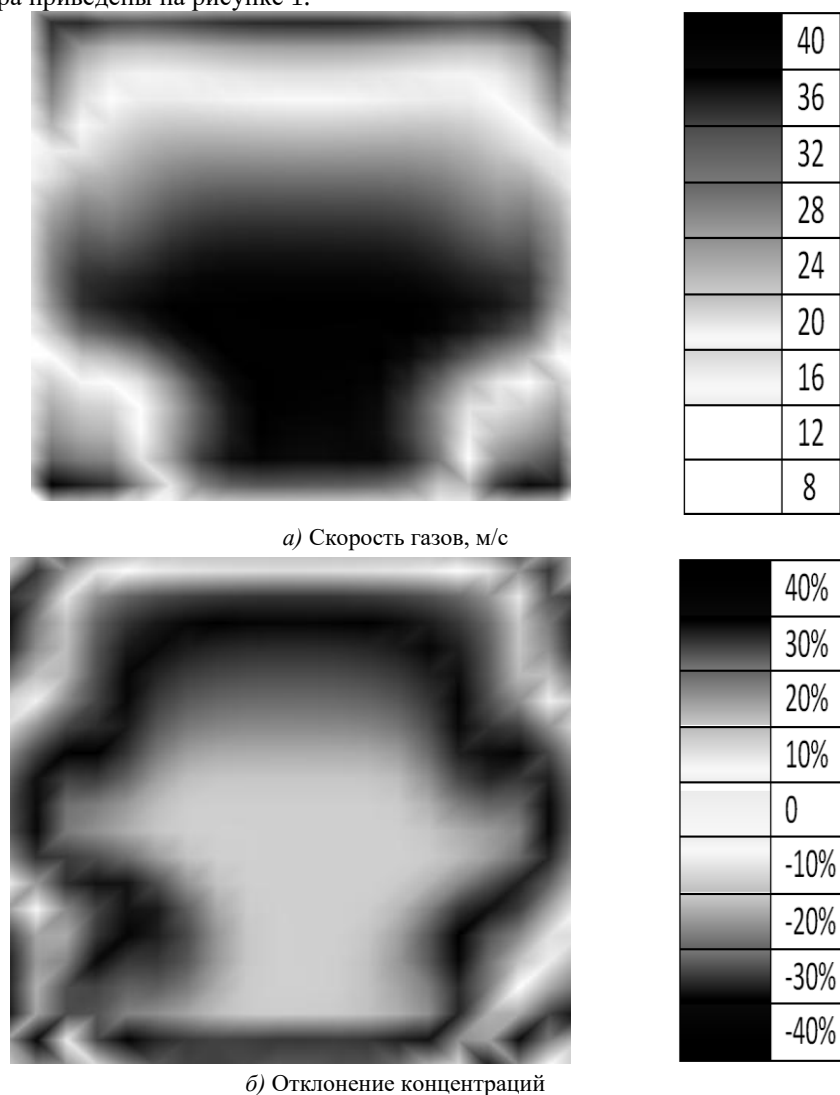


Рис. 1. Локальные неравномерности полей в расчетном сечении после водяного экономайзера: а) скоростное поле; б) концентрационное поле

Fig. 1. Local field irregularities in the calculated cross section after the water economizer: a) velocity field; b) concentration field

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

На рисунке 2 представлены локальные неравномерности полей в расчетном сечении газохода перед дымососом. В сечении газохода перед дымососом топочные процессы полностью завершены, однако коэффициент неравномерности концентрационных и скоростных полей (рис. 2. а, б) превышает установленные значения ПНСТ 187-2017, что не позволяет обеспечить выполнение требований ПЭК ЗВ на ТЭС.

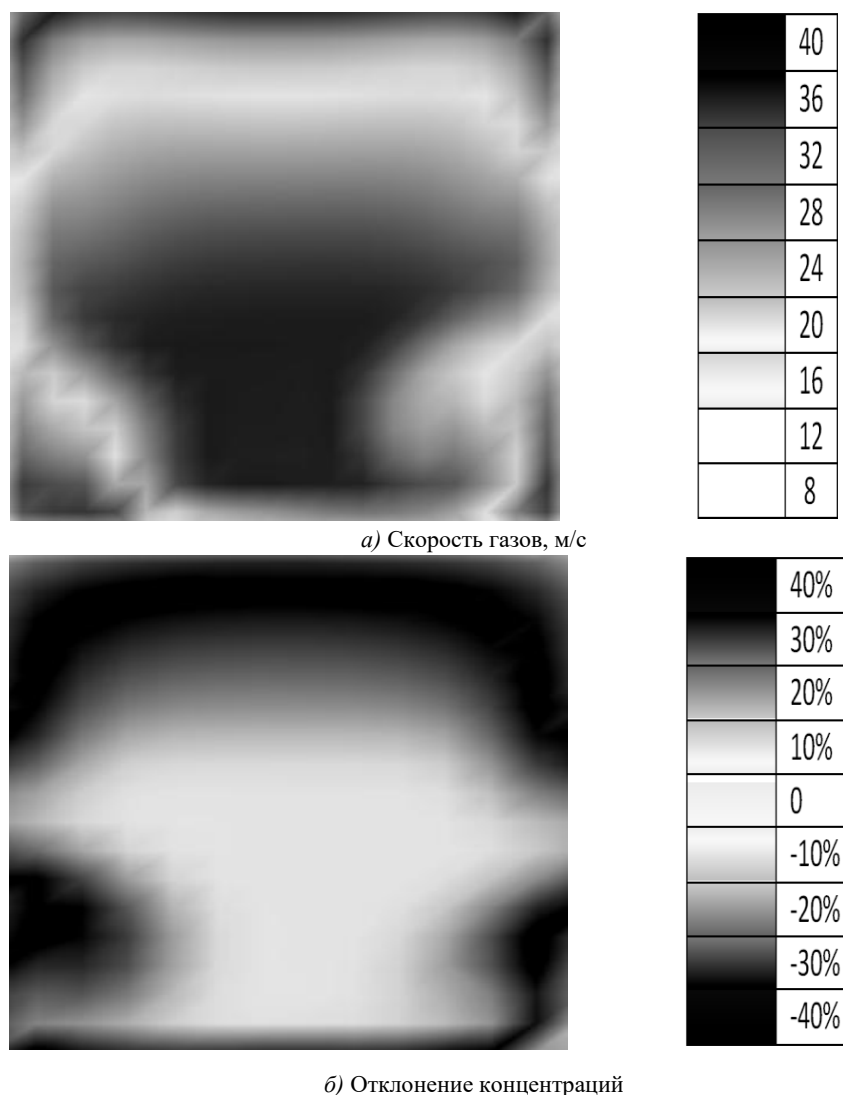


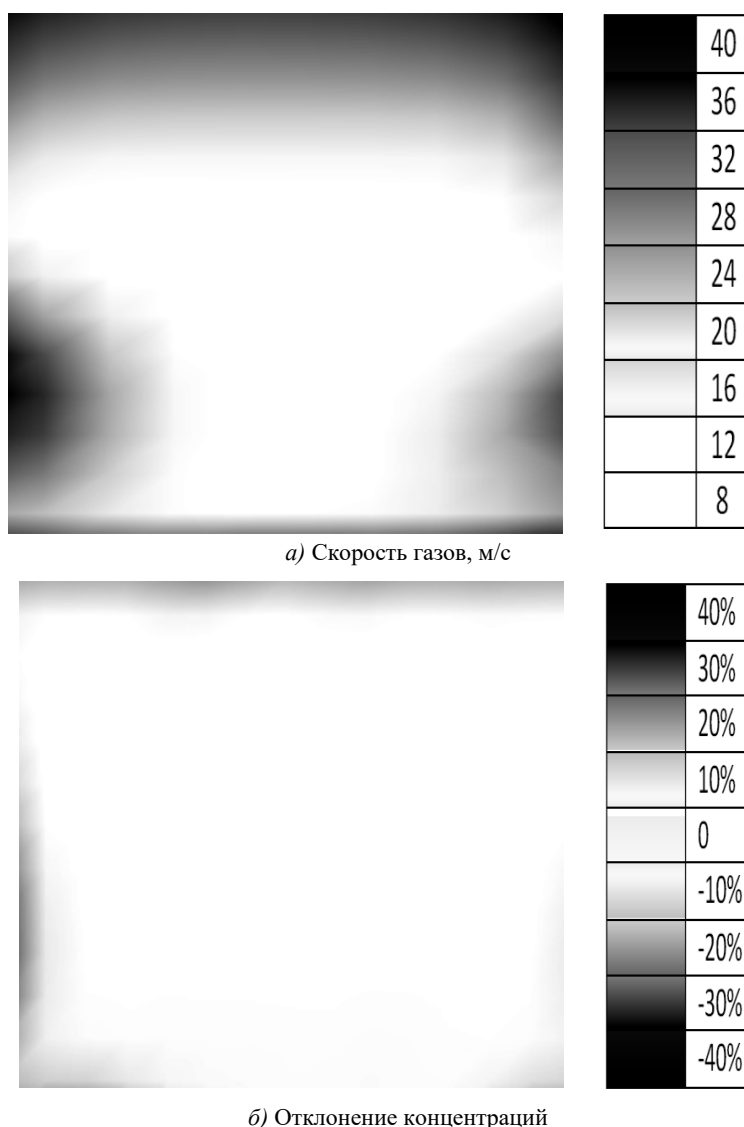
Рис. 2. Локальные неравномерности полей в расчетном сечении газохода перед дымососом: а) скоростное поле; б) концентрационное поле

Fig. 2. Local field irregularities in the design section of the flue in front of the chimney: а) velocity field; б) concentration field

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

Результаты моделирования потока газов в расчетном сечении газохода после дымососа представлены на рисунке 3. Расчетные оценки показывают, что в данном сечении (рис.3. а, б) значения локальных неравномерностей полей концентрации ЗВ и скорости потока дымовых газов соответствуют требованиям ПНСТ 187-2017.

Расчетные оценки, выполненные в ходе исследования, позволили установить, что представительным измерительным сечением для установки многоточечных зондов для организации и проведения ПЭК ЗВ на ТЭС является расчетное сечение газохода котла за дымососом. Результаты компьютерного моделирования показали, что суммарная относительная погрешность измерений концентрации и скорости ЗВ, в том числе ПАУ в данном расчетном сечении находится в диапазоне $\pm 10\%$, массы ЗВ в пределах $\pm 25\%$, что соответствует требованиям ПНСТ 187-2017.



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

Рис. 3. Локальные неравномерности полей в расчетном сечении газохода за дымососом: а) скоростное поле; б) концентрационное поле

Результаты моделирования могут быть использованы при обосновании выбора измерительного сечения при сжигании в котлах угля и мазута, а также при создании систем непрерывного (круглосуточного) контроля и учета выбросов (СНКиУВ) маркерных веществ в атмосферу. Важно отметить, что относительная погрешность измерения концентрационных и скоростных полей в газоходе энергетического котла, сжигающего уголь или мазут, при создании СНКиУВ не должна превышать 10%.

Заключение (Conclusions)

Анализ нормативной базы современного природоохранного законодательства показал, что по сравнению с ИТС 38-2017 требованиями ИТС 38-2022 для энергетических предприятий и ТЭС I категории установлены более жесткие технологические показатели загрязняющих выбросов.

По результатам исследования установлено, что в настоящее время не в полной мере сформирована система технологического регулирования выбросов ЗВ ТЭС, основанная на принципах НДТ.

Сформированы практические рекомендации применения многоточечных пробоотборных зондов, позволяющих обеспечить требуемую достоверность инструментальных измерений на энергетических предприятиях и ТЭС I категории, отличающиеся от известных тем, что расчетным способом доказана возможность организации и проведения ПЭК ЗВ, в том числе ПАУ, согласно ПНСТ 187-2017, при которой относительная погрешность определения концентрации и массы ЗВ в

представительном измерительном сечении газохода котла не превышает $\pm 10\%$, суммарная относительная погрешность инструментальных измерений массового выброса ЗВ находится в пределах $\pm 25\%$.

Полученные результаты исследования могут быть использованы на энергетических предприятиях и ТЭС I категории при обосновании выбора контрольного представительного сечения для инструментального измерения концентрации загрязняющих веществ в продуктах сгорания энергетических котлов.

Литература

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Дмитренко В.В., Рудомазин В.В. Особенности актуализированного информационно-технического справочника ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Электрические станции. 2022. № 12 (1097). С. 42 – 50.
2. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Гусева Т.В. Проблемы адаптации действующего оборудования ТЭС к технологическим показателям выбросов ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Теплоэнергетика. 2023. № 10. С. 115 – 123.
3. Власенко С.А., Росляков П.В., Сердюков В.А. Методические подходы к определению технологических показателей наилучших доступных технологий при актуализации информационно-технического справочника ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 55. С. 31 – 39.
4. Росляков П. В., Кондратьева О. Е., Альмгрен А. Р., Сивцева С. А., Бурченко В. Д. Технические и экономические проблемы и риски внедрения наилучших доступных технологий на российских ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 1. С. 15 – 20.
5. Росляков П. В., Черкасский Е. В., Гусева Т. В., Тихонова И. О., Lundholm M. Технологическое нормирование объектов теплоэлектроэнергетики: наилучшие доступные технологии и нормы общего действия // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 1 – 13.
6. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 68 – 77.
7. Теплицкая Т.А. Методы количественного анализа ПАУ для фоновоего мониторинга загрязняющих веществ // Проблемы фоновоего мониторинга состояния природной среды. 1986. Вып. 4. С. 257 – 262.
8. Филиппов С.П., Павлов П.П., Кейко А.В., Горшков А.Г., Белых Л.И. Экспериментальное определение выбросов сажи и ПАУ котельными и домовыми печами // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 3. С. 107 – 117.
9. Иваницкий М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла KE - 25 - 14C // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 1. С. 77 – 84.
10. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 1. С. 3-9.
11. Иваницкий М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. №2. С. 3 – 11.
12. Lara S., Villanueva F., Martín P., et al. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis // Chemosphere. 2022. V. 294. pp. 133745.
13. Yan D., Wu S., Zhou S., Tong G., Li F., Wang Y., et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review // Environmental Pollution. 2019. №248. pp. 804 – 814.
14. Song Y., Zhang Y., Chen W., et al. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020. V. 191. pp. 110225.
15. Lim H., Silvergren S., Spinicci S., Mashayekhy Rad F., Nilsson U., Westerholm R., Johansson Ch. Contribution of wood burning to exposures of PAHs and oxy-PAHs in Eastern Sweden // Atmospheric Chemistry and Physics. 2022. Vol. 22. № 17. pp. 11359 – 11379.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – докт. техн. наук, профессор кафедры Энергетики филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru.

References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Dmitrenko VV, et al. Osobennosti aktualizirovannogo informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2022 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Elektricheskie stantsii*. 2022;12 (1097):42-50.
2. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Guseva TV. Problemy adaptatsii deistvuyushchego oborudovaniya TES k tekhnologicheskim pokazatelyam vybrosov ITS 38-2022 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Teploenergetika*. 2023;10:115-123.
3. Vlasenko SA, Roslyakov PV, Serdyukov VA. Metodicheskie podkhody k opredeleniyu tekhnologicheskikh pokazatelei nailuchshikh dostupnykh tekhnologii pri aktualizatsii informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2017 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2022;55:31-39.
4. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Al'mgren AR, et al. Tekhnicheskie i ekonomicheskie problemy i riski vnedreniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii na rossiiskikh TES. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2021;1:15-20.
5. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovanie ob'ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnye tekhnologii i normy obshchego deistviy. *Teploenergetika*. 2021;10:1-13.
6. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Ionkin IL. Obespechenie dostovernogo nepreryvnogo instrumental'nogo kontrolya vybrosov markernykh zagryaznyayushchikh veshchestv TES v atmosferu. *Teploenergetika*. 2022;1:68-77.
7. Teplitskaya TA. Metody kolichestvennogo analiza PAU dlya fonovogo monitoringa zagryaznyayushchikh veshchestv. *Problemy fonovogo monitoringa sostoyaniya prirodnoi sredy*. 1986;4:257-262.
8. Filippov SP, Pavlov PP, Keiko AV, et al. Eksperimental'noe opredelenie vybrosov sazhi i PAU kotel'nykh i domovymi pechami. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2000;3:107-117.
9. Ivanitskii MS. Toksichnost' ukhodyashchikh gazov tverdotoplivnogo kotla KE - 25 - 14S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;1:77-84.
10. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ochistka gazovykh vybrosov kotel'nykh ustanovok ot tverdyykh chastits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;1:3-9.
11. Ivanitskii MS. Massovye vybrosy politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov pri szhigani topiva v kotlakh TES. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2023;2:3-11.
12. Lara S, Villanueva F, Martín P. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis. *Chemosphere*. 2022;294:133745.
13. Yan D, Wu S, Zhou S, et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review. *Environmental Pollution*. 2019;248:804-814.
14. Song Y, Zhang Y, Chen W. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;191:110225.
15. Lim H, Silvergren S, Spinicci S, et al. Contribution of wood burning to exposures of PAHs and oxy-PAHs in Eastern Sweden. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22:11359-11379.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Volzhskiy Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute

*Шифр научной специальности: 2.10.2. Экологическая безопасность (в энергетике)
2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки). Смежные специальности
в рамках группы научной специальности: 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки);*

Получено

07.01.2024 г.

Отредактировано

09.02.2024 г.

Принято

12.02.2024 г.



ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ЗООБЕНТОСА В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ РЫБОЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ ТИПА ВОДОВОЗДУШНАЯ ЗАВЕСА В ВОДОЕМЕ-ОХЛАДИТЕЛЕ ГРЭС

Калайда М.Л., Саетов А.Р., Хамитова М.Ф.

Казанский государственный энергетический университет, г.Казань, Россия

kalayda4@mail.ru

Резюме. ЦЕЛЬ. Исследование особенностей гидробиологических характеристик развития зообентоса в условиях работы рыбозащитного сооружения по типу водовоздушной завесы (ВВЗ) на объекте энергетики. МЕТОДЫ. Собран, обработан и проанализирован гидробиологический материал по качественному и количественному составу зообентоса в районе водозабора Заинской ГРЭС. Особое внимание уделено уровню развития биообрастателя – моллюска дрейссены и виду – акклиматизанту – ханкайской креветке. Проведен сравнительный анализ собственных исследований и литературных данных по гидробиологическим показателям качества вод по уровню развития зообентоса в районе рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы. Обработку материала проводили общепринятыми гидробиологическими методами в лаборатории кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что рыбозащитное устройство по типу водовоздушной завесы является техническим решением, которое в процессе работы изменяет физико-химические характеристики состояния экосистемы, особенно в придонном слое и грунте, тем самым формируя особенности зообентоса. Выявлено, что рыбозащитное сооружение (РЗС) по типу водовоздушной завесы (ВВЗ) не снижает видового разнообразия зообентоса. Показано, что зона ВВЗ не препятствует воспроизводству моллюсков дрейссены, но приводит к снижению их численности от 2 до 5 раз по сравнению с РЗУ с сетчатыми касетами, что увеличивает экологическую значимость ВВЗ с позиций борьбы с биообрастаниями на гидротехнических сооружениях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по показателям зообентоса выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации.

Ключевые слова: аквакультура; объекты энергетики; рыбозащитное сооружение; водовоздушная завеса; зообентос.

Для цитирования: Калайда М.Л., Саетов А.Р., Хамитова М.Ф. Исследование особенностей развития зообентоса в районе размещения рыбозащитного сооружения типа водовоздушная завеса в водоеме-охладителе ГРЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 13-37. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-13-37.

STUDY OF THE FEATURES OF ZOOBENTHOS DEVELOPMENT IN THE AREA OF WATER AIR CURTAIN TYPE FISH PROTECTION STRUCTURE IN THE COOLING RESERVOIR OF THE SDPP

Kalaida ML., Saetov AR., Khamitova MF.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

kalayda4@mail.ru

Abstract: PURPOSE. Study of the features of hydrobiological characteristics of zoobenthos development under conditions of an operating fish protection structure of a water-air curtain (WAC) type at an energy facility. METHODS. Hydrobiological material on the qualitative and quantitative composition of zoobenthos in the water intake area of the Zainskaya State District Power Plant was collected, processed and analyzed. Particular attention is paid to the level of development of the biofouling agent - Dreissena, and the acclimating species, the Khanka shrimp. A comparative analysis of our own research and literature data on hydrobiological indicators of water quality according to the level of development of zoobenthos in the area of a fish protection

structure such as a water-air curtain was carried out. The material was processed using generally accepted hydrobiological methods in the laboratory of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture of Kazan State Power Engineering University. **RESULTS.** It is shown that a fish protection device like a water-air curtain (WAC) is a technical solution that, in the process of operation, changes the physical and chemical characteristics of the state of the ecosystem, especially in the bottom layer and soil, thereby shaping the characteristics of zoobenthos. It was revealed that a fish protection structure (FPS) like a water-air curtain does not reduce the species diversity of zoobenthos. It has been shown that the WAC zone does not prevent the reproduction of *Dreissena*, but leads to a decrease in their numbers from 2 to 5 times compared to FPS with mesh cassettes, which increases the environmental significance of the WAC from the standpoint of combating biofouling on hydraulic structures. **CONCLUSION.** Observations of the state of the ecosystem in the area of operation of the water-air curtain and assessment of water quality based on zoobenthos indicators revealed high water quality in the area where the water-air curtain operates and an improvement in the ecological situation.

Keywords: aquaculture; energy facilities; fish protection structure; water-air curtain; zoobenthos.

For citation: Kalaida ML., Saetov AR., Khamitova MF. Study of the features of zoobenthos development in the area of water air curtain type fish protection structure in the cooling reservoir of the SDPP. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (1): 13-37. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-13-37.

Введение (Introduction)

В соответствии с направлениями Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» особую актуальность имеют работы по обеспечению продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках продовольствия.

Среди приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации - переход к экологически чистому аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств защиты животных, создание безопасных технологий при получении продуктов питания. Эти же задачи подчеркиваются в документах, определяющих с административных позиций управление водными биологическими ресурсами: Федеральный Закон «Об аквакультуре» №400876-4, Водный Кодекс РФ, Постановление правительства Российской Федерации № 380 от 29.04.2013 г. «Об утверждении Положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания».

В соответствии с нормативными документами каждое водозаборное сооружение должно быть оборудовано эффективным рыбозащитным устройством или сооружением (РЗС). В Федеральном законе от 20 декабря 2004 г. № 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.03.2023) в Статье 43.2. «Федеральный государственный контроль (надзор) в области рыболовства и сохранения водных биоресурсов» в Пункте 3. подчеркивается «Предметом федерального государственного контроля (надзора) в области рыболовства и сохранения водных биоресурсов является соблюдение юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и гражданами обязательных требований, включая: 1) требования в части выполнения мер по сохранению водных биоресурсов и среды их обитания при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте объектов капитального строительства, внедрении новых технологических процессов и осуществлении иной деятельности, оказывающей негативное воздействие на биоресурсы и среду их обитания, в том числе требования наличия эффективных рыбозащитных сооружений на водозаборных сооружениях.

Аналогичное требование об установке эффективных рыбозащитных сооружений – в Постановлении Правительства РФ от 29.04.2013 г. №380 "Об утверждении Положения о мерах по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания». А в Своде Правил 101.13330.2023 «СНиП 2.06.07-87 «Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения» (пункты 9.5.1 и 9.9) подчеркивается, что эффективность рыбозащитных сооружений для рыб размером от 12 мм и выше должна быть не менее 70% по всем сезонам водопользования.

Для обеспечения устойчивого функционирования естественных экологических систем и природно-антропогенных объектов конструктивные особенности отдельных решений в рыбозащитном устройстве определяются задачами обеспечения максимальной защиты от попадания рыб в водозаборное устройство. Особенно актуально это для таких природно-антропогенных водоемов как водоемы - охладители объектов энергетики. Одним из наиболее эффективных технических решений в настоящее время является РЗС по типу водовоздушной завесы (ВВЗ) [1, 2, 3]. Оно работает по принципу восходящей водовоздушной завесы, сформированной системой придонных модулей РЗУ с аэрирующими соплами (Рис.1). Эффект водовоздушной завесы, создается подачей в перфорированный трубопровод мелкодисперсной водовоздушной суспензии.



Рис 1. РЗУ типа «водовоздушная завеса» перед установкой в Заинском Водохранилище

Fig.1. FPS of "water-air curtain" type before installation in the Zainsk reservoir

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

Особую актуальность имеют исследования проблем повышения устойчивости и разработка мероприятий по предотвращению негативных изменений в водных экосистемах, особенно при изменении физико-химических характеристик при деятельности водозаборных устройств, в том числе при эксплуатации РЗС типа водовоздушная завеса (Рис.2). Актуальность усиливается и тенденциями изменений климатических характеристик: повышением температуры воды в летний период, приводящим к снижению содержания растворенного кислорода и цветению воды за счет развития цианобактерий, что в конечном итоге приводит к массовой гибели рыб [4, 5, 6, 7]. В зимний период в районе ВВЗ образуется не замерзающая полынья (Рис.2).



Рис 2. Работа РЗУ типа «водовоздушная завеса» в Заинском водохранилище

Fig.2. The work of the "water-air curtain" type FPS in Zainsk reservoir

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

Научная значимость работы заключается в том, что впервые изучены особенности состояния компоненты экосистемы водоема - зообентоса - в зоне работы РЗС по типу водовоздушной завесы в сравнении с контрольными участками водохранилища.

Исследование позволяет выявить уровень воздействия РЗС по типу водовоздушной завесы на окружающую среду.

Практическая значимость исследования экосистемы в районе функционирования рыбозащитного сооружения типа водовоздушной завесы заключается в том, что результаты получены в условиях реально функционирующего РЗС предприятия энергетики и могут быть использованы для разработки и совершенствования методов снижения негативного воздействия антропогенной хозяйственной деятельности на окружающую среду. Результаты данной работы можно использовать при разработке, модернизации и внедрении РЗС, что будет полезно как для владельцев функционирующих РЗС, так и для разработчиков РЗС.

Переосмысление освоения ресурсов внутренних водоемов включает такие задачи как направленное формирование ихтиофауны, пастбищную аквакультуру, увеличение компенсационных выпусков молоди рыб от искусственного воспроизводства [4, 5]. Не менее значимым мероприятием в этих условиях становится повышение эффективности рыбозащитных сооружений на водозаборах энергетических предприятий. Выбор методов рыбозащиты с обоснованием состояния гидробиоценоза является важной компонентой сохранения водных биоресурсов.

Постановка задачи

Цель данного исследования – изучить изменения гидробиологических характеристик в развитии зообентоса в условиях работы рыбозащитной водовоздушной завесы на объекте энергетики.

Материал и методика исследования (Materials and methods)

Материалом для работы послужили пробы зообентоса, собранные в августе 2022 года с 8 станций в районе водозабора Заинской ГРЭС (рис.3).

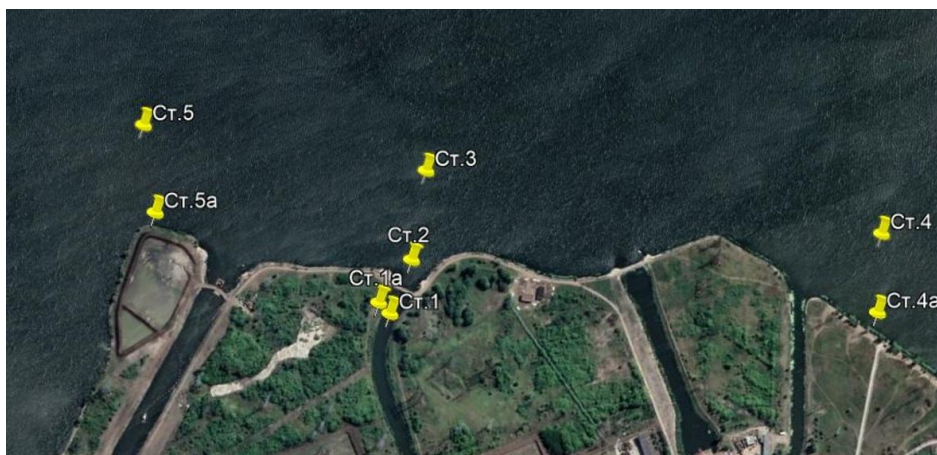


Рис.3. Станции сбора проб зообентоса в районе РЗС типа водовоздушная завеса (ВВЗ) Fig.3. Stations for sampling of zoobenthos in the area of the water-air curtain type FPS

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

Заинское водохранилище создано в результате зарегулирования стока реки Степной Зай в 1965 г. (рис.4). Створ плотины гидроузла на реке Степной Зай расположен в 71 км от устья реки Степной Зай (место впадения в реку Каму). НПУ составляет 73 м. Самый низкий уровень сработки – 70,075 м. Полный объем при НПУ равен 0,063 км³, полезный объем 0,035 км³. Площадь водосбора составляет – 2,91 тыс. км², площадь водного зеркала – 20,45 км² [8, 9]. Средняя глубина составляет 3,8 м, наибольшая – 9 м. Средняя ширина – 1 км, максимальная – 2,5 км. Длина в период половодья достигает 15 км. В 1972 году Заинская ГРЭС выведена на проектную мощность – 2 400 Мвт.

Площадь водохранилища, участвующая в охлаждении, составляет около 15 км². По степени подогрева водоем можно разделить на четыре участка: верхний площадью около 6 км² – зона максимального прогрева, средний – зона слабого подогрева, в которой расположена зона водозабора, ниже зона эпизодического подогрева, после которой расположена зона с естественным температурным режимом. Объем водной массы составляет примерно 9 млн. м³.

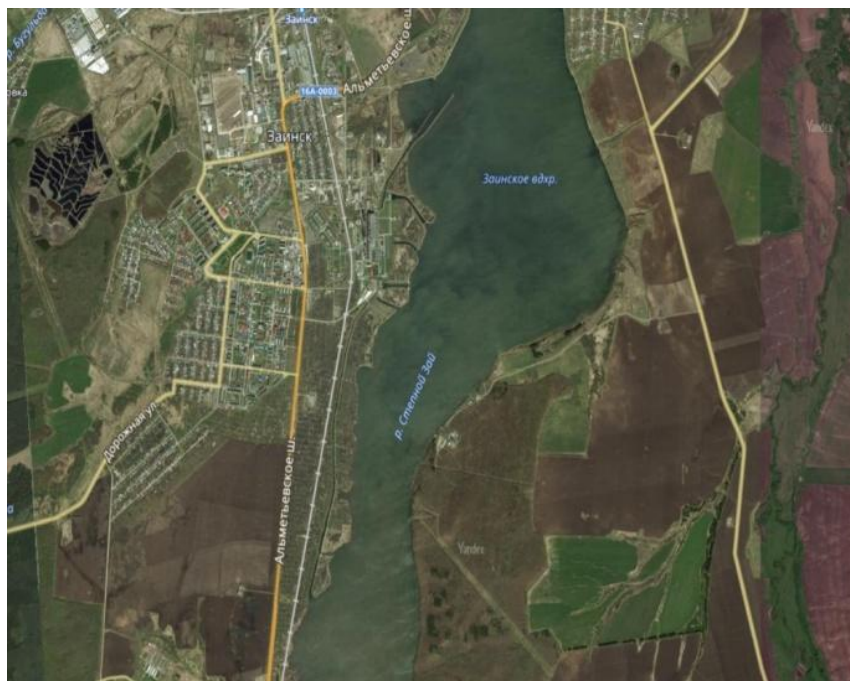


Рис.4. Карта–схема расположения Заинского водохранилища

Fig.4. Schematic map of the location of the Zainsk Reservoir

*Источник: (<https://www.google.com/maps>). Source: (<https://www.google.com/maps>).

Сбросные теплые воды в водоемах-охладителях являются определяющим антропогенным экологическим фактором, влияющим на естественную среду. В условиях работы ВВЗ на экологическое состояние водохранилища влияет не только сброс теплых вод, но и функционирование ВВЗ. Воздействие на компоненты гидробиоценоза проявляется в исчезновении ледового покрова, увеличении проточности вод, изменения содержания кислорода в придонном слое (рис.5).



Рис 5. Зона воздействия РЗУ типа «водовоздушная завеса» в Заинском водохранилище

Fig.5. Impact zone of the “water-air curtain” type FPS in the Zainsk reservoir

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

Гидробиологические пробы зообентоса были отобраны с 8 станций, из которых 3 были прибрежными (рис.6):



Рис. 6. Станции сбора проб зообентоса в районе РЗС типа водовоздушная завеса (ВВЗ)

Fig.6. Zoobenthos sampling stations in the area of the water-air curtain type FPS (WAC)

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

ст.1 – в центральной части водозаборного канала (прозрачность 2,0м, глубина 4,5 м, температура 26,07 °C);

ст.1а – у берега внутри водозаборного канала (прозрачность до дна, глубина 0,5м, температура 26,2 °C, плавающие погруженные водные растения);

ст.2 – над водовоздушной завесой (прозрачность 1,2м, глубина 3,7 м, температура 26,69°C);

ст.3 – в 50 м перед водовоздушной завесой (прозрачность 2,0 м, глубина 2,5 м, температура 27,71°C);

ст.4 – выше водозабора по течению (прозрачность 2,0 м глубина 4,0 м; температура 27,42°C);

ст. 4а – у берега выше по течению водозабора (прозрачность до дна, глубина 0,4 м, температура 27,42°C, плавающие погруженные водные растения);

ст.5 – ниже водозабора по течению (прозрачность 2,2 м, глубина 4,2 м, температура 27,40°C);

ст.5а – у берега ниже по течению водозабора (прозрачность до дна, глубина 0,5 м, температура 27,5°C, плавающие погруженные водные растения).

Отбор проб зообентоса проводился с помощью дночерпателя Петерсена (площадь захвата 1/40 м²) с двухкратной повторностью. Полученный материал процеживался через сито газа №25, организмы зообентоса с помощью пинцетов выбирались под лупой. Пробы фиксировались формалином (4%). Обработку материала проводили общепринятыми гидробиологическими методами в лаборатории кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» Казанского государственного энергетического университета. Для обработки проб использовались оптический микроскоп плоского поля МИКМЕД-5 и стереоскопический микроскоп МСП-2. Организмы зообентоса определяли, по возможности до вида или более крупных таксономических групп. При обработке проб проводилась фотосъемка объектов с помощью цифрового микроскопического комплекса. Определение видов велось по определителям и руководствам в зависимости от групп организмов.

Результаты исследования и их обсуждение (Results and Discussions)

Сохранение водных экосистем водоемов на урбанизированных территориях как сообществ, не только обеспечивающих биоразнообразие, но и важных элементов окружающей среды – одна из важнейших задач современности. Исследование макрозообентоса в Заинском водохранилище в зоне функционирования ВВЗ выявило в составе зообентоса 34 вида и формы, из которых 9 относились к олигохетам, 8 – к моллюскам, 6 – к личинкам хирономид. Кроме того, в составе зообентоса Заинского

водохранилища встречались 3 вида ручейников, по 2 вида пиявок и мшанок, а также по одному виду бокоплавов, креветок, стрекоз и подёнок (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Встречаемость видов и форм зообентоса в Заинском водохранилище в районе водозабора Зай ГРЭС,
по материалам августа 2022 г

*Occurrence of zoobenthos species and forms in the Zainskoye reservoir in the area of Zai GRES intake, based
on August 2022*

№	Вид и форма	Станции							
		1	1a	2	3	4	4a	5	5a
	Тип Mollusca (Моллюски)								
1	Mollusca кладка		+						+
	Класс Bivalvia								
	Отряд Veneroida								
	Сем. Dreissenidae								
2	Dreissena bugensis (Andrusov, 1897)			+	+	+		+	
3	D. polymorpha (Pallas, 1771)	+		+	+	+		+	+
	Класс Gastropoda								
	Отряд Caenogastropoda								
	Сем. Bithyniidae								
4	Bithyniidae tentaculata (Linne, 1758)		+				+		
	Отряд Basommatophora								
	Сем. Lymnaeidae								
5	Lymnaea ovata (Draparnaud, 1805)								+
	Сем. Planorbidae								
6	Planorbarius corneus (Linnaeus, 1758)								+
	Подкласс Heterobranchia								
	Отряд Estobbranchia								
	Сем. Valvatidae								
7	Valvata depressa (C. Pfeiffer, 1828)					+			
	Отряд Pulmonata								
	Сем. Physidae								
8	Physa fontinalis (Linnaeus, 1758)		+						
	Тип Bryozoa (Мшанки)								
	Класс Phylactolaemata								
	Отряд Plumatellida								
	Сем. Plumatellidae								
9	Plumatella fungosa (Pallas, 1768)			+	+		+		
10	P. repens (De Blainville, 1834)		+	+					
	Тип Annelida (Черви)								
	Класс Clitellata								
	Подкласс Hirudinea								
	Отряд Rhynchobdellida								
	Семейство Glossiphoniidae								
11	Glossiphonia complanata (Linnaeus, 1758)			+					
12	Helobdella stagnalis (Linne 1758)			+	+				
	Подкласс Oligochaeta								
	Отряд Naidotaxida								
	Сем. Naididae								
13	Stylaria lacustris (Linné, 1767)			+	+			+	

Продолжение таблицы 1. *Continuation of Table 1*

14	<i>Nais variabilis</i> (Piguet, 1906)				+				
15	<i>N. communis</i> (Piguet, 1906)			+		+		+	
16	<i>Slavina appendiculata</i> (d'Udecem, 1885)							+	
17	<i>Derodigitata</i> (Muller, 1773)				+			+	
18	<i>Pristinella rosea</i> (Piquet, 1906)			+					
19	<i>P. aequisetata</i> (Bourne, 1891)						+	+	
20	<i>P. sp.</i>								+
21	<i>Amphichaeta leydigi</i> (Tauber, 1879)	+			+	+			
Тип Arthropoda									
Надкласс Crustacea (Ракообразные)									
Класс Malacostraca									
Отряд Decapoda									
Подотряд Pleocyemata									
Сем. Palaemonidae									
22	<i>Exopalaemon modestus</i> (C. Heller, 1862) (<i>Leander modestus</i>)		+						+
Отряд Amphipoda									
Сем. Gammaridae									
23	<i>Gammarus pulex</i> (Linnaeus, 1758)		+				+		+
Класс Insecta (Насекомые)									
Надотряд Palaeoptera									
Отряд Odonata									
Подотряд Zygoptera									
Сем. Coenagrionidae									
24	<i>Erythromma najas</i> (Hansemann, 1823)								+
Отряд Ephemeroptera									
Сем. Baetidae									
25	<i>Cloen dipterum</i> (Linne, 1758)		+						
Надотряд Neoptera									
Отряд Diptera									
Сем. Chironomidae									
26	Chironomidae куколка			+			+		
Подсем. Orthoclaadiinae									
27	<i>Cricotopus</i> sp. <i>silvestris</i> (Fabricius, 1794)						+		+
28	<i>Cr. sp. algarum</i> (Kieffer, 1911)								+
Подсем. Chironominae									
Триба Chironomini									
29	<i>Parachironomus</i> sp. <i>parastratus</i> (Lenz, 1938)						+		
30	<i>Limnochironomus</i> sp. <i>nervosus</i> (Staeger, 1839)	+			+		+	+	+
Триба Tanytarsini									
31	<i>Cladotanytarsus</i> sp. <i>mancus</i> (Walker, 1856)	+							
Отряд Trichoptera									
Сем. Polycentropodidae									
32	<i>Polycentropus</i> l.	+							+
33	<i>P. flavomaculatus</i> (Pictet, 1834)						+		
Сем. Ecnomidae									
34	<i>Ecnomus tenellus</i> (Rambur, 1842)								+
	Всего видов и форм	5	7	10	9	5	9	8	13

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

Как видно из данных таблицы 1 и рисунка 7 наибольшее видовое разнообразие и разнообразие групп зообентоса отмечалось на прибрежной станции (ст.5а) ниже по течению от ВВЗ, наименьшее в центральной части водозаборного канала (ст.1) и на глубоководной станции выше по течению (ст.4) (рис.3, 6, 7).

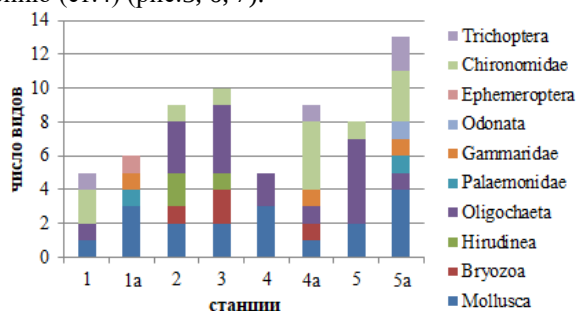


Рис.7. Количество видов макрозообентоса в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.7. Number of macrozoobenthos species in the water intake area of Zainsk SDPP

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

По числу видов в водоеме доминировали олигохеты, на них приходилось 26,5% всех встречаемых видов и форм. Наибольшее их разнообразие отмечалось на глубоководной станции выше по течению водозабора ГРЭС. Необходимо отметить достаточно высокое разнообразие форм зообентоса в зоне функционирования ВВЗ – встречались моллюски дрейссена, мшанки, пиявки и олигохеты, характерные для перифитона.

К наиболее часто встречающимся видам и формам в районе исследований относились моллюски *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), которые встречались на 6 из 8 станциях и личинки хирономид *Limnochironomus* гр. *nervosus* (Staeger, 1839), встречавшиеся на 5 станциях.

Численность зообентоса варьировала от 520 экз./м² на ст.1а до 3790 экз./м² на ст.2 (рис. 8).

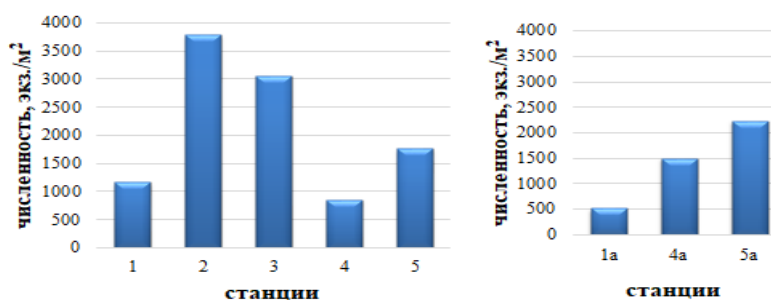


Рис. 8. Численность (экз./м²) зообентоса в Заинском водохранилище в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.8. Number (individuals/m²) of zoobenthos in the Zainsk reservoir in the water intake area of the Zai State District Power Plant

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

Численность мягкого зообентоса варьировала от 200 экз./м² на ст.1 до 1480 экз./м² на ст.4а (рис. 9).

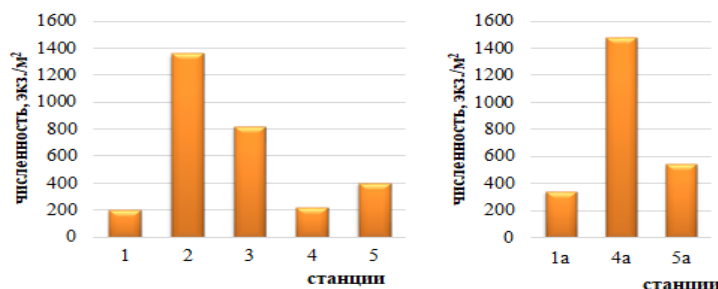


Рис. 9. Численность (экз./м²) мягкого зообентоса в Заинском водохранилище в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.9. Number (individuals/m²) of soft zoobenthos in the Zainsk reservoir in the water intake area of Zai SDPP

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

Биомасса зообентоса варьировала от 12,2 г/м² на ст.1 до 1040,5 г/м² на ст.3 (рис. 10). Можно отметить, что наибольшая численность и биомасса зообентоса на глубоководных станциях отмечалась в районе водовоздушной завесы за счет присутствия дрейссены.

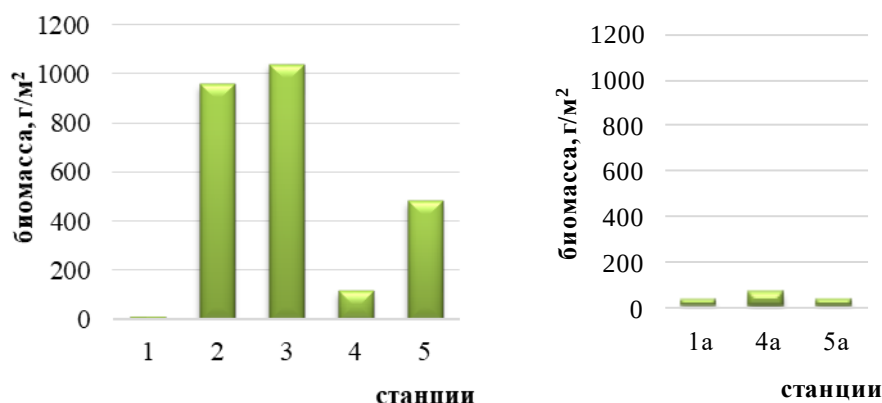


Рис. 10. Биомасса (г/м²) зообентоса в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig. 10. Biomass (g/m²) of zoobenthos in the water intake area of Zai GRES

Биомасса мягкого зообентоса варьировала от 0,08 г/м³ на станции 4 до 57,24 г/м³ на станции 4a (рис. 11).

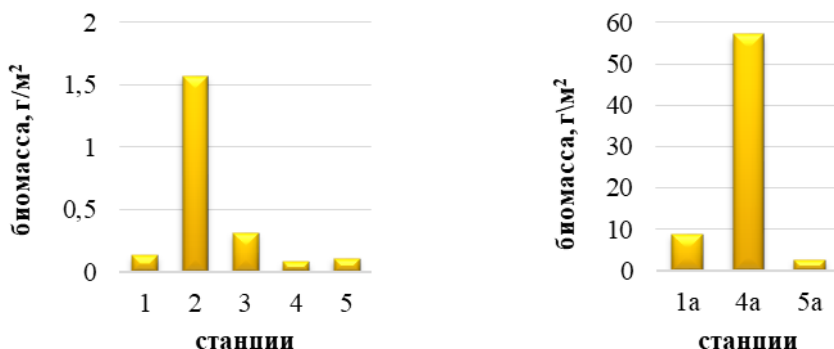


Рис.11. Биомасса (г/м³) мягкого зообентоса в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig. 11. Biomass (g/m³) of soft zoobenthos in the water intake area of Zai SDPP

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

Личинки ручейников, которые свидетельствуют о высоком качестве вод, отмечались в канале и на прибрежных станциях с численностью от 20 до 60 экз/м² и биомассой от 0,01 до 0,12 г/м².

При анализе уровня развития зообентоса необходимо учитывать состояние донных отложений. Показано [10], что участки акватории в районе береговых насосных станций не подвержены заилению. Циркуляционные потоки воды и до устройства ВВЗ препятствовали образованию илистых отложений. Проведенные исследования выявили, что донные отложения обильно насыщены отмершей дрейссеной, которая на отдельных станциях формировала до 70-80% объема донных отложений [10]. Наличием раковин дрейссен объясняется и некоторое повышение pH в зоне донных отложений в средней части водохранилища.

D.polymorpha была характерна для литореофильных биоценозов Волги до образования Куйбышевского водохранилища. Ее максимальная численность в тот период достигала 1825 экз/м². После образования водохранилища *D. polymorpha* стала массовой формой в составе литореофильных биоценозов правого берега Волжского плеса. С 1998 года в Волжском и Камском отрогах Куйбышевского водохранилища в бентосных сборах встречается *Dreissena bugensis* [11, 12]. В среднем она составляла 5-15% от численности *D. polymorpha* на русловых и пойменных участках. В 2001 г. *D. bugensis* была обнаружена в Нижнекамском водохранилище. *D.bugensis* в основном встречается в литофильных биоценозах правого берега Волги. Для поселения она использует различные типы субстратов: камни, древесину, крупных двусторчатых моллюсков. Максимальная численность и биомасса *D. polymorpha* в верхних участках Куйбышевского водохранилища

в разные годы достигала соответственно 2120 – 8560 экз/м² и 5,3 - 1348 г/м² при средней биомассе 6-10 г/м² (до 95% от общей биомассы зообентоса) [11, 12].

Численность и биомассы *Dreissena bugensis* и *D. polymorpha* в районе функционирования ВВЗ в Заинском водохранилище представлена на рисунках 12 и 13.

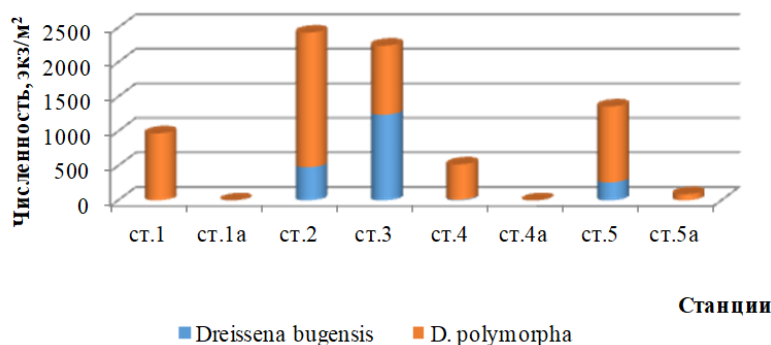


Рис.12. Численность моллюсков дрейссены в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.12. The number of *Dreissena* in the water intake area of Zai SDPP

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

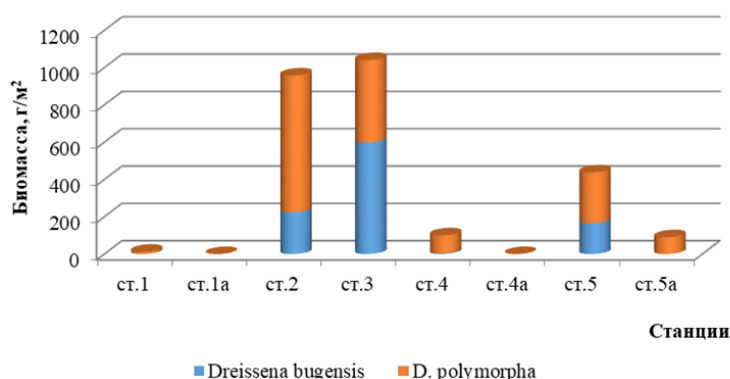


Рис.13. Биомасса моллюсков дрейссены в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.13. Biomass of *Dreissena* in the water intake area of Zai State District Power Plant

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

Как видно из приведенных на рис. 12 и 13 данных максимальные численность (1950 экз/м²) и биомасса дрейссены отмечены в районе функционирования ВВЗ и перед ней – на участках максимальной проточности с наименьшей заиленностью грунтов. Развитие дрейссены в зоне гидротехнических сооружений, которые являются хорошим субстратом для формирования ее друз, увеличивает экологическое значение ВВЗ по сравнению со стандартным РЗУ, включающем рыбозаградительные решетки (Рис.14). Это связано с высокой обрастаемостью гидротехнических сооружений и необходимостью их частой чистки. В условиях теплых вод эта проблема становится еще актуальнее.



Рис.14. Моллюски дрейссены в районе водозабора Зай ГРЭС Fig.14. *Dreissena* mollusks in the water intake area of Zai State District Power Plant

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

Проблема биологических обрастаний на решетках рыбозащитных устройств ТЭЦ стоит достаточно остро (рис. 15). Биообрастания резко снижают эффективность работы рыбозащитных устройств.



Рис.15. Биологические обрастания на решетке рыбозащитного устройства ТЭЦ

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

Численность моллюсков дрейссены разных размерных групп в районе исследования представлена на рисунках 16 и 17.

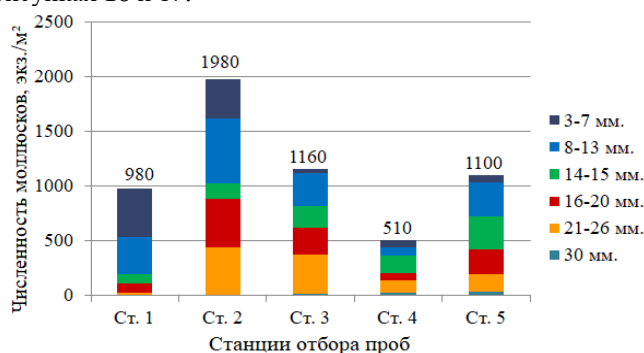


Рис.16. Численность *D. polymorpha* в районе водозабора Зай ГРЭС

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

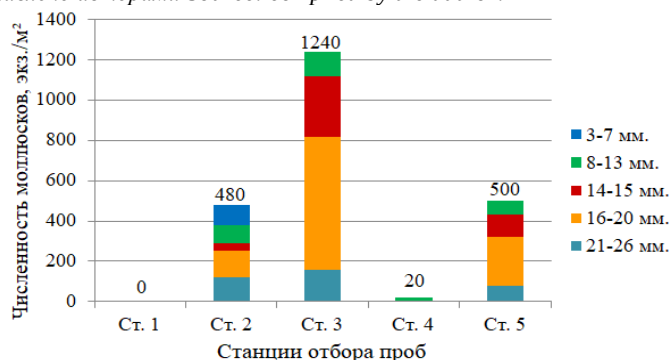


Рис.17. Численность *D. bugensis* в районе водозабора Зай ГРЭС

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

Важно отметить, что *D. polymorpha* (до 30 мм) имела большие максимальные размеры по сравнению с *D. bugensis* (до 26 мм). Если *D. polymorpha* имела максимальную численность на станции у ВВЗ и встречалась в значительных количествах в бентосе внутри водозаборного канала, то *D. bugensis* имела максимальную численность на участке перед ВВЗ и не была отмечена в пробах бентоса внутри канала. Значимым фактом является и наличие мелких особей дрейссены – до 10 мм – в зоне ВВЗ и канале. Эти особи свидетельствуют об успешном воспроизводстве дрейссены весной 2022 года именно в районе водозаборного сооружения, включая ВВЗ. Моллюски от 8 до 13 мм, вероятно, от осеннего воспроизводства предыдущего года.

Сравним плотность дрейссены в районе водозабора ЗайГРЭС с плотностью моллюсков в оз. С. Кабан в районе водозабора Казанской ТЭЦ-1. Там численность дрейссены варьировала от 80 до 8920 экз/м², в среднем за период наблюдений составив 4153 экз/м² (рис.18). Максимальная численность (8920 экз/м²) отмечалась в районе забора воды

Казанской ТЭЦ-1 в июне 2009 г., при этом проведенное обследование оз. С. Кабан на русловых и прибрежных станциях выявило низкую численность дрейссены из-за значительных иловых отложений на дне (до 20 экз/м²) [13-17]. Исследование показало, что в районе ВВЗ по сравнению с водозабором, оборудованным РЗУ с кассетой решеток, численность дрейссены в районе водозабора от 2,1 до 4,6 раз ниже при использовании рыбозащиты по типу ВВЗ.

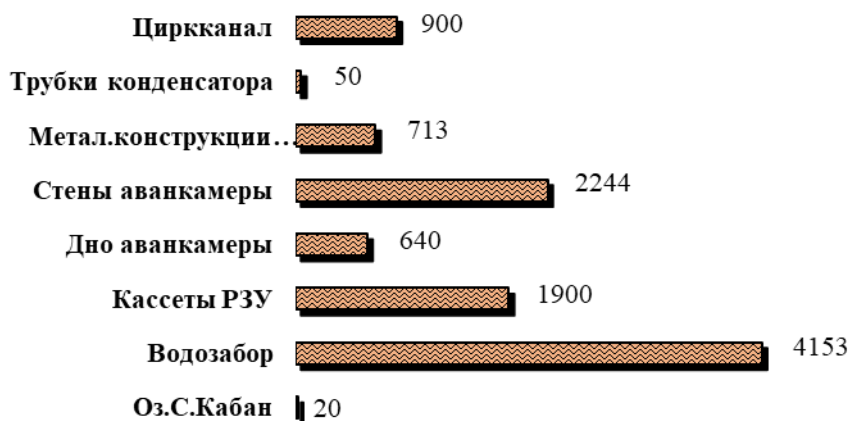


Рис.18. Распределение дрейссены (экз/м²) в оз. С. Кабан и системе технического водоснабжения Казанской ТЭЦ-1 по [17].

Fig.18. Distribution of *Dreissena* (ind./m²) in the lake M. Kaban and the technical water supply system of the Kazan CHPP-1 according to [17]

*Источник: [17]. Source: [17].

Таким образом, зона ВВЗ не препятствует воспроизводству моллюсков дрейссены, но приводит к снижению их численности от 2 до 5 раз.

Поскольку исследование гидрохимических характеристик качества вод выявило снижение загрязнения органическими веществами интересно посмотреть качество вод по гидробиологическим характеристикам – по показателям макрозообентоса, поскольку именно у дна отмечаются наибольшие изменения.

При оценках влияния антропогенного воздействия на водные экосистемы разные авторы [18-21, 28] используют различные индикаторные виды и группы, которые, по их мнению, хорошо отражают тот или иной тип загрязнения. В начале XX в. для оценки качества вод была предложена система Р. Кольквитца и М. Марссона [22, 23], которая нашла широкое применение и считается сегодня классической. Авторы предложили водоемы и водотоки или их отдельные зоны в зависимости от степени загрязнения органическими веществами разделить на поли-, мезо (альфа и бета)- и олигосапробные по присутствию индикаторных видов.

Количественную оценку качества вод с применением математических расчетов предложили Пантле и Букк, предложившие индекс сапробности (S) [24] : $S = \sum s \cdot h / \sum h$, где s – индикаторная значимость вида, h – относительная численность вида. Из всех модификаций метода измерения сапробности Пантле-Букка наиболее разработанной системой является модификация В. Сладечека [25, 26] и в настоящее время часто используется в биоиндикационных исследованиях.

В более поздний период в оценках качества вод стали использовать трофические связи гидробионтов, как показатели нарушенности или ненарушенности сложившихся структурных связей. Видовая плотность (число видов в пробе) широко используется в качестве индикаторного показателя [27]. Это базируется на принятом Конвенцией о биологическом разнообразии [29] определении: биологическое разнообразие означает вариабельность живых организмов из всех источников, включая наземные, морские и иные водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются. Это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, между видами и разнообразие экосистем. Соответственно выделяют три основных уровня биологического разнообразия: генетическое, видовое и экосистемное разнообразие. Такое деление соответствует Конвенции о биоразнообразии.

Видовое разнообразие подразделяют на альфа-разнообразие – число видов в пределах (внутри) однородного биотопа (экотопа); бета-разнообразие – число видов во всех биотопах (экотопах) данной области (территории); гамма-разнообразие – видовое разнообразие в пределах ландшафта. Основная роль в изучении биологического разнообразия отводится тем формам, которые обладают способностью к неограниченно

долгому самоподдержанию в постоянной или умеренно изменяющейся среде, восстановлению после нарушений, к эволюции и адаптации к новым условиям [30].

Состав гидробиологического сообщества свидетельствует о среднем за длительное время качестве воды и грунта. Разные организмы характеризуют отрезки времени разные по продолжительности и представляют собой регистрирующие структуры изменений среды неодинаковой степени чувствительности. Поэтому в зависимости от задач используются различные гидробионты, к тому же их видовой набор регионально специфичен. В связи с этим разрабатываются и комплексные системы оценок.

С 80-х лет XX столетия для оценки состояния водных экосистем широко использовался информационный индекс видового разнообразия Шеннона в модификации Вильма и Дорриса [27, 31]. Достоинством индекса является его комплексность, он учитывает количество видов (видовую плотность) и их выравненность. Считается, что при величине индекса более 3 – воды «чистые», при индексе менее 3, но более 1 – «загрязненные», а при индексе менее 1 – «грязные».

Индексы видового разнообразия Шеннона, рассчитанные по численности зообентоса, варьировали в районе исследования на глубоководных станциях от 0,93 на ст. 1 до 1,93 на ст. 3, на прибрежных станциях от 1,73 на станции 5а до 2,1 на станции 4а (рис. 19). Таким образом, по структуре макрозообентоса в районе водозабора ЗайГРЭС воды оцениваются как загрязненные.

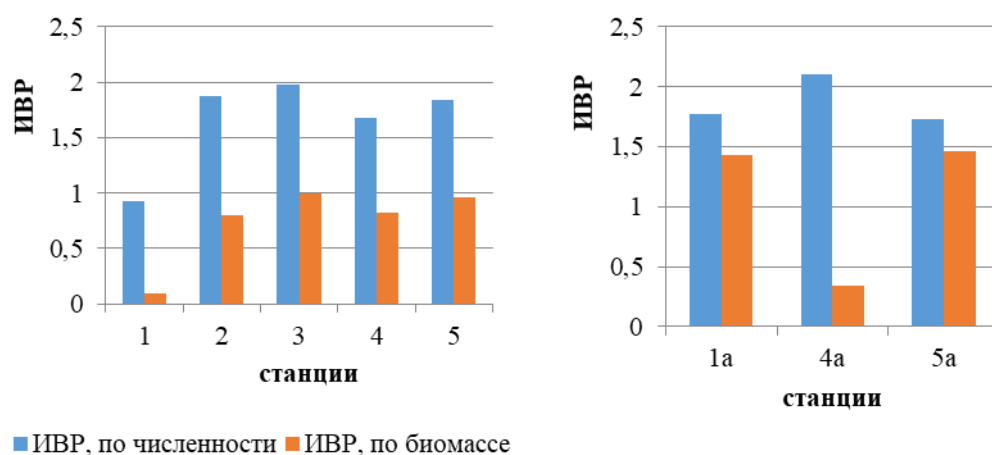


Рис.19 Индекс видового разнообразия Шеннона макрозообентоса в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig. 19. Shannon species diversity index of macrozoobenthos in the water intake area of Zai SDPP

На участках со сложившимся псаммофильным биоценозом оценка качества вод может проводиться по Индексу (К) Е.В. Балускиной [18], который рассчитывается по формуле [1].

$$K = (\alpha_t + 0.5 \alpha_{ch}) / \alpha_o, \quad [1],$$

где α_t , α_{ch} и α_o – относительные численности отдельных групп личинок хирономид: соответственно, *Tanytrodinae* (α_t), *Chironominae* (α_{ch}), *Orthocladiinae* (α_o); $\alpha = N + 10$, где N – относительная численность особей всех видов данного подсемейства в процентах от общей численности особей всех личинок хирономид.

Критерии оценки качества вод по величине Индекса Балускиной приведены в таблице 2. Результаты расчета индекса Балускиной на станциях Заинского водохранилища в районе водозабора ЗайГРЭС приведены на рисунке 20.

Таблица 2

Table 2

Критерии качества вод по величине Индекса Балускиной
Water quality criteria according to the value of Balushkina Index

Индекс Балускиной - К	Характеристика вод
0,136 – 1,08	Чистая
1,08 – 6,50	Умеренно загрязненная
6,50 – 9,0	Загрязненная
9,00 – 11,5	Грязная

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

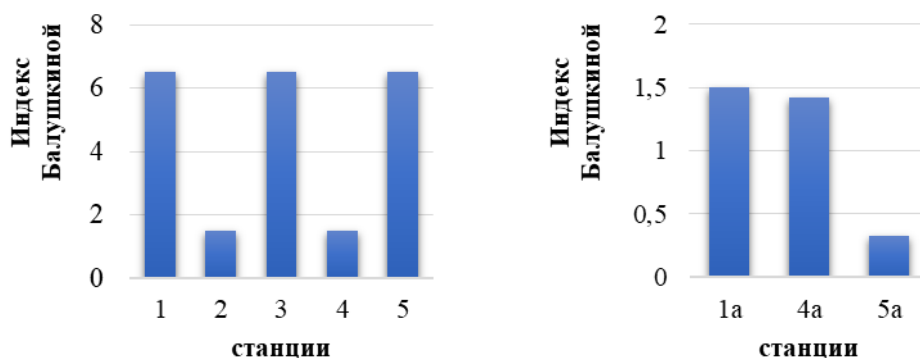


Рис. 20. Индексы качества вод по Е.В. Балушкиной, рассчитанные по численности личинок хирономид в районе водозабора Зай ГРЭС *Fig.20. Water quality indices according to E.V. Balushkina, calculated from the number of chironomid larvae in the water intake area of Zai State District Power Plant*

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

На всех станциях, кроме ст.5а (прибрежье ниже по течению), индекс Балушкиной варьировал от 1,42 до 6,5, что соответствует умеренно загрязненным водам. На ст.5а индекс Балушкиной составил 0,32 и характеризовал зону как чистую.

По индексам сапробности (S), рассчитанным по индикаторным видам зообентоса, участок относился к β -мезосапробной зоне и на ст.1 и ст.4 к олигосапробной зоне (рис.21).

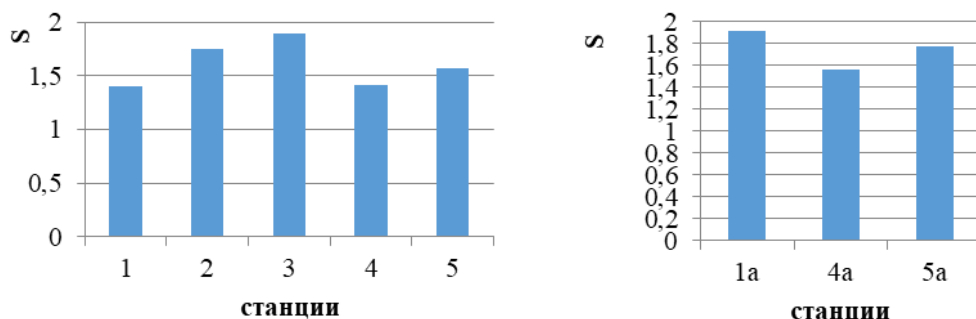


Рис. 21. Индексы сапробности по индикаторным видам зообентоса в районе водозабора Зай ГРЭС *Fig. 21. Saprobity indices for indicator species of zoobenthos in the water intake area of Zai SDPP*

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

Для оценки качества вод рек используется индекс Гуднайта-Уитля [28], который отражает загрязнение водоёма органическими веществами, индикаторной группой в составе зообентоса является группа олигохет. Значение индекса Гуднайта-Уитля равно отношению количества обнаруженных в пробе олигохет к общему количеству организмов (включая и самих червей) в процентах. Состояние реки считается хорошим, если олигохетный индекс меньше 60%, сомнительным – в пределах 60-80%, река тяжело загрязнена, если олигохетный индекс превышает 80%. По показателю обобщенного индекса судят о степени эвтрофикации водоема. Оценочная шкала качества вод по индексу Гуднайта-Уитля представлена в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Олигохетный индекс Гуднайта-Уитля <i>Oligochaete Goodnight-Whitl index</i>		
Значение индекса, %	Степень загрязнения воды	Класс качества
Менее 30	Отсутствие загрязнения	1–2
30–60	Незначительное	2–3
60–70	Умеренное	3–4
70–80	Значительно	4–5
Более 80	Сильное	5–6

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

В Заинском водохранилище в районе водозабора Зай ГРЭС индексы Гуднайт-Уитля (рис.22) свидетельствуют об отсутствии органического загрязнения вод, воды относятся к 1-2 классу качества.

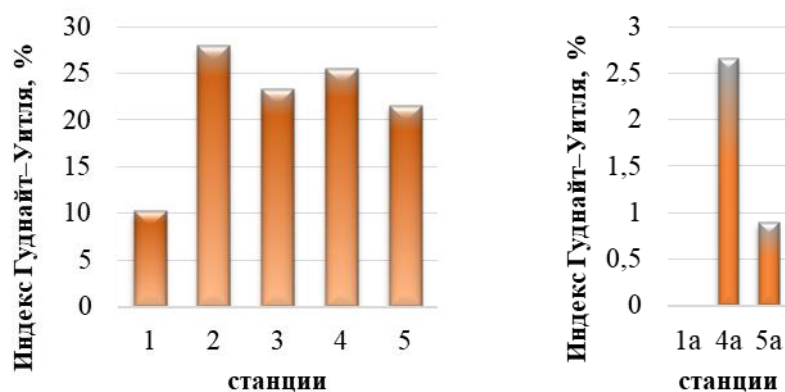


Рис. 22. Индексы Гуднайт-Уитля в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig. 22. Goodnight-Whitley indices in the water intake area of Zai SDPP

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

Структура основного комплекса видов зообентоса на участках наибольшего органического загрязнения представлена преимущественно видами и формами насекомых, способных к атмосферному дыханию [11, 6]. При улучшении состояния в экотопе увеличивается разнообразие и представленность вторичноводных насекомых, причем группы, с дыханием растворенным кислородом заменяют формы, потребляющие атмосферный воздух [6]. На чистых участках и в зонах восстановления преобладают первичноводные животные. В качестве показателя антропогенного загрязнения водоема органическими веществами может быть использован индекса Y по [6], оценочная шкала состояния гидробиоценоза по индексу Y представлена в табл.4. Индекс Y позволяет отразить процесс участия бентосных форм в восстановлении качества вод.

$$Y = \frac{P_{пв} + 0,5P_{дрк}}{P_{дав} + 1}$$

где, $P_{пв}$ – доля (%) от общей численности зообентоса первичноводных организмов не относящихся к насекомым; $P_{дрк}$ – доля (%) дышащих растворенным кислородом в воде от общей численности вторичноводных насекомых; $P_{дав}$ – доля (%) дышащих атмосферным воздухом насекомых (личинки насекомых) от общей численности зообентоса.

Таблица 4

Table 4

Зависимость значений индекса Y от состояния донного гидробиоценоза

Dependence of index values on the state of bottom hydrobiocoenosis

Донный гидробиоценоз	Уровень воздействия	Значение Y
Нестабильный	Очень сильное	0-1
На ранней стадии адаптации	Сильное	1-3
Подверженный воздействию	Умеренное	3-12
Приспособившийся	Слабое	12-48
Стабильный неоднородный	Незначительное	48 - 100
Нестабильный однородный (олигохетный, гаммаридный, корофиумный и т.п.)	Сильное однонаправленное	100

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

Индекс Y, рассчитанный для участка Заинского водохранилища в районе водозабора Зай ГРЭС, отразил незначительное антропогенное воздействие с позиций загрязнения; биоценоз характеризуется как стабильный неоднородный. Значения индекса варьировали от 53,3 до 100 (рис.23).

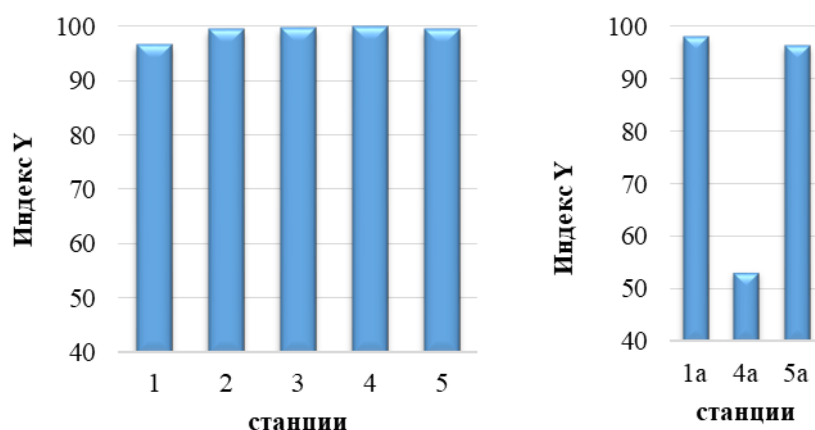


Рис. 23. Индексы состояния донного гидробиоценоза Y в районе водозабора ЗайГРЭС

Fig. 23. Indices of the state of benthic hydrobiocenosis Y in the water intake area of Zai SDPP

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

Таким образом, анализ качественного и количественного состава макрозообентоса позволяют сделать выводы по качеству вод в районе ВВЗ:

По индексу видового разнообразия Шеннона воды оцениваются как загрязненные;

По индексу Балушкиной воды оцениваются как умеренно загрязненные, а в прибрежной зоне – чистые;

По индексам сапробности участок относится к β -мезосапробной зоне и в канале после ВВЗ - к олигосапробной зоне;

Олигохетный индекс свидетельствует об отсутствии органического загрязнения вод в зоне ВВЗ, воды относятся к 1-2 классу качества;

Донный гидробиоценоз оценивается как стабильный неоднородный с незначительным антропогенным воздействием;

Необходимо отметить, что при отборе проб зообентоса было выявлено наличие в водоеме ханкайских креветок (табл.1, рис.24).



Рис. 24. Ханкайские креветки в составе донного гидробиоценоза в районе водозабора ЗайГРЭС

Fig.24. *Exopalaemon modestus* as part of the benthic hydrobiocenosis in the water intake area of Zai SDPP

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

По [32] сообщению ИА Регнум Заинская ГРЭС при работах по компенсационным выпускам рыбы занималась и улучшением кормовой базы рыб: в 1996 году в Заинское водохранилище была завезена из Рязани ханкайская пресноводная креветка, которая прекрасно прижилась и вполне справилась со своей миссией. Эти креветки являются не только высокобелковым кормом практически для всех видов рыб, но и, поедая высшую водную растительность, производят естественное очищение водоемов. Пресноводная ханкайская креветка - *Ehopalaemon modestus* – обитает на Дальнем Востоке и занимает ареал от дельты реки Биджан и озера Ханки до Амурского лимана. Эта пресноводная креветка имеет много близких черт с речными раками, но размерами значительно уступает – самки 3-4 см массой 0,2 г, самцы чуть крупнее. Клешни слабые, небольшого размера, а усы вдвое превышают длину тела (рис.25). Глаза на стебельчатых выростах поворачиваются в стороны и обеспечивают широкий обзор. Оболочка тела почти прозрачная, поэтому окраска может варьировать в зависимости от цвета грунта и питания. В природе расцветка серовато-коричневая, максимально напоминающая цвет дна. Необходимо подчеркнуть, что для ханкайских креветок характерными биотопами обитания являются дно водоема и растительность, поэтому они встречались в бентосных пробах. Эти креветки всеядны: потребляют органические остатки со дна, отмершие части водорослей. Для них важны и камни на дне, которые постепенно растворяясь, насыщают воду минеральными элементами, необходимыми для укрепления панциря. Температурный режим для ханкайской креветки достаточно широкий - от +15°C до +30°C, причём зимой температура может быть ниже +20°C, а летом они способны переносить максимальное прогревание воды. Кроме того, они требовательны к наличию кислорода в воде. [33, 34].

Благодаря работе ЗайГРЭС в Заинском водохранилище складываются условия для жизни креветок. По данным лаборатории ЗайГРЭС в Заинском водохранилище средняя концентрация растворенного кислорода достаточно высока и варьирует от 5,8 до 8,7 мгО₂/дм³. Фактические концентрации кислорода в зоне функционирования ВВЗ приведены на рисунке 19.

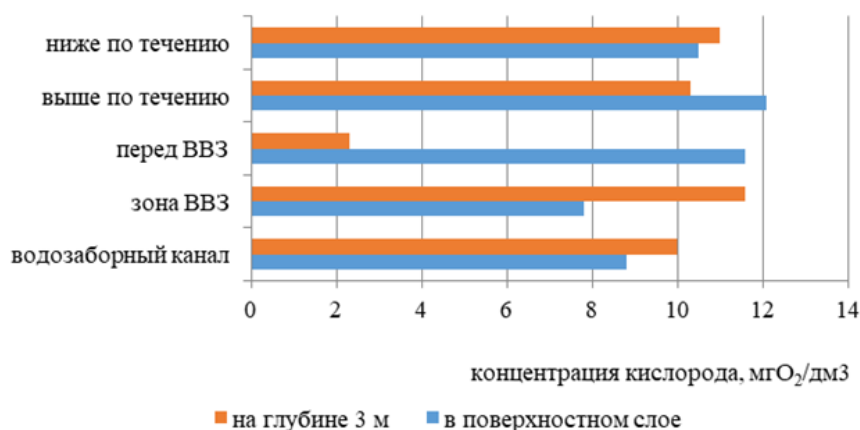


Рис.25. Концентрация кислорода в воде в августе в районе РЭС типа водо-воздушная завеса

Fig.25. Oxygen concentration in water in August in the area of the water-air curtain type FPS

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

Количество дополнительного тепла, поступающего в водохранилище в результате сброса подогретых вод, распределяется по акватории водохранилища, в том числе, в зависимости от метеорологических условий. Температура воды в Заинском водохранилище в зимний период бывает не выше 10-15° С и превышает естественную на 10-11° С. Зимой в подогреваемой зоне имеется постоянная полынья, охватывающая большую площадь, подогрев распространяется на нижние слои воды. В подогреваемой зоне в это время наблюдается обратная термическая стратификация. Летом подогреваются верхние слои воды. Температура воды в водохранилище может превышать 30° С, а в отдельные периоды - 35-40° С. По сравнению с летним периодом весной и осенью прогреваются более глубокие слои воды.

По данным [35] в центральную часть России креветки много раз завозились из природных водоемов Дальнего Востока, Китая, Индии, и часто их было сложно идентифицировать. В результате перевозок амурских рыб в новые районы пресноводные креветки были случайно или намеренно завезены в центральные регионы России. В 60-80-е годы прошлого века креветки были обнаружены в водоемах-охладителях ГРЭС им. Классона г. Электрогорска и г. Шатура, куда были завезены на стадии личинки из р. Янцзы

вместе с молодью растительноядных рыб. Также они были интродуцированы в Куйбышевское водохранилище, в водоемы охладителей Курской, Смоленской и Калининской АЭС, Астраханской области, Республики Татарстан.

В литературе есть информация [35] об обнаружении в Заинском водохранилище *Macrobrachium nipponense* - речной японской креветки (рис.26), которая в естественном ареале обитает в пресноводных водоемах Японии, в южноамериканских, австралийских, индийских водоемах.



Рис. 26. Креветка *Macrobrachium nipponense*

Fig. 26. *Macrobrachium nipponense* shrimp

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

В России, Белоруссии и Молдавии японскую креветку начали целенаправленно интродуцировать в 1980-х гг. в водоемы-охладители ГРЭС с целью улучшения кормовой базы рыб, а также обогащения фауны. Так, впервые в 1982 г. она была вселена в водоем-охладитель Берёзовской ГРЭС (Белоруссия), откуда – в водоем-охладитель Лукомльской ГРЭС (Белоруссия), несколько позже вселена в водоем-охладитель Приморской ГРЭС (Россия), водоемы бассейна р. Волга (Заинское вдхр.), Кучурганской ГРЭС (Молдавия), где успешно натурализовалась. Из Заинского вдхр. *M. nipponense* в летний период спускается в Куйбышевское. В 1990 г. проведено вселение его в ильмень Ловецкий (Астраханская обл.) [36].

По [35] Креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849), завозились в Заинское водохранилище в 1967 году из водоемов бассейна р. Амур в рыболовное хозяйство в качестве кормовой базы для рыб дальневосточного комплекса. Автором отмечается, что максимальная численность японских креветок в течение всего года отмечается вдоль градиентов теплого водоносного русла ГРЭС. В осенний период средняя численность креветок несколько увеличивалась возле водоотводных каналов и составляла в среднем $41,07 \pm 0,14$ особей на m^2 . Область обитания креветок в летний период несколько выходит за пределы ГРЭС, но ниже водосливной дамбы на удалении они не встречались.

В наших пробах японская креветка не встречалась. Мы в пробах зообентоса и в составе обрастаний выявили ханкайских креветок (табл.1), которые хорошо различимы с японскими креверками. У японской креветки тело полупрозрачное слегка коричневатое, она смотрится также как и ханкайская как стеклянная, но японские креветки крупнее: самцы - около 6 см, самки вырастают до 8 см в длину. У макробрахиумов хорошо выражены половые различия: у самцов туловище и клешни крупнее, конусовидный хвост сужающийся, более темный. У самок брюхо шире, сегменты, защищающие икру, опущены. У найденных нами креветок отсутствуют длинные клешни (рис.18, 20). Условия в Заинском водохранилище являются подходящими для жизни и японской креветки. Но у этих креветок – различные местообитания. Если японская креветка в основном находится на водных растениях в толще воды, то ханкайская – в донных биотопах. Температура воды при выращивании речной японской креветки должна находиться в пределах 26-30°C, pH 6,4-6,8, требуется высокое содержание кислорода и ток воды.

По данным [35, 36] в Заинское водохранилище при зарыблении растительноядными рыбами дальневосточного комплекса могла попасть и индийская стеклянная креветка – *Macrobrachium ehemals*. Японская креветка и индийская стеклянная креветки относятся к одному роду - Макробрахиум (*Macrobrachium*). В отличие от японской креветки индийская стеклянная креветка отличается миролюбивым поведением. Длина ее тела достигает 5 см, усы длинные, а клешни маленькие. Индийская креветка примечательна полупрозрачным телом, за что ее называют «призрак». Хитиновый покров радужно переливается на свету. Имеются и видимые отличия от ханкайской креветки: значительно отличаются глаза (рис.24,27).



Рис. 27. Индийская стеклянная креветка

Fig.27. *Macrobrachium ehemals*

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

Дополнительным, способствующим расселению креветок, фактором является наличие водной растительности.

Численность и биомасса креветок в составе бентосных проб в зоне исследований представлена на рис. 28 и 29. Можно отметить, что креветки встречались в максимальных количествах на прибрежных станциях, причем внутри водозаборного канала отмечалась численность – 300 экз/м² и биомасса – 8,86 г/м².

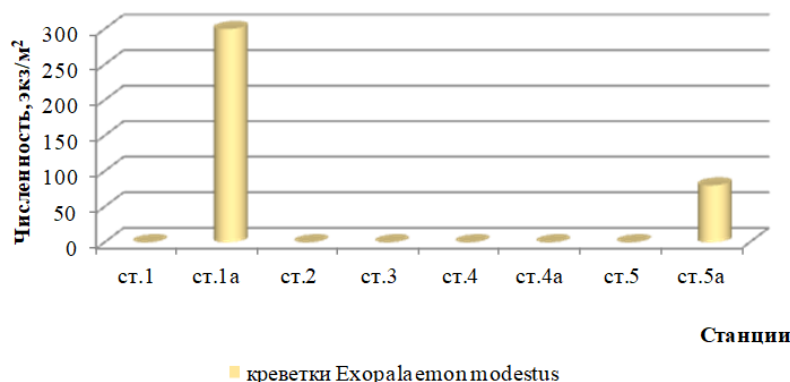


Рис.28. Численность креветок *Exopalaemon modestus* в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig.28. The number of *Exopalaemon modestus* shrimp in the water intake area of Zai State District Power Plant

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

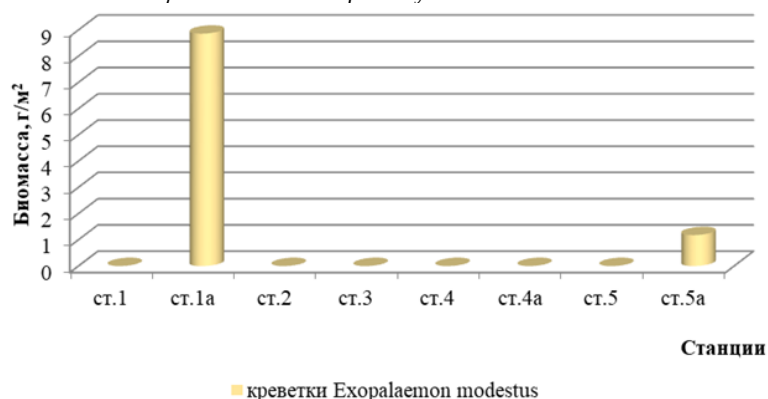


Рис. 29. Биомасса креветок *Exopalaemon modestus* в районе водозабора Зай ГРЭС

Fig. 29. Biomass of shrimp of the genus *Exopalaemon modestus* in the water intake area of Zai State District Power Plant

Результаты исследований макрозообентоса в зоне функционирования рыбозащитного сооружения по типу водовоздушной завесы позволяют сделать следующие выводы:

в зоне функционирования ВВЗ выявлены в составе зообентоса 34 вида и формы, из которых 9 относились к олигохетам, 8 – к моллюскам, 6 – к личинкам хирономид, кроме того, встречались 3 вида ручейников, по 2 вида пиявок и мшанок, а также по одному виду

бокоплавов, креветок, стрекоз и подёнок. Снижения видового разнообразия зообентоса в районе функционирования ВВЗ не отмечается. По числу видов доминировали олигохеты, наиболее часто встречались моллюски *Dreissena polymorpha* и личинки хирономид *Limnochironomus sp. nervosus*.

Численность зообентоса варьировала от 520 экз./м² до 3790 экз./м². Биомасса зообентоса варьировала от 12,2 г/м² до 1040,5 г/м². Наибольшая численность и биомасса зообентоса на глубоководных станциях отмечалась в районе водовоздушной завесы за счет присутствия дрейссены.

Личинки ручейников, которые свидетельствуют о высоком качестве вод, отмечались в канале и на прибрежных станциях с численностью от 20 до 60 экз/м² и биомассой от 0,01 до 0,12 г/м².

Максимальные численность (1950 экз/м²) и биомасса дрейссены (около 950 г/м²) отмечены в районе функционирования ВВЗ и перед ней – на участках максимальной проточности с наименьшей заиленностью грунтов. Выявлено, что зона ВВЗ не препятствует воспроизводству моллюсков дрейссены, но приводит к снижению их численности от 2 до 5 раз по сравнению с РЗУ с сетчатыми касетами.

Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по показателям развития зообентоса выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации. На прибрежных участках выявлены ханкайские креветки, причем внутри водозаборного канала отмечалась численность – 300 экз/м² и биомасса – 8,86 г/м².

Заключение (Conclusions)

Роль рыбозащитных устройств при заборе воды [1-4] на современном этапе эксплуатации водных экосистем повышается. Среди наиболее экологичных - РЗУ типа «водовоздушная завеса» [3]. Проведено исследование фактического состояния водной экосистемы по характеристикам и уровню развития зообентоса в зоне функционирования РЗУ типа «водовоздушная завеса». Впервые изучены качественные и количественные особенности состояния зообентоса в зоне реально функционирующей ВВЗ РЗС предприятия энергетики в сравнении с контрольными участками водохранилища.

Показано, что в период максимальных температур в районе ВВЗ отмечается высокое качество вод по характеристикам состояния зообентоса.

На собранном гидробиологическом материале в период максимальных температур показано, что в качественном составе зообентоса выявлены 34 вида и формы, из которых 9 относились к олигохетам, 8 – к моллюскам, 6 – к личинкам хирономид, кроме того, встречались 3 вида ручейников, по 2 вида пиявок и мшанок, а также по одному виду бокоплавов, креветок, стрекоз и подёнок. Снижения видового разнообразия зообентоса в районе функционирования ВВЗ не отмечается. Численность зообентоса варьировала от 520 экз./м² до 3790 экз./м². Биомасса зообентоса варьировала от 12,2 г/м² до 1040,5 г/м². Наибольшая численность и биомасса зообентоса на глубоководных станциях отмечалась в районе водовоздушной завесы за счет присутствия дрейссены. Выявлено, что зона ВВЗ не препятствует воспроизводству моллюсков дрейссены, но приводит к снижению их численности от 2 до 5 раз по сравнению с РЗУ с сетчатыми касетами. Личинки ручейников, которые свидетельствуют о высоком качестве вод, отмечались в водозаборном канале и на прибрежных станциях с численностью от 20 до 60 экз/м² и биомассой от 0,01 до 0,12 г/м². На прибрежных участках впервые выявлены ханкайские креветки, причем внутри водозаборного канала отмечалась численность – 300 экз/м² и биомасса – 8,86 г/м².

Наблюдения за состоянием экосистемы в районе действия водовоздушной завесы и оценка качества вод по показателям развития зообентоса выявили высокое качество вод на участке в районе функционирования ВВЗ, улучшение экологической ситуации.

Литература

- 1.Калайда М. Л., Саетов А. Р. Рыбозащитные сооружения на водоемах объектов энергетики как важное мероприятие по сохранению стада рыб. - Международный водно-энергетический форум-2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1.-Казань: Казан.гос.энерг.унт, 2018.- 373 с.- С.108-113.
- 2.Калайда М.Л., Саетов А.Р. Экологическая составляющая эксплуатации рыбозащитных устройств филиала АО «Татэнерго» -Заинская ГРЭС.-XXV Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика: сборник материалов конференции. - В 3-х томах. /Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. - Казань, 2022. С. 388-391.
- 3.Калайда М.Л., Саетов А.Р. Водные биологические ресурсы в структуре экологических проблем энергетических объектов/Проблемы энергетики, 2022, т.24, №2.- С.175-185.

- 4.Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Современная гидрологическая характеристика Куйбышевского водохранилища как основа для развития водных биоресурсов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
5. Калайда М.Л., Шарафутдинов Р. Г. Особенности изменений водных биоресурсов Куйбышевского водохранилища в современных климатических и гидрологических условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 3. С. 150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.
6. Хамитова, М.Ф. Исследование изменений гидробиологических характеристик в условиях локальных загрязнений в регионе Средней Волги / М.Ф. Хамитова, М.Л. Калайда. – LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Германия, 2018. – 310 с
7. Калайда М.Л., Гордеева М.Э. Особенности физико-химического состояния вод водоемов объектов энергетики. - Международный водно-энергетический форум -2018: сборник материалов докладов/ в 2 т. Т.1. -Казань: Казан.гос.энерг.унт, 2018. 373 с. С.284-290.
8. Махнин В.Г. Рыбохозяйственное освоение Заинского водохранилища. Сб. науч. трудов. Л., 1988, вып. 280, с. 75-83.
9. Киткина Ж.В. Экологическая ситуация и процессы самоочищения в Заинском водохранилище Республики Татарстан// Материалы III межвузовской студенческой научно-практической конференции. Экологическая политика: проблемы и перспективы. Пермь, 2015, с. 110-113.
10. Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В. Донные отложения Заинского водохранилища.- Ученые записки Казанского университета.-Т.153, кн.1.- 2011.-С.190-202.
- 11.Калайда М.Л. Экологическая оценка Куйбышевского водохранилища в условиях антропогенного воздействия.- Казань: Казан.гос.энерг.ун-т,2003.-135 с.
- 12.Калайда М.Л. *Dreissena polymorpha* (Pall.) и *Dreissena bugensis* (Andr.) (Mollusca, Bivalvia) в верхней части Куйбышевского водохранилища / Биология внутренних вод, 2004, №3, с.60-67
- 13.Калайда М.Л. Борьба с биообрастаниями – важная задача энерго- и ресурсосбережения. Часть 1 / М.Л. Калайда, Г.В. Новикова, Т.П. Синютина, А.А. Шмакова // Энергетика Татарстана. - 2008. - №2. - С. 51-55.
- 14.Калайда М.Л. Борьба с биообрастаниями – важная задача энерго- и ресурсосбережения. Часть 2 / М.Л. Калайда, Г.В. Новикова, Т.П. Синютина, А.А. Шмакова // Энергетика Татарстана. - 2008. - №3. - С. 85-92.
- 15.Калайда М.Л., Синютина Т.П., Зиганшина А.А. *Dreissena polymorpha* (Pall.) (Mollusca, Bivalvia) в составе перифитона водоема охладителя Казанской ТЭЦ-1. – Энерго- и ресурсоэффективность в энергобезопасности России: Пленарные доклады, материалы юбилейной международной научно-технической конференции/ Под общей редакцией д-ра физ.-мат. наук, профессора Ю.Я.Петрушенко. – Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. – 232 с. – С.211-216.
- 16.Калайда М.Л. Повышение эффективности работы системы технического водоснабжения ТЭС / М.Л. Калайда, Т.П. Муганцева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.- 2012.- № 7/8.- С. 128-131.
- 17.Муганцева Т.П. Повышение эффективности работы системы технического водоснабжения на ТЭС: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.14.14/Муганцева Татьяна Петровна.- Казань, 2012. – 16 с.
- 18.Балушкина Е.В. Хирономиды как Индикаторы степени загрязнения воды / Е.В. Балушкина // Методы биологического анализа пресных вод. – 1976. – С .106-118.
19. Пареле Э.А. Малощетинковые черви устьевых районов рек Даугава и Лиелупе, их значение в санитарно-биологической оценке : автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16/ 189.Пареле Элга Антоновна. – Тарту, 1975. – 23 с
- 20.Brinkhurst R. O., Kennedy C. R. Studies on the biology of the Tubificidae (Annelida, Oligochaeta) in a polluted stream //J. Anim.Ecol.-N 34.- 1965.-P. 429 - 443.
- 21.King D. L., Ball R. C. Water Pollut.Control Fed.-1964. - N 36.- P. 650-653.
- 22.Kolkwitz, R. Ekologie der pflanzlichen Saprobien / R. Kolkwitz, M. Marsson // Ber. Deutsch. Bot. Ges. – 1908. – Bd 22. – S. 505–519.
- 23.Kolkwitz, R. Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna / R. Kolkwitz, M. Marsson // Mitteil. aus der königl. Prüfung für Wasserbesorg und Abwasserbes. – 1902. – H. 1. – S. 33.
- 24.Pantle, R. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse / R. Pantle, H. Buck // Gas- und Wasserfach, 1955 – Vol. 96 – P. 604-618.
- 25.Sládeček V. The future of the saprobity system // Hydrobiologia. 1965. V. 25. № 3-4.
- 26..Sládeček V. System of water quality from the biological point of view. // Arch. Hydrobiol., Beiheft., Ergebnisse der Limnol. 1973. Bd 7. S. 1-218.

27. Shannon CE. The mathematical theory of communication // Bell Syst. Techn. J. 1948. V. 27. P. 379-423, 623-656. - Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117p.
28. Goodnight C. J. and Whitley L. S, ProC. 15-th Ind.Waste Conf.// Purdue Univ. Ext.ser.-1961.-Vol. 106,- P. 139 -142.
29. Конвенция о биологическом разнообразии (Рио-де-Жанейро, 5 июня 1992 года)/ Балащенко С.А., Макарова Т.И.- Международно-правовая охрана окружающей среды и права человека. Учебное пособие.- Минск: Wor'd Wide Printing Duncanville, USA.-1999.-С.148-174.
30. Нецветаев А.Г. О понятии биологического разнообразия / Экологическое право, 2000 № 2,- С.6-12.
31. Wilhm J. L., Dorris T. C. Biological parametris for water quality enteric // Bioscience .-1968.- Vol. 18 .- N 6'.- P. 477 - 480.
32. Заинская ГРЭС (Татарстан) занялась зарыблением Куйбышевского водохранилища [Электронный ресурс]// регнум URL: <https://regnum.ru/news/167512> (дата обращения: 30.06.2023).
33. Пресноводная ханкайская креветка (*Echopalaemon modestus*) / [Электронный ресурс] // zooclub.ru : [сайт]. — URL: <https://zooclub.ru/invertebrata/crustacea/presnovodnaya-khankayskaya-krevetka-echopalaemon-modestus.shtml> (дата обращения: 19.12.2023).
34. Ханкайская креветка / [Электронный ресурс] // Зоопортал aquazoom.ru : [сайт]. — URL: <https://aquazoom.ru/arthropod/arthropod.php?in=1027&ysclid=lqbkvo34lq252321598> (дата обращения: 19.12.2023).
35. Локализация пресноводной креветки *MACROBRACHIUM NIPPONENSE* (DE HAAN, 1849) в Заинском водохранилище // [Электронный ресурс] учимся URL: <https://uchimsya.com/a/sEYe1TWN> (дата обращения: 30.06.2023).
36. Экзотический захватчик. Японская креветка заселяет Россию от Дагестана до Москвы [Электронный ресурс]// Дикий юг URL: <https://dzen.ru/a/YgkawPl4qXTs1voz> (дата обращения: 30.06.2023).
37. РЕЧНАЯ ЯПОНСКАЯ КРЕВЕТКА (*Macrobrachium nipponense*) // Домашний аквариум URL: <https://housaqua.com/1268-macrobrachium-nipponense.html> (дата обращения: 30.06.2023).
38. Креветка макробрахиум // aquazhizn URL: <https://aquazhizn.ru/vidy-rybok/krevetka-makrobrahium> (дата обращения: 30.06.2023).

Авторы публикации

Марина Львовна Калайда – д-р биол. наук, профессор, заведующий кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры, Казанский государственный энергетический университет.

Айнур Расихович Саетов – аспирант Казанского государственного энергетического университета. E-mail: saitov67@mail.ru.

Хамитова Мадина Фархадовна – канд. биол. наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура», Казанский государственный энергетический университет. E-mail: it-sk@bk.ru.

References

1. Kalaida M. L., Saetov A. R. Fish protection structures on reservoirs of energy facilities as an important measure for the conservation of fish population. - International Water and Energy Forum-2018: collection of materials of reports/ in 2-vols. Vol.1.-Kazan: Kazan State Energy University, 2018. - 373 p.-p.108-113.
2. Kalaida M. L., Saetov A. R. Environmental component of the operation of fish protection structures of the branch of JSC Tatenergo - Zainsk SDPP.- In the collection: XXV All-Russian postgraduate and master's scientific seminar dedicated to Power Engineer's Day. Conference materials. In 3 volumes. Under general editorship of E.U. Abdullazyanov . Kazan, 2022. P. 388-391.
3. Kalaida M. L., Saetov A. R. Aquatic biological resources in the structure of environmental problems of energy facilities / Problems of energy, 2022, vol.24, №2.- P.175-185.
4. Kalaida M. L., Sharafutdinov R. G. Modern hydrological characteristics of the Kuibyshev reservoir as a basis for the development of aquatic biological resources // News of higher educational institutions. Problems of energy. 2023. Vol.25. № 1. P. 166-183. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-166-183.
5. Kalaida M. L., Sharafutdinov R. G. Features of changes in aquatic biological resources of the Kuibyshev reservoir in modern climatic and hydrological conditions // News of higher educational

- institutions. Problems of energy. 2023. Vol.25. № 3. P. 150-167. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-3-150-167.
6. Khamitova M.F., Kalaida M.L. Investigation of changes in hydrobiological characteristics under conditions of local pollution in the Middle Volga region. LAP LAMBERT Academic Publishing (OmniScriptum GmbH & Co. KG), Saarbrücken, Germany/ Germany.2018, 310 p.
7. Kalaida M. L., Gordeeva M.E. Features of the physico-chemical state of water in reservoirs of energy facilities. - International Water and Energy Forum -2018: collection of reports / in 2volumes. Vol.1. - Kazan: Kazan State Energy University, 2018. 373 p. P.284-290.
8. Makhnin V.G. Fishery development of the Zainsk reservoir. Collection of scientific works. L., 1988, issue. 280, p. 75-83.
- 9.Kitkina J.V. Ecological situation and self-purification processes in the Zainsk reservoir of the Republic of Tatarstan // Materials of the III Interuniversity Student Scientific and Practical Conference. Environmental policy: problems and prospects. Perm, 2015, p. 110-113.
10. Ivanov D.V., Shagidullin R.R., Ziganshin I.L., Osmelkin E.V. Bottom sediments of the Zainsk reservoir.- Scientific notes of Kazan University.-Vol.153, b.1.- 2011.-P.190-202.
11. Kalaida M.L. Environmental assessment of the Kuibyshev reservoir under conditions of anthropogenic impact.- Kazan: Kazan State Power Engineering University,2003.-135 p.
12. Kalaida M.L. Dreissena polymorpha (Pall.) and Dreissena bugensis (Andr.) (Mollusca, Bivalvia) in the upper part of the Kuibyshev reservoir / Biology of inland waters, 2004, №3, p.60-67
13. Kalaida M.L. The fight against biofouling is an important task of energy and resource conservation. Vol. 1 / M.L. Kalaida, G.V. Novikova, T.P. Sinyutina, A.A. Shmakova // Energy of Tatarstan. - 2008. - №2. - P. 51-55.
14. Kalaida M.L. The fight against biofouling is an important task of energy and resource conservation. Vol. 2 / M.L. Kalaida, G.V. Novikova, T.P. Sinyutina, A.A. Shmakova // Energy of Tatarstan. - 2008. - №3. - P. 85-92.
15. Kalaida M.L., Sinyutina T.P., Ziganshina A.A. Dreissena polymorpha (Pall.) (Mollusca, Bivalvia) as part of the periphyton of the cooler reservoir of the Kazan CHPP-1. – Energy and resource efficiency in energy security of Russia: Plenary reports, materials of the anniversary international scientific and technical conference / Under general editorship of Dr. of physical and math sciences, prof. Yu.Ya.Petrushenko. – Kazan State Power Engineering University, 2007. – 232 p. – P.211-216.
16. Kalaida M.L. Increasing the efficiency of the technical water supply system of thermal power plants / M.L. Kalaida, T.P. Mugantseva // News of higher educational institutions. Energy problems.- 2012.- № 7/8.- P. 128-131.
17. Mugantseva T.P. Increasing the efficiency of the technical water supply system at thermal power plants: abstract of PhD thesis: 05.14.14/Mugantseva Tatyana Petrovna.- Kazan, 2012. – 16 p.
18. Balushkina E.V. Chironomidae as indicators of the degree of water pollution / E.V. Balushkina // Methods for biological analysis of fresh water. – 1976. – P. 106-118.
19. Parele E.A. Oligochaete worms in the estuary areas of the Daugava and Lielupe rivers, their significance in sanitary-biological assessment : abstract of PhD thesis: 03.00.16/ 189. Parele Elga Antonovna. – Tartu, 1975. – 23 p.
- 20.Brinkhurst R. O., Kennedy C. R. Studies on the biology of the Tubificidae (Annelida, Oligochaeta) in a polluted stream //J. Anim.Ecol.-N 34.- 1965.-P. 429 - 443.
- 21.King D. L., Ball R. C. Water Pollut.Control Fed.-1964. - N 36.- P. 650-653.
- 22.Kolkwitz, R. Ekologie der pflanzlichen Saprobien / R. Kolkwitz, M. Marsson // Ber. Deutsch. Bot. Ges. – 1908. – Bd 22. – S. 505–519.
- 23.Kolkwitz, R. Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna / R. Kolkwitz, M. Marsson // Mitteil. aus der königl. Prüfung für Wasserbesorg und Abwasserbes. – 1902. – H. 1. – S. 33.
- 24.Pantle, R. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse / R. Pantle, H. Buck // Gas- und Wasserfach, 1955 – Vol. 96 – P. 604-618.
- 25.Sládeček V. The future of the saprobity system // Hydrobiologia. 1965. V. 25. № 3-4.
- 26..Sládeček V. System of water quality from the biological point of view. // Arch. Hydrobiol., Beiheft., Ergebnisse der Limnol. 1973. Bd 7. S. 1-218.
27. Shannon QE. The mathematical theory of communication // Bell Syst. Techn. J. 1948. V. 27. P. 379-423, 623-656. - Shannon C.E., Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117p.
- 28.Goodnight C. J. and Whitley L. S, Proc. 15-th Ind.Waste Conf.// Purdue Univ. Ext.ser.-1961.-Vol. 106,- P. 139 -142.
29. Convention on Biological Diversity (Rio de Janeiro, 5th June 1992)/ Balashenko S.A., Makarova T.I.- International legal protection of the environment and human rights. Tutorial.- Minsk:Wor'd Wide Printing Duncanville, USA.-1999.-P.148-174.

30. Netsvetaev A.G. About the concept of biological diversity / Environmental law, 2000 № 2,- P.6-12.
31. Wilhm J. L., Dorris T. C. Biological parametris for water quality enteric // Bioscience .-1968.- Vol. 18 .- N 6'.- P. 477 - 480.
32. Zainsk State District Power Plant (Tatarstan) began stocking the Kuibyshev Reservoir with fish [Electronic resource]// regnum URL: <https://regnum.ru/news/167512> (date of access: 30.06.2023).
33. Freshwater Khanka shrimp (Exopalaemon modestus) / [Electronic resource] // zooclub.ru : [website]. — URL: <https://zooclub.ru/invertebrata/crustacea/presnovodnaya-khankayskaya-krevetka-exopalaemon-modestus.shtml> (date of access: 19.12.2023).
34. Khanka shrimp / [Electronic resource] // Zoo portal aquazoom.ru : [website]. — URL: <https://aquazoom.ru/arthropod/arthropod.php?in=1027&ysclid=lqbvko34lq252321598> (date of access: 19.12.2023).
35. Localization of the freshwater shrimp MACROBRACHIUM NIPPONENSE (DE HAAN, 1849) in the Zainsk Reservoir // [Electronic resource] uchimsya URL: <https://uchimsya.com/a/sEYe1TWN> (date of access: 30.06.2023).
36. Exotic invader. Japanese shrimp colonizes Russia from Dagestan to Moscow [Electronic resource]// Wild South URL: <https://dzen.ru/a/YgkawPl4qXTs1voz> (date of access: 30.06.2023).
37. JAPANESE RIVER PRAWN (Macrobrachium nipponense) // [Electronic resource] Home aquarium URL: <https://housaqua.com/1268-macrobrachium-nipponense.html> (date of access: 30.06.2023).
38. Macrobrachium shrimp // [Electronic resource] aquazhizn URL: <https://aquazhizn.ru/vidy-rybok/krevetka-makrobrahium> (date of access: 30.06.2023).

Authors of the publication

Marina L. Kalaida –Kazan State Power Engineering University.

Aynur R. Saetov –Kazan State Power Engineering University.

Madina F. Khamitova – Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.10.2 Экологическая безопасность.

Получено **17.01.2024 г.**

Отредактировано **19.01.2024 г.**

Принято **21.02.2024 г.**

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



УДК 504.064.38

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-38-50

ВЛИЯНИЕ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В СРЕДЕ НА ИНДЕКСЫ ТОКСИЧНОСТИ, ПОЛУЧАЕМЫЕ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ

Манахова П.В.¹, Смирнов А.В.¹, Семенова М.И.¹, Ковалевская А.С.¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Россия
caterpillar921@gmail.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования исходит из понимания необходимости постоянного развития токсикологического анализа. Так как в токсикологическом анализе используются простейшие организмы в качестве биотестов, реакции которых на присутствие тех или иных загрязнителей всегда будут различаться, то единственным способом оценки полезности биотеста, как инструмента, является изучение его поведения в условиях конкретных задач. Биотесты различаются по своим метаболическим свойствам, в частности по способам получения энергии от наличия молекулярного кислорода в среде. Однако, предполагается, что наличие разных концентраций кислорода оказывает влияние на поведение простейших, что, в свою очередь, может влиять на результаты токсикологического анализа. Ранее такое влияние не было изучено. **ЦЕЛЬ.** Изучение влияния растворенного кислорода на индексы токсичности, получаемые при использовании биотестов бактерий *Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers и инфузории *Paramecium caudatum* Ehrenberg, **МЕТОДЫ.** Получение индексов токсичности по биолюминесцентной реакции бактерий и хемотаксической реакции инфузорий при условии различных концентраций растворенного кислорода в исследуемых средах, в качестве которых используется дистиллированная вода и вода марки Водаqua. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** При увеличении концентрации растворенного кислорода в среде увеличивается биолюминесценция бактерий, следовательно, уменьшается индекс токсичности. Влияние на инфузории не наблюдается. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Можно сделать вывод, что растворенный кислород не влияет на биотестовый анализ с применением инфузорий. При использовании в качестве тест-организма бактерий возникает погрешность в индексе токсичности.

Ключевые слова: растворенный кислород; токсичность; биотестирование; *Escherichia coli*; *Paramecium caudatum*.

Для цитирования: Манахова П.В., Смирнов А.В., Семенова М.И., Ковалевская А.С. Влияние растворенного кислорода в среде на индексы токсичности, получаемые различными методами биотестирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 38-50. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-38-50.

INFLUENCE OF DISSOLVED OXYGEN IN THE ENVIRONMENT ON TOXICITY INDICES OBTAINED BY VARIOUS BIO-TESTING METHODS

Manakhova¹ PM., Smirnov¹ AV., Semenova¹ MI., Kovalevskaya¹ AS.

¹Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia

caterpillar921@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE* of the study comes from the understanding of the necessity of continuous development of toxicological analysis. Since The simplest organisms are used in toxicological analysis as bioindicators, the reactions of which to the presence of certain pollutants will always differ, the only way to assess the usefulness of a bioindicators as a tool is to study its behavior under specific tasks. Bioindicators differ in their metabolic properties, in particular, in the ways of obtaining energy from the presence of molecular oxygen in the environment. However, it is assumed that the presence of different concentrations of oxygen in the environment affects the behavior of the simplest organisms, which, in its turn, can affect the results of toxicological analysis. Previously, this effect has not been studied. *THE PURPOSE.* The research of the effect of dissolved oxygen on toxicity indices obtained using of bacteria *Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers and ciliates *Paramecium caudatum* Ehrenberg, *METHODS.* Obtaining indices of toxicity is given with different concentrations of dissolved oxygen in the environment, which are distilled water and Bonaqua brand water, by the bioluminescent reaction of bacteria and chemotactic reaction of ciliates. *RESULTS.* With an increase in the concentration of dissolved oxygen in the environment, the bioluminescence of bacteria increases, therefore, the toxicity index decreases. No effect on ciliates is observed. *CONCLUSION.* It can be concluded that dissolved oxygen does not affect the biotest analysis using ciliates. When using bacteria as a test organism, an error occurs in the toxicity index.

Keywords: dissolved oxygen; toxicity; bioassay; *Escherichia coli*; *Paramecium caudatum*.

For citation: Manakhova PM., Smirnov AV., Semenova MI., Kovalevskaya AS. Influence of dissolved oxygen in the environment on toxicity indices obtained by various bio-testing methods. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (1): 38-50. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-38-50.

Введение (Introduction)

Развития промышленности, на данный момент, просто невозможно без появления новых загрязнителей и образования отходов, которые могут быть потенциально опасны не только с точки зрения деградации природных систем, но и с точки зрения здоровья и жизни человека.

Достаточно остро вопрос негативного влияния стоит для энергетической сферы, что неоднократно отмечалось в разных работах [1-2]. Помимо появления новых загрязнителей, формирование отходов также является объектом существенной озабоченности. Стоит понимать, что, говоря об отходах производства и потребления, задача их минимизации касается не только сфер экологии и качества жизни человека, но и сфер экономики и энергетики, так как подавляющее большинство отходов в том или ином виде способны быть источниками полезного для производства сырья-так называемым вторичным сырьем [3].

Появление новых видов загрязнителей и их потенциальное вторичное использование невозможно без качественной оценки потенциальной опасности выбранных веществ. На данный момент существует целое множество различных методов и приборов контроля и определения количества вещества, что безусловно важно с точки зрения формирования нормативов и определения предельно допустимых концентраций, превышение которых способно вызывать негативные последствия для природных систем и человека. Однако, количественные методы не способны давать полной картины влияния нескольких веществ вместе и даже конкретного соединения. Для подобной оценки необходимо устанавливать интегральную характеристику загрязненности той или иной среды, что, на данный момент, возможно только за счет применения различных методов биоиндикации (или биотестирования) - использования живых тест-организмов и изучения их реакций в условиях присутствия загрязнителя или группы загрязнителей в конкретной среде.

Разработка аппаратных методов фиксации поведения живых тест-организмов является процессом динамичным, требующим постоянного развития, так как свойства разных тест-организмов позволяют получать разные картины опасности одного и того же вещества. Биоиндикация просто не может существовать без постоянного поиска новых тест-организмов, изучения их реакций и попыток нахождения новых методов регистрации

таких реакций. Поэтому, с точки зрения развития данного направления, единственным способом оценки полезности тест-организма, как инструмента, является изучение его поведения в условиях конкретных задач [4].

Литературный обзор (Literature Review)

В целях повышения эффективности, как с точки зрения финансовых затрат, так и со стороны получения данных максимально быстрым способом, методы биотестирования, в большинстве своем, основываются на регистрации различных ответных реакций у простейших. На данный момент в роли тест-организмов для получения картины токсичности среды используют различные представители простейших: инфузории, бактерии, рачки, микроводоросли и др.

Реакции тест-организмов на присутствие в среде потенциально опасных соединений имеют ситуативный характер, который, во многом, зависит от свойств самих простейших.

Говоря о свойствах тест-организмов, также называемых тест-объектами, стоит отметить, что одним из основных является свойство получать и производить энергию в условия наличия кислорода в среде обитания. Интерес к данному свойству основывается на понимании зависимости количества кислорода в среде от степени загрязненности среды.

Живые организмы делятся на аэробов, которые нуждаются в свободном молекулярном кислороде для синтеза энергии, анаэробов, получающих энергию при отсутствии доступа кислорода, и факультативных анаэробов, чьи энергетические циклы при отсутствии кислорода проходят по анаэробному пути. К последним в том числе относятся некоторые бактерии и простейшие, например, *Escherichia coli* (Migula) *Castellani and Chalmers* и *Paramecium caudatum* *Ehrenberg*, используемые в качестве тест-организмов при оценке токсичности широкого спектра химических веществ, природных и сточных вод, донных отложений, полимерных материалов и т.д. Поскольку данные тест-организмы, как и большинство организмов используемых в биотестовом анализе, являются обитателями водных сред, то, говоря о использовании ими молекулярного кислорода, подразумевается использование растворенного кислорода в среде [4-5].

Бактерии *E.coli* могут быть использованы в качестве тест-организма для определения токсичности большого ряда сред, материалов и соединений [6]. Тест-реакцией *E.coli* является биолюминесценция бактерий, обусловленная наличием в организме определенных ферментов и других белков [7]. При чем изменение биолюминесценции бактерий может быть вызвано наличием химических соединений. Вредные для жизни бактерий соединения будут подавлять показатели их биолюминесценции. Фиксирование данных изменений и легло в основу технического метода определения токсичности с помощью бактерий.

Однако в результате нестабильности показаний люминесценции, следовательно, и токсичности исследуемых проб многие лаборатории отказываются от использования *E.coli*. Вероятно, причиной этому может служить растворенный в воде кислород. Ряд исследований [8-9] показывает, что сокращение количества растворенного кислорода в среде приводит к подавлению экспрессии белков, ответственных за биолюминесценцию организмов, что в свою очередь снижает интенсивность биолюминесценции бактерий. Предположительно, это может повлиять на результаты токсикологических исследований. Таким образом, в зависимости от количества растворенного кислорода в пробе, может наблюдаться искажение получаемой картины токсичности. Однако прямых исследований зависимости индекса токсичности анализируемых проб от количества содержащегося в них растворенного кислорода ранее проведено не было.

Инфузории *P.caudatum* дышат растворенным в воде кислородом всей поверхностью тела. Согласно литературным источникам [10], в условиях пониженной температуры окружающей среды или снижении концентрации растворенного кислорода в воде клетки *P.caudatum* способны переходить на дыхание за счет гликолиза. Кроме того, простейшие выработали ряд механизмов, обеспечивающих выживание в анаэробных условиях [11]. Исходя из выше изложенного, пониженная концентрация растворенного кислорода, предположительно, не должна оказывать на клетки инфузорий негативного влияния. Однако до сегодняшнего дня зависимость индекса токсичности, рассчитанного в результате биотестового анализа с использованием *P.caudatum* в качестве тест-организма, от концентрации растворенного кислорода в водной среде не была изучена.

Таким образом, токсикологических исследований влияния количества растворенного кислорода в водной среде на тест-реакции *E.coli* и *P.caudatum* ранее проведено не было. Изучение данной зависимости стало целью работы. Результаты позволят оценить вклад растворенного кислорода в погрешность определения индекса токсичности методом биотестирования.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследований стали тест-реакции бактерий *E.coli* и инфузорий *P.caudatum*.

На основании данных литературных источников, приведенных выше, были сформулированы следующие гипотезы:

- 1) Изменение концентрации растворенного кислорода в водной среде оказывает влияние на интенсивность биолюминесценции бактерий *E.coli*;
- 2) Изменение концентрации растворенного кислорода в водной среде не оказывает влияние на реакцию инфузорий *P.caudatum*.

Эксперимент включает в себя 3 основных этапа: аэрацию воды с последующим измерением концентрации в ней растворенного кислорода и регистрацией изменения тест-реакции тест-организмов.

Концентрация растворенного кислорода изменялась путем аэрации воды в течение 30 минут с отбором проб каждые 10 минут. Измерение массовой концентрации растворенного кислорода в воде осуществлялось амперометрическим методом, согласно РД 52.24.419-2019, по силе тока, протекающего в цепи электродной системы сенсора кислорода.

Известно, что концентрация растворенного кислорода напрямую зависит от давления и обратно зависит от температуры окружающей среды и минерализации воды [12]. Дистиллированная вода содержит максимально возможное количество растворенного кислорода, поэтому ее аэрация не приводит к изменению концентрации растворенного кислорода. Учитывая вышеизложенную информацию, в качестве исследуемой среды была использована минеральная вода марки *Bonaqua*. Выбор марки обусловлен несколькими причинами. Качественный и количественный состав воды строго ограничен, он приведен в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Состав минеральной воды Bonaqua
Composition of Bonaqua mineral water

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			

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

Химический состав *Bonaqua* практически идентичен составу раствора Лозина-Лозинского, который является оптимальной средой для культивирования *P.caudatum*. Состав раствора Лозина-Лозинского приведен в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Состав раствора Лозина-Лозинского
Composition of Lozin-Lozinsky solution

Основной химический состав, мг/л			
Катионы:		Анионы:	
Натрий (Na^+)	446	Гидрокарбонаты (HCO_3^-)	145
Кальций (Ca^{2+})	36	Хлориды (Cl^-)	715
Магний (Mg^{2+})	18	Сульфаты (SO_4^{2-})	71
Калий (K^+)	51		

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

Для культивации *E.coli* используются различные среды [13], главные компоненты которых также содержатся в минеральной воде Bonaqua.

Кроме того, ранние исследования [14-15] показали, что *Bonaqua* не оказывает резко негативного воздействия на *P.caudatum*, что делает использование минеральной воды в биотестовом анализе приемлемым. Результаты исследования влияния *Bonaqua* на бактерий *E.coli* приведены в данной работе.

Регистрация изменения тест-реакций *E.coli* и *P.caudatum* проводилась с помощью биотестового анализа, согласно ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.1-96 16.2:2.2.1-96 и РД 52.24.419-2019 для бактерий, ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.2-98 для инфузорий.

Метод биотестирования с использованием Escherichia coli. Метод биотестирования - метод интегральной оценки суммарной токсичности среды на основании биологической реакции живых организмов.

Бактерии *E.coli* являются представителем типичных непатогенных бактерий. Средой обитания является желудочно-кишечный тракт людей и высших животных. Размером $0,40,8 \times 1-3$ мкм, объём клетки составляет около $0,6-0,7$ мкм³. Простейшие склонны к передвижению, перемещение осуществляют посредством жгутиков [16]. В рамках данного исследования был использован биосенсор «Эколюм», в состав которого входит генно-инженерный люминесцентный штамм *E.coli* [17].

Метод биотестирования с использованием биосенсора «Эколюм» основан на способности бактерий свечиться. По уменьшению интенсивности биолюминесценции определяется показатель токсичности. Более того, согласно [17], отмечается наличие хемотаксиса. Некоторые химические соединения будут являться аттрактантами-веществами заведомо привлекательными для простейших. Наилучшими аттрактантами являются органические вещества – сахар, аминокислоты.

Интенсивность биолюминесценции регистрировалась прибором экологического контроля «Биотокс-10М» в соответствии с методическими рекомендациями МР № 01.018-07. Прибор автоматически высчитывает токсичность Т пробы по формуле (1):

$$T = \frac{(X_{K1} - X_{П1})}{X_{K1}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где X_{K1} – уровень свечения в контрольной пробе; $X_{П1}$ - уровень свечения в опытной пробе.

На основании значения индекса токсичности все пробы можно разделить на 3 группы:

- 1) Допустимая степень токсичности образца ($T < 20$)
- 2) Образец токсичен ($20 \leq T < 50$)
- 3) Высокая токсичность образца ($T \geq 50$)

Метод биотестирования с использованием Paramecium caudatum. Для оценки реакции *P.caudatum* на изменение концентрации растворенного кислорода в воде был применен метод биотестирования с применением прибора серии «Биотестер». Метод основан на способности инфузорий двигаться по направлению к аттрактантам и от репеллентов (реакция хемотаксиса). Кроме того, *P.caudatum* – эукариотические организмы, как большинство организмов на планете, поэтому их реакции могут быть сопоставимы с цитологическим ответами более сложно организованных животных.

Хемотаксическая реакция реализуется при условии наличия стабильного во времени градиента концентраций химических веществ. Такой градиент создается путем насаивания исследуемой жидкости на суспензию тест-организмов, смешанную с загустителем (поливиниловым спиртом). Таким образом, в кювете образуется две зоны, разделенные границей раздела. По истечении 30 минут в зависимости от токсичности исследуемой пробы возможно 3 варианта распределения тест-организмов в кювете. Если исследуемая проба не содержит токсические вещества, клетки мигрируют в верхние слои жидкости. Если исследуемая проба умеренной степени токсичности, клетки равномерно распределяются по кювете. В случае если исследуемая проба сильно токсичная, клетки остаются в нижних слоях кюветы.

Согласно методике ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.2-98, индекс токсичности пробы рассчитывается, как отношение числа клеток в контрольной и исследуемой пробах (2):

$$T = \frac{|I_{ср.к.} - I_{ср.а.}|}{I_{ср.к.}} \cdot K \quad (2)$$

где $I_{ср.к.}$, $I_{ср.а.}$ – средние показания прибора для контрольных и анализируемых проб соответственно, K - коэффициент разбавления пробы.

На основании значения индекса токсичности все пробы можно разделить на 3 группы:

- 1) Допустимая степень токсичности ($0,00 < T \leq 0,40$)
- 2) Умеренная степень токсичности ($0,40 < T \leq 0,70$)
- 3) Высокая степень токсичности ($T > 0,70$)

Обсуждение результатов (Discussing the results)

Результаты исследования индекса токсичности неаэрированной минеральной воды Bonaqua в пробах с бактериями *Escherichia coli*. Чтобы оценить влияние минеральной воды Bonaqua на бактерии *E.coli* и нивелировать связанную с этим влиянием погрешность, был проведен ряд экспериментов, где в качестве контрольной среды была использована дистиллированная вода, а в качестве анализируемой среды – неаэрированная Bonaqua.

Концентрация растворенного кислорода в контрольной пробе составила $9,03 \pm 0,1$ мг/л, а в Bonaqua – $8,56 \pm 0,1$ мг/л. Среднее значение токсичности составила $-64,4 \pm 1,0$. Результаты исследования приведены на рис.1. Здесь и далее погрешность индекса токсичности рассчитывалась методом переноса погрешностей.

Из диаграммы видно, что токсичность Bonaqua отрицательная, что можно интерпретировать, как факт о том, что исследуемая среда заведомо более благоприятная, чем сравниваемый с ней дистиллят.

Таким образом, можно сделать вывод, что Bonaqua не оказывает негативного влияния на бактерий.

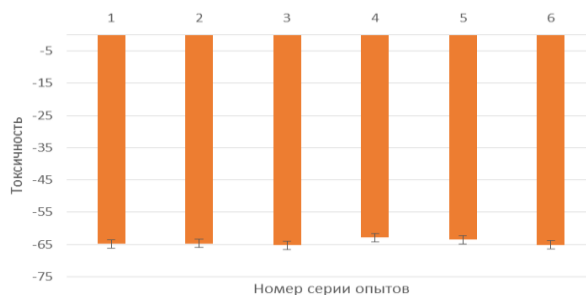


Рис. 1. Усредненные значения токсичности Bonaqua (биосенсор «Эколюм») Fig. 1. Average toxicity of Bonaqua (“Ecolum” biosensor)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Результаты исследования индекса токсичности аэрированной минеральной воды Bonaqua в пробах с бактериями *Escherichia coli*. На этом этапе измерялась токсичность проб, где в качестве исследуемой среды была взята аэрированная Bonaqua, а в качестве контрольной пробы – неаэрированная Bonaqua.

На рисунке 2 представлены результаты исследования токсичности проб с анализируемой средой на основе Bonaqua, проаэрированной в течение 10 минут. Концентрация кислорода в контрольной пробе составила $7,82 \pm 0,1$ мг/л, в опытной пробе – $8,01 \pm 0,1$ мг/л. Среднее значение токсичности составило $-22,7 \pm 1,1$.

На рисунке 3 представлены результаты исследования токсичности проб с анализируемой средой Bonaqua, проаэрированной в течение 20 минут. Концентрация кислорода в контрольной пробе составила $7,82 \pm 0,1$ мг/л, в опытной пробе – $8,56 \pm 0,1$ мг/л. Среднее значение токсичности составило $-55,1 \pm 1,6$.

На рисунке 4 представлены результаты исследования токсичности проб с анализируемой средой Bonaqua, проаэрированной в течение 30 минут. Концентрация кислорода в контрольной пробе составила $7,82 \pm 0,1$ мг/л, в опытной пробе – $9,24 \pm 0,1$ мг/л. Среднее значение токсичности составило $-88,1 \pm 2,0$.

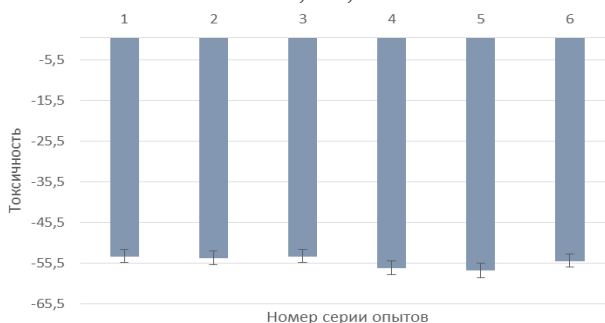


Рис. 2. Усредненные значения токсичности растворенного кислорода при времени аэрирования Bonaqua 10 минут (биосенсор «Эколюм») Fig. 2. Average toxicity of dissolved oxygen with Bonaqua aeration time of 10 minutes (“Ecolum” biosensor)

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

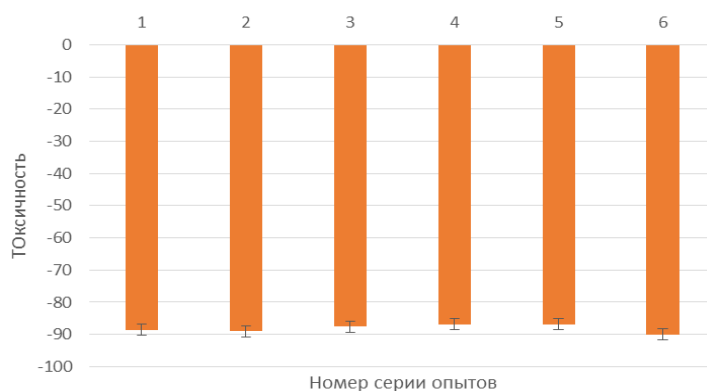


Рис. 3. Усредненные значения токсичности растворенного кислорода при времени аэрирования Bonaqua 20 минут (биосенсор «Эколюм»)

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

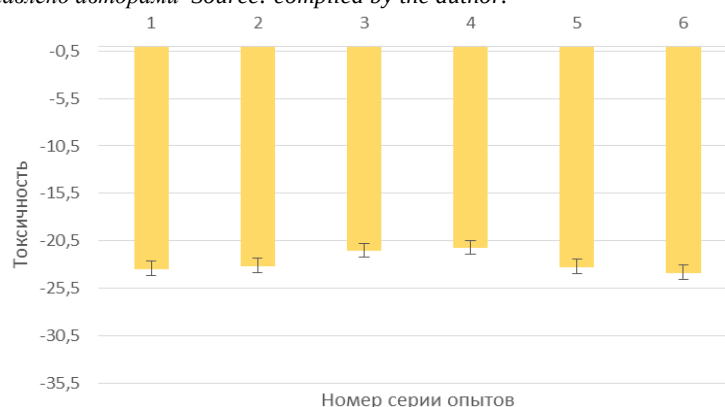


Рис. 4. Усредненные значения токсичности растворенного кислорода при времени аэрирования Bonaqua 30 минут (биосенсор «Эколюм»)

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

Полученные в результате исследования средние значения индексов токсичности сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Table 3

Результаты исследования индекса токсичности аэрированной минеральной воды Bonaqua (тест-организм - *E.coli*)

Toxicity index results of aerated mineral water Bonaqua (test organism - *E.coli*)

Время аэрации, мин	Концентрация растворенного кислорода, мг/л	Среднее значение индекса токсичности
10	8,01±0,1	-22,7±1,1
20	8,56±0,1	-55,1±1,6
30	9,24±0,1	-88,1±2,0

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

Как видно, при увеличении концентрации растворенного кислорода в водной среде уменьшается индекс токсичности проб, следовательно, увеличивается биолуминесценция биосенсора «Эколюм».

На основании экспериментальных данных был проведен однофакторный дисперсионный анализ. Все расчеты были произведены с помощью программы Microsoft Excel.

Согласно нулевой гипотезе, концентрация растворенного кислорода в водной среде не влияет на биолуминесценцию бактерий *E.coli*. Альтернативная гипотеза, напротив, гласит, что концентрация растворенного кислорода в водной среде влияет на биолуминесценцию бактерий. В таблице 4 приведены результаты расчета F-критерия, Р-значения и критического значения F-критерия, соответствующее уровню значимости $\alpha=0,05$.

Таблица 4
Table 4

Результаты расчета F-критерия, P-значения и критического значения F-критерия
Results of calculation of F-criterion, P-value and critical value of F-criterion

F-критерий	310,38
P-значение	$1,26 \cdot 10^{-55}$
F критическое	3,05

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

Поскольку P-значение гораздо меньше α , и F-критерий больше критического значения, нулевая гипотеза статистически ненадежна. С вероятностью 95% концентрация растворенного кислорода является значимым фактором, оказывающим влияние на биолюминесценцию бактерий *E.coli*.

Результаты исследования индекса токсичности аэрированной минеральной воды Bonaqua в пробах с инфузориями *Paramecium caudatum*. Сперва был проведен ряд экспериментов, где в качестве контрольной среды была использована неаэрированная Bonaqua, а в качестве анализируемой среды – аэрированная Bonaqua. Полученные средние значения индексов токсичности приведены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5

Результаты исследования влияния концентрации растворенного кислорода на индекс токсичности относительно контроля на основе неаэрированной Bonaqua (тест-организм - *P.caudatum*)
Results of the study of the effect of dissolved oxygen concentration on the toxicity index relative to the control based on unaerated Bonaqua (test organism - *P.caudatum*)

Время аэрации, мин	Концентрация растворенного кислорода, мг/л	Среднее значение индекса токсичности
10	$8,82 \pm 0,10$	$0,0072 \pm 0,0001$
20	$9,52 \pm 0,10$	$0,0073 \pm 0,0001$
30	$10,27 \pm 0,20$	$0,0071 \pm 0,0001$

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

Как видно из экспериментальных данных, изменение концентрации растворенного кислорода в водной среде не приводит к изменению индекса токсичности. Однако, согласно методике [3], нормы измерений индекса токсичности установлены с точностью до 2 знаков после запятой. В связи с этим был проведен ряд опытов, где в качестве контрольной среды использовался раствор Лозина-Лозинского. Результаты исследований сведены в таблицу 6.

Таблица 6
Table 6

Результаты исследования влияния концентрации растворенного кислорода на индекс токсичности относительно контроля на основе раствора Лозина-Лозинского (тест-организм - *P.caudatum*)
Results of the study of the effect of dissolved oxygen concentration on the toxicity index relative to the control based on Lozin-Lozinsky solution (test organism - *P.caudatum*)

Время аэрации, мин	Концентрация растворенного кислорода, мг/л	Среднее значение индекса токсичности
10	$8,82 \pm 0,10$	$0,07 \pm 0,01$
20	$9,52 \pm 0,10$	$0,06 \pm 0,01$
30	$10,27 \pm 0,20$	$0,08 \pm 0,01$

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

Необходимо отметить, что независимо от времени аэрации индекс токсичности не превышает граничное значение 0,40.

Чтобы оценить влияние концентрации растворенного кислорода на реакцию инфузорий *P.caudatum* был рассчитан критерий Стьюдента.

Согласно нулевой гипотезе, количество растворенного кислорода в водной среде не оказывает влияния на реакцию *P.caudatum*. Тогда альтернативная гипотеза предполагает обратное: количество растворенного кислорода в водной среде влияет на реакцию *P.caudatum*.

Средние значения каждой выборки находятся по формуле (3):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3)$$

где N – количество испытаний; x_i – значения физической величины (концентрации растворенного кислорода в неаэрированных и аэрированных пробах).

Среднеквадратическое отклонение оценивается по формуле (4):

$$\sigma^2\{x\} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Критерий Стьюдента рассчитывается по формуле (5):

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{(N_x - 1)\sigma^2\{x\} + (N_y - 1)\sigma^2\{y\}}} \cdot \sqrt{\frac{N_x N_y (N_x + N_y - 2)}{N_x + N_y}} \quad (5)$$

Число степеней свободы находится по формуле (6):

$$m = N_x + N_y - 2 \quad (6)$$

Результаты решения формул (3)-(6) сведены в таблицу 7.

Таблица 7
Table 7

Результаты расчета среднего значения, СКО и критерия оценки
Results of calculation of mean, RMS and evaluation criterion

	$\bar{x}$	σ^2	t	m
Неаэрированная Вода	0,073	0,00003	0,58	22
Аэрированная Вода	0,075	0,00006		

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

При уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $m=22$ критерий Стьюдента равен $t_{0,005; 22} = 2,07$.

$t_{0,005; 22} > t$, следовательно, нулевая гипотеза о том, что количество растворенного кислорода в водной среде не оказывает влияния на реакцию *P. caudatum*, подтверждается.

Результаты исследования связи между временем аэрации и концентрацией растворенного кислорода в водной среде. Коэффициент Пирсона показывает меру связи между временем аэрации и концентрацией растворенного кислорода в водной среде и рассчитывается по формуле (7):

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (7)$$

где σ_x и σ_y – стандартное отклонение выборок x и y (время аэрации и концентрация растворенного кислорода, соответственно).

Результаты промежуточных расчетов, необходимых для вычисления коэффициента Пирсона, сведены в таблицу 8.

Таблица 8
Table 8

Результаты промежуточных расчетов для вычисления коэффициента Пирсона
Results of intermediate calculations for calculating the Pearson coefficient

$\bar{x}$	20,00
$\bar{y}$	9,54
$\bar{x} \cdot \bar{y}$	190,73
$\overline{xy}$	195,57
σ_x	10,00
σ_y	0,73

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

Связи между признаками могут быть слабыми и сильными (тесными). Их критерии оцениваются по шкале Чеддока:

- $0.1 < r_{xy} < 0.3$: слабая;
- $0.3 < r_{xy} < 0.5$: умеренная;
- $0.5 < r_{xy} < 0.7$: заметная;
- $0.7 < r_{xy} < 0.9$: высокая;
- $0.9 < r_{xy} < 1$: весьма высокая;

Таким образом, коэффициент Пирсона равен $r_{xy}=0,67$, следовательно, мера связи между временем аэрации и количеством растворенного кислорода в водной среде сильная.

Исходя из полученных данных в ходе экспериментов можно сделать следующие выводы:

- Количество растворенного кислорода в водной среде влияет на тест-реакцию бактерий *E.coli*. При увеличении концентрации растворенного кислорода в воде увеличивается биолуминесценция бактерий, следовательно, уменьшается индекс токсичности.

- Растворенный кислород не оказывает влияния на инфузорий *P.caudatum*: индекс токсичности остается неизменным независимо от времени аэрации.

Таким образом, можно сделать заключение, что растворенный кислород не вносит ошибку в биотестовый анализ с применением инфузорий. При использовании в качестве тест-организма бактерий *E.coli* возникает погрешность, связанная с влиянием растворенного кислорода

Заключение (Conclusions)

Биотестирование, на данный момент, является единственным способом получения информации о потенциальной опасности среды целиком. Условной единицей, отображающей опасность среды, является индекс токсичности, получение которого возможно за счет регистрации различных реакций тест-организмов на присутствие тех или иных загрязнителей в исследуемой средой. В качестве тест-организмов, в основном, выступают простейшие, чьи реакции могут носить ситуативный характер, зависящий от взаимодействия организма с конкретным веществом. Таким образом для получения максимально эффективной картины токсичности среды необходимо находить факторы, которые могут эту картину исказить.

В ходе исследовательской работы была выдвинута гипотеза о влиянии растворенного кислорода на получаемую картину токсичности, посредством анализа реакций бактерий *E.coli* и инфузорий *P.caudatum*.

Метод биотестирования с применением *E.coli* в качестве тест-организма основан на измерении биолуминесценции бактерий. Следовательно, любые колебания показаний биолуминесценции приводят к изменению результата расчета индекса токсичности исследуемой пробы. По этой причине важно исключить из эксперимента все внешние факторы, влияющие на биолуминесценцию *E.coli* и способные исказить результаты биотестового анализа. На сегодняшний день биотестирование с использованием бактерий *E.coli* почти не применяется лабораториями из-за нерелевантности получаемых результатов.

Проведенное исследование выявило один из факторов, влияющих на стабильность показаний биолуминесценции – концентрация растворенного кислорода в водной среде, которая в свою очередь зависит от температуры окружающей среды, минерализации воды и давления. Необходимо отметить, что концентрация растворенного кислорода может быть не единственной причиной нестабильности значений биолуминесценции бактерий *E.coli*. Дальнейшие исследования помогут установить полный перечень факторов, определяющих адекватность результатов биотестового анализа.

Полученные в рамках проведенного исследования результаты свидетельствуют о том, что существующая методика биотестирования с применением *E.coli* требует модернизации. Фиксация концентрации растворенного кислорода на время проведения биотестового анализа позволит лабораториям эффективно применять данный метод на практике. Разработка методов фиксации концентрации растворенного кислорода в водной среде на время проведения биотестирования требует проведения ряда отдельных экспериментов.

Для инфузорий *P.caudatum* аналогичной зависимости выявлено не было.

Литература

1. Агишев, Р.Р., Гильфанов К.Х. Возможности экологического мониторинга атмосферного воздуха вокруг предприятий теплоэнергетики методами лазерного зондирования// «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики». 2016. № 3-4. С. 95-96.
2. Липантьев Р.Е., Тутубалина В.П. Влияние сжигания сернистых мазутов на окружающую

- среду // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19(5-6). С. 144-148.
3. Зверева Э.Р., Макарова А.О., Бахтиярова Ю.В., Королев В.И., Ильин Н.П., Туранов А.Н., Зуева О.С. Вторичное использование малосернистых нефтяных остатков в качестве основы для котельного и судового топлива // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022. №24(1)ю С.16-28.
4. Олькова А.С. Процедура выбора метода биотестирования в условиях разных видов загрязнения//Трансформация экосистем. 2022. №5(3). С. 63-75.
5. Олькова А.С. Разработка стратегии биотестирования водных сред с учетом многофакторности ответных реакций тест-организмов: дис. док. био. наук. – Киров.: 2020. – 359 с.
6. E.V. Bulychева, E.I. Korotkova, O.A. Voronova, A.A. Kustova, E.V. Petrova. Fluorescence Analysis of E.coli Bacteria in Water// Procedia Chemistry. 2014. №10, P. 179-183.
7. Bioluminescent nanopaper for rapid screening of toxic substances / J. Liu, E. Morales-Narváez, J. Orozco [et al.] // Nano Research. 2018. № 11(1). P. 114-125.
8. Alvaro R. Lara, Karim E. Jaén, Olusegun Folarin and others. Effect of the oxygen transfer rate on oxygen-limited production of plasmid DNA by Escherichia coli // Biochemical Engineering Journal. 2019. doi: 10.1016/j.bej.2019.107303
9. Baez, A., Majdalani, N. & Shiloach, J. Production of recombinant protein by a novel oxygen-induced system in Escherichia coli. // Microbial Cell Factories. 2014. №13. doi: 10.1186/1475-2859-13-50
10. Бызова Ю.Б. Дыхание почвенных беспозвоночных. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2007, 328 с.
11. Черемных Е.Г., Е.И. Симбирева. Инфузории пробуют пищу// Химия и жизнь, 2009, №1. С. 28-34.
12. Толстой М.Ю., Шишелова Т.И., Шестов Р.А. Исследования растворимости кислорода // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2015. №1(12). С. 86-90.
13. Юшин Ю.В., Подкопайло Р.В., Петрова Д.А., и др. Обзор питательных сред, используемых для культивации рекомбинантной Escherichia coli. // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. №3, С. 444-453.
14. Манахова П.В., Кустов Т.В., Семенова М.И., Максимишина Ю.С. Особенности этапов пробоподготовки для исследования полимерных компонентов отработанных солнечных панелей методом биотестирования // Сборник материалов X Научно-практической конференции с международным участием «Наука настоящего и будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб, том 2, 2022, С. 90-94
15. 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. №24(3). С. 211-220.
16. Цыганов И.В., Нестерова Л.Ю., Ткаченко А.Г. Скольжение бактерий: способ пассивного распространения без использования жгутиков и пилей(обзор) // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2018. №4. С. 263-274. doi:10.17072/1994-9952-2021-4-263-274
17. H.N. Mattingly, K. Kamino, B.B. Machta, T. Emonet. E. coli chemotaxis is information-limited// Nature physics. 2021. № 17. P. 1426–1431.

Авторы публикации

Манахова Полина Васильевна – студентка, Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-7773-5943>. caterpillar921@gmail.com.

Смирнов Андрей Владимирович – аспирант, Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6515-3460>. andreismirnov5000@gmail.com

Семенова Маргарита Игоревна – ассистент кафедры Инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия.. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6644-7663>. Smi-2409@yandex.ru.

Ковалевская Алла Станиславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры Инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского электротехнического университета

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9943-3508>. lelikat@yandex.ru.

References

1. R.R. Agishev, K.Kh. Gil'fanov. Vozmozhnosti ekologicheskogo monitoringa atmosfernogo vozdukhа vokrug predpriyatii teploenergetiki metodami lazernogo zondirovaniya// «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki». 2016. № 3-4. S. 95-96.
2. Lipant'ev R.E., Tutubalina V.P. Vliyanie szhiganiya sernistykh mazutov na okruzhayushchuyu sredy// «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki». 2017. № 19(5-6). S. 144-148.
3. Zvereva E.R., Makarova A.O., Bakhtiyarova Yu.V., Korolev V.I., Il'in N.P., Turanov A.N., Zueva O.S. Vtorichnoe ispol'zovanie malosernistykh neftnykh ostatkov v kachestve osnovy dlya kotel'nogo i sudovogo topliva// «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki». 2022. № 24(1). S. 16-28.
4. Ol'kova A.S.. Procedura vibora metoda biotestirovaniya v usloviyakh raznih vidov zagryazneniya// Transformatsiya ecosystem. 2022. №5(3). S. 63-75.
5. Ol'kova A.S. Razrabotka strategii biotestirovaniya vodnykh sred s uchetoм mnogofaktornosti otvetnykh reaktsii test-organizmov: dis. dok. bio. nauk. – Kirov.: 2020. – 359 s.
6. E.V. Bulycheva, E.I. Korotkova, O.A. Voronova, A.A. Kustova, E.V. Petrova. Fluorescence Analysis of E.coli Bacteria in Water// Procedia Chemistry. 2014. №10, P. 179-183.
7. Bioluminescent nanopaper for rapid screening of toxic substances / J. Liu, E. Morales-Narváez, J. Orozco [et al.] // Nano Research. 2018. № 11(1). P. 114-125.
8. Alvaro R. Lara, Karim E. Jaén, Olusegun Folarin and others. Effect of the oxygen transfer rate on oxygen-limited production of plasmid DNA by Escherichia coli // Biochemical Engineering Journal. 2019. doi: 10.1016/j.bej.2019.107303
9. Baez, A., Majdalani, N. & Shiloach, J. Production of recombinant protein by a novel oxygen-induced system in Escherichia coli. // Microbial Cell Factories. 2014. №13. doi: 10.1186/1475-2859-13-50
10. Byzova Yu.B. Dykhanie pochvennykh bespozvonochnykh. M.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2007, 328 s.
11. Cheremnih E.G., Simbireva E.I. Infuzorii probyut pischu// Hiimiya I schin'. 2009. №1(12). S. 28-34.
12. Tolstoi M.U., Shishelova T.I., Shestov R.A. Isledovaniya- rastvorimosti kisloroda// «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya himiya I biotekhnologiya». 2022. № 1(12). S. 86-90.
13. Yushin Yu.V., Podkopailo R.V., Petrova D.A., i dr. Obzor pitatel'nykh sred, ispol'zuemykh dlya kul'tivatsii rekombinantnoi Escherichia coli// Meditsina ekstremal'nykh situatsii. 2019. №3, S. 444-453.
14. Manakhova P.V., Kustov T.V., Semenova M.I., Maksimishina Yu.S. Osobennosti etapov probopodgotovki dlya issledovaniya polimernykh komponentov otrabotannykh solnechnykh panelei metodom biotestirovaniya// Sbornik materialov Kh Nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Nauka nastoyashchego i budushchego» dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. SPb, tom 2, 2022, S. 90-94
15. Semenova M.I., Smirnov A.V., Vezhenkova I.V., Kustov T.V., Kovalevskaya A.S. Osobennosti probopodgotovki vodnykh vytyazhek komponentov solnechnykh panelei v tselyakh biotestirovaniya// «Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki». 2022. №24(3). S. 211-220.
16. Ciganov I.V., Nestirova L.Yu., Tkachenko A.G. Skolschenie bakterii: sposob passivnogo rasprostraneniya bez ispol'zovaniya zhgucov I pilei(obzor) // Vestnik Permskogo universiteta. Ser. Biologiya. 2018. №4. S 263-274. doi:10.17072/1994-9952-2021-4-263-274
17. H.H. Mattingly, K. Kamino, B.B. Machta, T. Emonet. E. coli chemotaxis is information-limited// Nature physics. 2021. № 17. P. 1426–1431.

Authors of the publication

Polina V. Manakhova – Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-7773-5943>. caterpillar921@gmail.com.

Andrey V. Smirnov - Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6515-3460>. andreismirnov5000@gmail.com

Margarita I. Semenova – Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-

© Манахова П.В., Смирнов А.В., Семенова М.И., Ковалевская А.С.

Petersburg, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-6644-7663>. Smi-2409@yandex.ru.

Alla S. Kovalevskaya – Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9943-3508>. lellikat@yandex.ru.

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

Получено

08.11.2023 г.

Отредактировано

10.01.2024 г.

Принято

01.02.2024 г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.313

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-51-63

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ТАНКЕРА AION

Савенко А.Е., Габриэль И.В.

Керченский государственный морской технологический университет,
г. Керчь, Республика Крым, Россия
Savenko-70@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть вопрос автоматизации современных морских судов с высокой степенью их электрификации. Целью исследования является анализ электротехнического комплекса танкера AION для выяснения возможного возникновения нештатных явлений при параллельной работе генераторных установок и методов их устранения. *МЕТОДЫ.* В статье произведен анализ электротехнического комплекса и устройств автоматического управления танкера AION. Особое внимание уделено исследованию систем, обеспечивающих производство и распределение электрической энергии между потребителями. Отмечено широкое применение современных систем автоматического управления на базе компьютерной техники в судовой электростанции. Показаны обширные возможности управления судовой электроэнергетической установкой в различных ежедневных или аварийных ситуациях. Программное и аппаратное обеспечение судовой системы PMS позволяет сократить потребление топлива, масла и других важных ресурсов при помощи автоматического регулирования нагрузки на дизель-генераторы, задачи временных периодов подачи топлива в цилиндры, управлением выпускными и пусковыми клапанами. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получены экспериментальные осциллограммы исследований параллельной работы дизель генераторных установок, на которых зафиксированы обменные колебания мощности. Амплитуда обменных колебаний достигает 40% от установившегося значения, а их период составляет 600 – 800 мс в зависимости от режима работы судового электротехнического комплекса. Во время снятия этих осциллограмм включена судовая нагрузка и не производится пусков и остановов каких-либо мощных потребителей, то есть имеет место квазиустановившийся процесс. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложено внедрение в систему управления судовой электростанцией функции устранения обменных колебаний мощности. Для реализации необходимо добавить блок, получающий информацию со всех параллельно работающих дизель-генераторных установок, и адаптивно корректирующий настройки регуляторов частоты.

Ключевые слова: электротехнический комплекс; автоматизация; дизель-генератор; автоматическое управление; главный распределительный щит; аварийный распределительный щит; система контроля; обменные колебания мощности.

Для цитирования: Савенко А.Е., Габриэль И.В. исследование режимов работы электротехнического комплекса танкера AION // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 51-63. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-51-63.

STUDY OF OPERATING MODES OF THE AION TANKER ELECTRICAL POWER SYSTEM

Savenko AE., Gabriel IV.

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russia
Savenko-70@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the issue of automation of modern sea vessels with a high degree of electrification. The purpose of the study is to analyze the electrical power system of the AION tanker to determine the possible occurrence of abnormal phenomena during parallel operation of generator sets and methods for eliminating them. *METHODS.* The article analyzes the electrical power system and automatic control devices of the AION tanker. Particular attention is paid to the study of systems that ensure the production and distribution of electrical energy between consumers. The widespread use of modern computer-based automatic control systems in ship power plants has been noted. The extensive possibilities for controlling a ship's electrical power plant in various daily or emergency situations are shown. The software and hardware of the ship's Power Management System allows you to reduce the consumption of fuel, oil and other important resources by automatically regulating the load on diesel generators, timing the supply of fuel to the cylinders, and controlling exhaust and starting valves. *RESULTS.* Experimental oscillograms of studies of the parallel operation of diesel generator sets were obtained, in which power exchange oscillations were recorded. The amplitude of power exchange oscillations reaches 40% of the steady-state value, and their period is 600 - 800 ms, depending on the operating mode of the ship's electrical power system. During the collection of these oscillograms, the ship's load is turned on and no starts or stops of any powerful consumers are made, that is, a quasi-steady process takes place. *CONCLUSION.* It is proposed to introduce a function for eliminating power exchange oscillations into the ship power plant control system. To implement it, it is necessary to add a block that receives information from all parallel operating diesel generator sets and adaptively adjusts the settings of the frequency regulators.

Keywords: *electrical power system; automatization; diesel-generator; automatic control, main switchboard, emergency switchboard, control system, power exchange oscillations.*

For citation: Savenko AE., Gabriel IV. Study of operating modes of the aion tanker electrical power system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 51-63. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-51-63.

Введение (Introduction)

На сегодняшний день качество электрификации судов резко возросло, проведена широкая автоматизация систем управления судовыми механизмами и устройствами [1,2]. Будущее улучшение морского транспорта базируется на комплексной автоматизации, которая, прежде всего, происходит на основе развития электрификации судов [3,4]. Автоматизация судов — это процесс, в ходе которого задачи управления судном и его оборудованием, которые когда-то выполнялись человеком, направляют на приборы и технические устройства [5,6]. Автоматизация морских судов обеспечивает безопасность рейсов. Комплексная автоматизация судов сокращает численность экипажа на судне, облегчает работу персоналу судна, повышает производительность и качество труда, улучшает эксплуатационные показатели транспорта, сокращает шансы возникновения опасных аварийных ситуаций [7,8].

В современных условиях автоматизация судового электротехнического комплекса предполагает развитие систем управления, позволяющих повысить надежность и безотказность работы оборудования и судна в целом как во время движения в море, так и при стоянке в портах. При этом обязательно необходимо обеспечить возможность подготовки обслуживающего персонала для корректной эксплуатации и технического обслуживания вводимых разработанных систем автоматизации [9,10,11].

Морские суда обладают высокой степенью концентрации потребителей электрической энергии, мощность которых достигает десятков МВт. Электротехнические комплексы морских судов, даже без гребной электрической установки, имеют мощность сопоставимую с мощностью главной судовой энергетической установки [12,13]. Наиболее важным и сложным вопросом в организации качественной работы судового электротехнического комплекса является выбор типа, мощности и количества источников электрической энергии, а также систем автоматики, обеспечивающих их безотказную, надежную работу. Конструкторские инженерные решения определяют безопасность, целесообразность и экономическую эффективность при эксплуатации судового электротехнического комплекса, а значит всего судна, с находящимися на нем людьми и грузом [14,15]. Одним из наиболее важных направлений морского транспорта является танкерный флот. Морские суда такого типа наиболее часто осуществляют транспортировку опасных грузов. Специфика технологических операций танкерного флота заключается в необходимости надежной, бесперебойной и качественной работы судового электротехнического комплекса.

Целью исследования является анализ электротехнического комплекса танкера AION для выяснения возможного возникновения нештатных явлений при параллельной работе генераторных установок и методов их устранения.

Материалы и методы (Materials and methods)

Судно танкер AION предназначено для транспортировки сырой нефти, зарегистрировано под флагом Панама и было построено в 2009 году. Судовладельцем на текущее время является LARISA LINES INC. Класс автоматизации судна A1. Танкер оснащен главным двигателем, фирмы HYUNDAI - B&W 7S60MC-C МК-7 мощностью 15820 кВт и турбонагнетателем MITSUBISHI-HYUNDAI MET83MA. Двигатель соединен с валом, на котором расположен винт фиксированного шага. Также на судне установлены три дизель-генератора фирмы HMMSEN-HHI типа 5H21/32 и один аварийный дизель-генератор фирмы CUMMINS типа STX NT855-DMGE. Основная информация о судне танкере AION представлена в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Основная информация о судне
Basic information about the vessel

Флаг	Панама
Порт приписки	Панама
Номер IMO	9417464
Тип судна	Танкер
Наибольшая длина	244 м
Ширина	42 м
Высота борта	21 м
Полная грузоподъемность	54300 т
Чистая грузоподъемность	33014 т
Дедвейт	58918 т
Осадка	15 м
Номинальная скорость	21 уз.

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

Электротехнический комплекс судна — это все электротехнические устройства, которые выполняют функции производства, преобразования и распределения электроэнергии, предназначенные для питания судовых потребителей электроэнергии. Отличительной особенностью электротехнического комплекса судна является система ACONIS-2000 для полной автоматизации распределения электроэнергии, которая обеспечивает контроль оборудования судовой электростанции с пульта управления в машинном отделении или с мостика. Система также имеет отдельную подсистему аварийной сигнализации с консолями в каждом ключевом помещении судна.

Вид консоли аварийной сигнализации показан на рисунке 1.



Рис. 1. Вид консоли аварийной сигнализации Fig. 1. View of the alarm signaling console

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

В центральном посту управления судовой энергетической установкой расположен пост управления двигателем на компьютерной основе и дублирующий его пост, если первый выйдет из строя. Вид постов управления на компьютерной основе представлен на рисунке 2. Пост управления связан с другими системами автоматики, такими как система АПС и система дистанционного управления двигателем с мостика, с помощью интерфейсных блоков.

Интерфейсные блоки обладают следующими основными возможностями:

- обеспечивают связь с системой защиты двигателя и контроля его параметров;
- выполняют регулирование частоты вращения дизеля;
- контролируют запуск дизелей в работу и вывод из нее;
- управляют периодичностью подачи топлива в цилиндры дизельных двигателей;
- координируют закрытие и открытие выпускных и впускных клапанов дизелей;
- ведут управление функционированием судовых систем и вспомогательного оборудования;

Электроэнергетическая система может эксплуатироваться в нескольких режимах:

- осуществление местного и ручного управления;
- запуск резервного дизель-генератора;
- полуавтоматический режим Power Management System (PMS);
- автоматический режим Power Management System (PMS).

В режиме местного управления PMS не берет на себя функции управления

генераторной установкой, при этом дизель-генератор управляется местно, а автоматические воздушные выключатели управляются с главного распределительного щита. В режиме ручного управления можно запустить и остановить дизель-генератор, но синхронизация и другие функции недоступны. Управление автоматическими воздушными выключателями производится с главного распределительного щита.

В режиме пуска резервного дизель-генератора в случае выхода из строя основного он управляется дистанционно, а воздушные выключатели автоматически. Дизель-генератор можно запустить или остановить, а в случае обесточивания автоматически запустится резервный дизель-генератор и подключается к главному распределительному щиту.



Рис. 2 — Вид постов управления на компьютерной основе Fig. 2 - Computer-based view of control posts

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

В полуавтоматическом режиме оператор может управлять работой генераторных установок с помощью ACONIS-2000 PMS. Когда оператор дает команду к запуску дизель-генератора воздушный выключатель автоматически срабатывает в нужное время под управлением PMS. При синхронизации генератора с главным распределительным щитом частота вводимого генератора изменяется в пределах немного выше частоты уже работающего генератора, чтобы не возникал режим обратной мощности. После подключения выполняется контроль частоты и распределяется нагрузка между генераторами.

В автоматическом режиме PMS, кроме вышеописанного, сама выполняет контроль частоты и распределяет нагрузку между генераторами. Однако, не предусмотрена возможность контроля стабильности амплитуды напряжения и устранения обменных колебаний мощности (ОКМ) [6].

Имеется низковольтный щит питания, который обеспечивает питанием навигационное оборудование рубки и аварийное освещение, расположенный на верхней палубе.

Главный распределительный щит находится в центральном посту управления и состоит из следующий секций:

- три генераторные секции;
 - двух «GROUP STARTER PANEL» для потребителей на левый и правый борт;
 - двух «AC 440V FEEDER PANEL» для щитов потребителей;
 - одной секции «AC 220V FEEDER PANEL»;
 - секция обрыва связи главного распределительного щита левого и правого борта;
- Вид секций распределительного щита показан на рисунке 3.



Рисунок 3 – Вид секции «GROUP STARTER PANEL» для потребителей на левый борт и «AC 440V FEEDER PANEL»

Figure 3 - View of the "GROUP STARTER PANEL" section for port side customers and "AC 440V FEEDER PANEL" section

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Основные характеристики генераторов представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Основные характеристики генераторов Main characteristics of generators	
Тип	5H21/32
Генерируемое напряжение	450 В
Вырабатываемый ток	1363 А
Частота	60 Гц
Вырабатываемая мощность	920 кВт
Коэффициент мощности	0,8 о.е.
Скорость вращения	900 об/мин
Количество полюсов	8 шт

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Для обеспечения электроэнергией на судне установлено три дизель-генератора фирмы HIMSEN-HHI типа 5H21/32 мощностью 920 кВт каждый, которые находятся в кормовой части судна в машинном отделении. Они снабжают энергией главный распределительный щит, а тот в свою очередь потребители всего судна. Также на судне установлен аварийный дизель-генератор фирмы CUMMINS типа STX NT855-DMGE мощностью 313 кВт и расположен на главной палубе в кормовой части судна, по левому борту в специальном помещении с аварийным распределительным щитом (АРИЩ).

Аварийный распределительный щит состоит из следующих секций:

- питание с берега;
- секция аварийного дизель-генератора;
- секция «AC 440V FEEDER PANEL»;
- секция «AC 220V FEEDER PANEL»;

Вид секций аварийного распределительного щита представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Вид секций аварийного распределительного щита

Fig. 4. View of emergency switchboard sections

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Структурой аварийного распределительного щита предусмотрена панель питания с берега, с помощью которой осуществляется прием электроэнергии на главный распределительный щит от береговых электростанций. Аварийный дизель-генератор запускается автоматически при исчезновении напряжения основной судовой сети при помощи системы контроля ACONIS-2000 PMS. Помимо этого, предусмотрен пуск аварийного дизель-генератора посредством электрического стартерного устройства с собственной аккумуляторной батареей и ручное пусковое устройство.

Вид контрольной панели аварийного дизель-генератора представлен на рисунке 5.

Необходимо отметить, что аварийный дизель-генератор не предназначен для снабжения электрической энергией топливных грузовых насосов и большинства потребителей электрической энергии на судне.



Рис. 5. Вид контрольной панели аварийного дизель-генератора

Fig. 5. View of the control panel of the emergency diesel generator

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Основные данные аварийного дизель-генератора приведены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Параметры аварийного дизель-генератора

Parameters of emergency diesel generator

Тип	STX NT855-DMGE
Генерируемое напряжение	450 В
Вырабатываемый ток	401 А
Частота	60 Гц
Вырабатываемая мощность	313 кВт
Коэффициент мощности	0,8 о.е.
Скорость вращения	1800 об/мин
Количество полюсов	8 шт

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Мощность аварийного дизель-генератора достаточна, чтобы питать все потребители, работа которых требуется для безопасности плавания в случае аварии, таких как:

- сигнально отличительные огни;
- аварийное освещение;
- систем сигнализации обнаружения пожара;
- звукосигнальных средств;
- средств внутрисудовой связи;
- радионавигационного оборудования;
- пожарных насосов;
- рулевого привода;
- освещение мест посадки в спасательные средства.

Результаты (Results)

Электротехнический комплекс танкера AION обладает примечательными решениями в области электроэнергетики и автоматизации. Система ACONIS-2000, выполняющая функции полной автоматизации распределения электроэнергии, обеспечивает контроль оборудования судовой электростанции в машинном отделении

или с мостика, имеющая отдельную подсистему аварийной сигнализации, обеспечивает управление всеми аспектами электроэнергетики судна. Благодаря автоматизации управление электроэнергетикой и оборудованием не является сложной задачей, условия труда для рабочего персонала судна становятся более комфортными, кроме того, сокращаются риски возникновения аварийных ситуаций за счет системы безопасности.

Программное и аппаратное обеспечение судовой системы PMS позволяет сократить потребление топлива, масла и других важных ресурсов при помощи автоматического регулирования нагрузки на дизель-генераторы, задачи временных периодов подачи топлива в цилиндры, управлением выпускными и пусковыми клапанами. Регулирование частоты вращения дизеля, его пуска и остановки, а также управление вспомогательным оборудованием позволяет сократить износ и продлить срок службы оборудования.

Вместе с тем при совместно-параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов при помощи цифрового осциллографа зафиксировано наличие обменных колебаний мощности [12,13] (рис. 6,7). Такие колебания могут возникать как при параллельной работе любых двух основных дизель-генераторных агрегатов, так и при одновременной работе всех трех дизель-генераторных агрегатов. На рисунках 6,7 представлены осциллограммы, полученные двухканальным цифровым осциллографом.

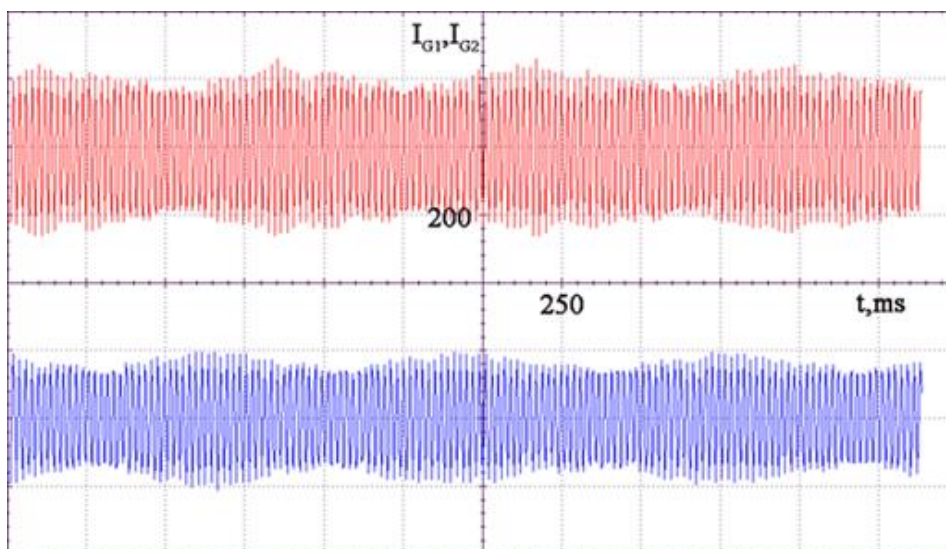


Рис. 6. Осциллограммы токов при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса (режим 1)

Fig. 6. Oscillograms of currents at joint-parallel operation of generators of ship electrical complex (mode 1)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Таким образом существующая система Power Management System не обладает способностью поддерживать постоянство распределения нагрузки при встречно-параллельной работе судовых дизель-генераторных установок. В связи с этим проявляется влияние наличия люфтов в регуляторах частоты, которое проявляется возникновением обменных колебаний мощности. Такие колебания крайне негативно сказываются на работе систем судовой автоматики и электрооборудования, то есть ухудшают надежность и безотказность всего судового электротехнического комплекса танкера. Исследования показали, что амплитуда обменных колебаний мощности зависит от величины люфта регуляторов и практически не зависит от нагрузки генераторных установок. Наиболее отчетливо колебания проявляются в квазиустановившихся режимах, когда генераторные установки прошли процесс синхронизации и распределения нагрузки.

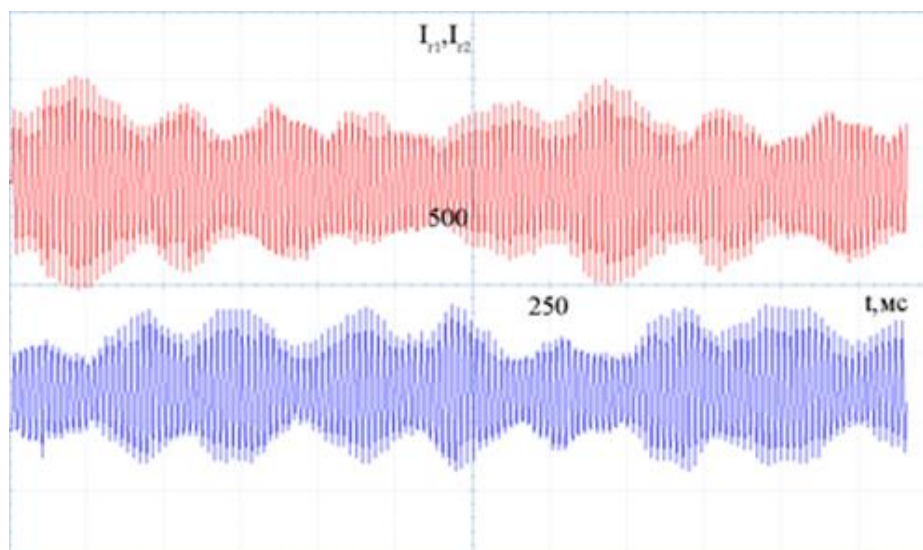


Рис. 7. Осциллограммы токов при совместно-параллельной работе генераторов судового электротехнического комплекса (режим 2) *Fig. 7. Oscillograms of currents at joint-parallel operation of generators of ship electrical complex (mode 2)*

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

Обсуждение (Discussion)

На осциллограммах отчетливо наблюдается нестабильность амплитуд токов параллельно работающим генераторным установкам. Изменения носят синусоидальный характер с периодом 600 – 800 мс в зависимости от режима работы судового электротехнического комплекса, при этом амплитуда ОКМ имеет значения до 40% от установившихся значений. При этом изменения амплитуды колебаний у двух параллельно работающих генераторов носят зеркальный характер, увеличение и уменьшение амплитуд происходят в противоположных направлениях. Это говорит о существовании значительных обменных колебаний мощности, при которых без изменения нагрузки судовой электростанции и каких-либо управляющих воздействий, мощность самопроизвольно осуществляет переток между генераторными установками.

Амплитуда обменных колебаний мощности не должна превышать 1 %, только в этом случае электротехнический комплекс не будет подвержен их негативному влиянию. Проведенные исследования показали, что избавиться от ОКМ полностью практически невозможно ввиду наличия люфтов регуляторов частоты. Однако уменьшить их амплитуду можно используя метод адаптивного изменения настройки коэффициентов передачи регуляторов частоты дизель-генераторных агрегатов. Для реализации этого метода необходимо внедрение в состав судового электротехнического комплекса дополнительного блока устранения обменных колебаний мощности УОКМ (рис. 8). Такой блок может быть дополнен в существующую судовую электростанцию путем дополнительного программирования и установки информационных и управляющих каналов и линий электрических сигналов. Для танкера Aion такая установка такого блока не представляет значительных трудностей, так как он оснащен полностью компьютеризированной системой управления судовой электростанцией.

Также необходимо отметить, что установка и работа блока УОКМ не нарушает требований Морского Регистра и международной морской конвенции по безопасности морских судов *Solas*. Напротив, наличие такой системы управления обеспечит безопасную работу танкера, в том числе и при работе топливных насосов от судовых генераторов при выполнении грузовых операций, так как исключит обесточивание судна из-за неконтролируемого уровня амплитуд обменных колебаний мощности.

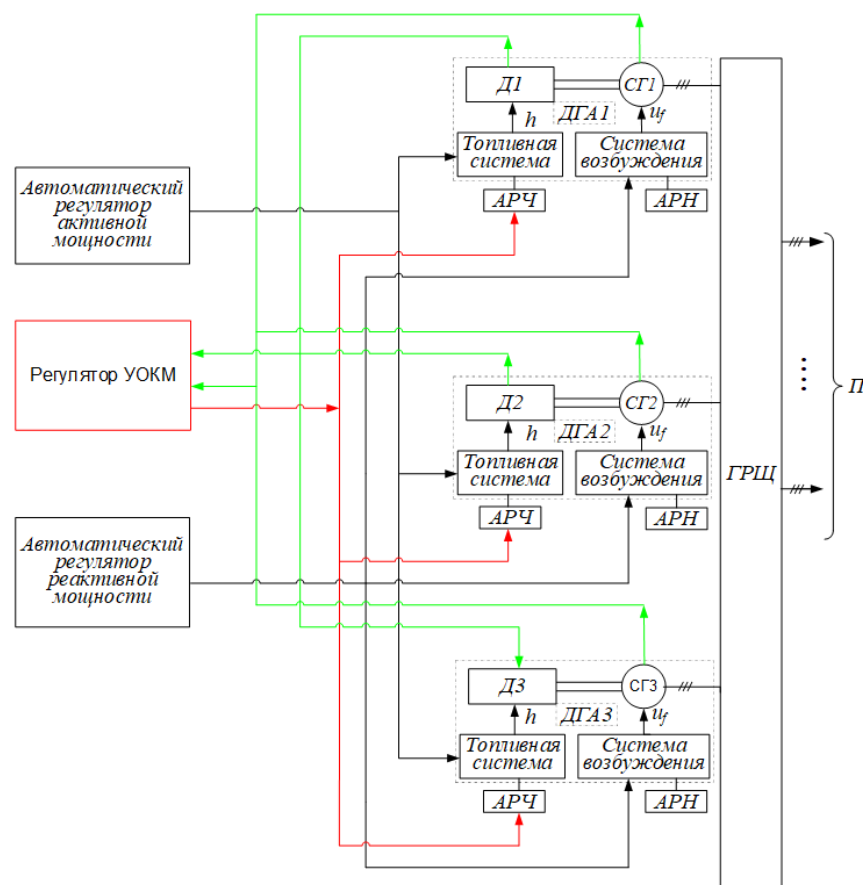


Рис. 8. Судовой электротехнический комплекс с блоком УОКМ Fig.8. Main electrical complex with EPEO unit

Заключение (Conclusions)

Несколько режимов эксплуатации электроэнергетической системы при помощи автоматической системы PMS дают обширные возможности управления судовой электроэнергетической установкой в различных ежедневных или аварийных ситуациях. Полуавтоматический и автоматический режимы позволяют сократить время включения в работу дополнительных дизель-генераторов на параллельную работу, запуска аварийного дизель-генератора, контроля частоты и распределения нагрузки, тем самым позволяя оператору и команде машинного отделения сосредоточиться на устранении неисправностей или действовать в условиях аварийной ситуации. Для совершенствования эффективности работы электротехнического комплекса необходимо интегрировать в его систему управления функцию устранения обменных колебаний мощности.

Литература

1. 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.
2. 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.

3. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices . International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
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. Авдеев, Б. А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов. Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99-113.
8. 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.
9. 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.
10. Грачева Е.И., Алимова А.Н., Абдуллазянов Р.Э. Анализ и способы расчета потерь активной мощности и электроэнергии в низковольтных цеховых сетях. Вестник КГЭУ.2018;4(40):53-65.
11. Мещеряков В.Н., Черкасова В.С., Мещерякова О.В. Коррекция системы векторного управления асинхронным электроприводом / Системы управления и информационные технологии, 2015. №3(61). С. 36-38.
12. 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.
13. Савенко А.Е., Савенко П.С. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46-54.
14. 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.
15. Алейников А.В., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Разработка уточненной математической модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для расчетов в реальном времени // Вестник ИГЭУ. – 2017. – №. 5. – С. 37-43.

Авторы публикации

Савенко Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры Электрооборудования судов и автоматизации производства Керченского государственного морского технологического университета. E-mail: Savenko-70@mail.ru.

Габриэль Игорь Владимирович - курсант 5-го курса, Керченского государственного морского технологического университета.

References

1. 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 tehnikeskogo universiteta , 2021, № 3. С. 93–100.
2. 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.

3. Gracheva E. I., Alimova A.N. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2019. 361-367.
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. Avdeyev B. A. Intelligent energy-efficient systems of marine vessels. Bulletin of the Kerch State Maritime Technological University, 2021; 4: 99-113.
8. 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.
9. 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.
10. Gracheva E.I., Alimova A.N., Abdullazjanov R.Je. Analiz i sposoby rascheta poter' aktivnoj moshhnosti i jelektroenergii v nizkovol'tnyh cehovyh setjah. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta. 2018;4(40):53–65.
11. Meshherjakov VN, Cherkasova VS, Meshherjakova OV. Korrekciya sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym jelektroprivodom. Sistemy upravlenija iinformacionny etehnologii. 2015;3(61): 36-38.
12. 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.
13. Savenko A.E, Savenko P.S. Influence of backlash on amplitude of exchange power fluctuations in autonomous electric power equipment. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(5-6):46-54.
14. 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.
15. Aleynikov A.V, Golubev A.N, Martynov V.A. Development of a mathematical model of synchronous permanent magnet motor for real-time calculations. Vestnik IGEU. 2017;5:37- 43.

Authors of the publication

Alexandr E. Savenko - Kerch State Maritime Technological University.

Igor V. Gabriel - Kerch State Maritime Technological University.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы.

Получено **17.01.2024 г.**

Отредактировано **19.01.2024 г.**

Принято **21.02.2024 г.**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-64-76

АНСАМБЛЕВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Русина А.Г., Осгонбаатар Тувшин, Матренин П.В., Сергеев Н.Н.

Новосибирский Государственный Технический Университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме: Применение возобновляемых источников энергии является перспективным путем снижения вредных выбросов в процессе производства энергии и решения проблемы ухудшения экологической ситуации. Несмотря на то, что возобновляемая энергия считается чистой энергией, которую также называют «зеленой» энергией, вопрос ее использования в энергосистеме вызывает определенные трудности. Эффективное использование возобновляемых источников энергии требует актуальной информации о первичных энергоносителях, что особенно важно при крупномасштабной интеграции возобновляемых источников в систему. Таким образом, для обеспечения нормальных режимов работы энергосистемы необходимо прогнозировать выработку возобновляемых источников с допустимой погрешностью. **ЦЕЛЬ.** Прогнозирование суточного графика выработки ветровых электростанций. **МЕТОДЫ.** В работе использовались ансамблевые алгоритмы, основанные на деревьях решений и являющиеся одним из подходов машинного обучения. Программная реализация выполнена с помощью языка программирования Python. В качестве исходных данных использованы данные о скорости ветра и выработке определенных электростанций за период 2019-2021 гг. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** С помощью предложенной методики был составлен прогноз суточных графиков выработки трех ветровых электростанций с погрешностью от 2,4 до 3,5 МВт или от 5,0 до 7,0 % установленной мощности соответствующих ветровых электростанций. Нормализованная средняя ошибка по модулю в процентах составила от 12,3 до 13,3 %. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Ансамблевые методы машинного обучения позволяют обнаруживать нелинейные и нестационарные зависимости во временных рядах, а также могут быть реализованы в задаче прогнозирования суточного графика выработки ветроустановок. Повышение точности прогнозирования выработки ветроустановок имеет высокую значимость для эффективного функционирования и планирования режимов энергосистемы.

Ключевые слова: прогнозирование; выработка; скорость ветра; ансамблевый метод; ветровая электростанция.

Для цитирования: Русина А.Г., Осгонбаатар Тувшин, Матренин П.В., Сергеев Н.Н. Ансамблевая модель для прогнозирования выработки ветровых электростанций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 64-76. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-64-76.

ENSEMBLE MACHINE LEARNING MODEL FOR FORECASTING WIND FARM GENERATION

Rusina AG., Osgonbaatar Tuvshin, Matrenin PV., Sergeev NN.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The use of renewable energy sources is the only way to avoid emissions from energy production and to decide pollution of ecology. Despite the fact that renewable energy has become clean energy, which called green energy, the issue of using it is quite difficult for the control and regulate the energy system. Efficient use of renewable energy requires information on primary sources. If looking case of large-scale integration, this requirement will be significantly felt. Thus, to ensure the normal operating modes of the energy system, it is necessary to predict the

generation of renewable sources with an acceptable error. **PURPOSE.** To forecast the generation of wind farms. **METHODS.** This study is carried out by ensemble algorithms, such as Random Forest, AdaBoost and XGBoost, which are one of the machine learning approaches. The software implementation is made using the Python programming language. As initial inputs historical data on windspeed and generating of some windfarms in Mongolia by 2019-2021 were used. **RESULTS.** The proposed method predicted daily production schedules at three wind farms with an error of 2.4 to 3.4 MW or 5.0 to 7.0 percent of the installed capacity of the corresponding wind farm. Also, normalized MAE was 12,3 to 13.3 percent. **CONCLUSIONS.** Ensemble methods of machine learning made it possible to determine non-linear and non-stationary dependencies of the time series, and also can be implemented in the problem of predicting the daily production schedule. Increasing the accuracy of wind energy forecasting will affect positively the operation and planning of the power systems.

Keywords: forecasting; generate; windspeed; ensemble method; wind farm.

For citation: Rusina AG., Osgonbaatar Tuvshin, Matrenin PV., Sergeev NN. Ensemble machine learning model for forecasting wind farm generation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 64-76. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-64-76.

Введение (Introduction)

В настоящее время ресурсы традиционной энергетики значительно сокращаются и из-за их чрезмерного использования резко ухудшается состояние окружающей среды. Таким образом, возобновляемая энергия становится перспективным альтернативным источником электроэнергии, которая дает возможность снизить вредные выбросы от производства энергии. Основной целью производства электроэнергии с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является снижение зависимости от ископаемого топлива, применение которого оказывает негативное воздействие на окружающую среду. Однако использование ВИЭ приводит к экономическим и техническим проблемам, в число которых входит усложнение процессов управления режимами, планирования электрической сети и функционирования оптового рынка электроэнергии. Задача обеспечения баланса генерируемой и потребляемой электроэнергии требует особого внимания при внедрении ВИЭ-генерации в систему. Растущая интеграция ВИЭ увеличивает нестабильность баланса мощности энергосистемы, поскольку появляется дополнительная неопределенность на стороне производства электроэнергии. Следовательно, точное прогнозирование выработки ВИЭ играет важную роль в обеспечении непрерывного функционирования энергосистемы.

На данный момент энергия ветра широко используется как один из ключевых ресурсов возобновляемой энергии, и ее доля на рынке электроэнергии стремительно растет во всем мире. С другой стороны, объем электроэнергии, вырабатываемой ветровой электростанцией, сильно меняется в зависимости от колебаний ветра и его направления на рассматриваемой территории. Факторы, которые часто влияют на выработку, включают метеорологические условия, турбулентность ветра, расположение электростанции, сезонность и т.д. [1,2]. Прогнозирование скорости и направления ветра достаточно сильно затруднено из-за его резко переменного и стохастического характера изменения с течением времени [3].

В центральной энергосистеме Монголии функционируют 3 ветровые электростанции с установленной мощностью от 50 МВт до 55 МВт, расположенные в различных регионах страны. Общая установленная мощность данной энергосистемы составляет 1488 МВт, из которых 245 МВт вырабатывается за счет ВИЭ, в том числе 155 МВт – ветровыми электростанциями. Также правительством была поставлена цель увеличить объем мощности возобновляемых источников на 20 % к 2023 году и на 30 % к 2030 году для сокращения выбросов парниковых газов, связанных с энергетикой [4]. Видно, что ВИЭ, в частности энергия ветра, играют важную роль в производстве электроэнергии в Монголии. Иными словами, существует значительное влияние ВИЭ на функционирование энергосистемы, а также имеется вышеупомянутая необходимость прогнозирования их выработки с допустимой погрешностью. На данный момент при планировании режимов работы центральной энергосистемы на суточном интервале требуется совершенствование методики прогнозирования выработки ВИЭ.

Целью исследования является разработка алгоритмов прогнозирования суточного графика выработки ветровых электростанций. Практическая значимость исследования

заключается в снижении влияния неопределенности и случайного характера изменения ветра как первичного энергоносителя на функционирование энергосистемы и планирование ее режимов.

Литературный обзор (Literary review)

Имеется ряд публикаций, посвященных решению задач краткосрочного прогнозирования скорости ветра и выработки электроэнергии ветроустановок. В работах [5-8] предложенные методы разделены на физические, статистические и гибридные или ансамблевые.

Было установлено, что применение физических методов является одним из лучших подходов к долгосрочному прогнозированию. Эти методы используют метеорологические и физические данные, в том числе скорость ветра, температуру, давление и влажность наружного воздуха для создания математических моделей высокой сложности. В связи со сложностью определения метеорологической информации на близкие непродолжительные периоды времени, данные подходы не подходят для решения задачи краткосрочного прогнозирования. В целом, физические методы основаны на численном прогнозе погоды для расчета выработки ветровых электростанций [7].

Главное преимущество статистических методов заключается в том, что они не требуют физических данных для построения модели прогнозирования. Данные методы рассматривают линейную и нелинейную зависимость между исходными переменными временного ряда. Линейные модели обычно отслеживают устойчивое поведение ветра с помощью методов авторегрессии, включая *ARIMA*, *ARMA* и другие [9]. При прогнозировании скорости ветра в случае нелинейности и нестационарности рассматриваемого временного ряда применяются методы искусственного интеллекта, такие как нейронные сети [10], метод опорных векторов [11], нечеткая логика [12] и другие методы машинного обучения. В основном статистические методы используются для построения моделей краткосрочного прогнозирования [13].

Физические и статистические модели имеют свои характеристики и зачастую не могут полностью описать сложную закономерность временного ряда характеристик ветра, если они используются по отдельности. Применение ансамблевых методов, объединяющих несколько алгоритмов, является эффективным способом повышения достоверности одиночных моделей машинного обучения и других методов. Ниже приведены примеры исследований, направленных на решение рассматриваемой задачи.

В работе [14] авторы предложили ансамблевый метод, включающий алгоритм адаптивного бустинга (*AdaBoost*) для моделирования временных рядов скорости ветра и метод опорных векторов для преобразования скорости ветра в выработку ветровой электростанции. Предлагаемый метод был реализован на семи ветровых электростанциях и показал достаточную точность прогнозирования.

Т. Peng и др. [15] разработали методику многоступенчатого прогнозирования скорости ветра с использованием ансамблевого алгоритма. В качестве исходных данных они использовали данные о скорости ветра с 10-минутными интервалами за весь 2018 год. Исходные данные были разделены по сезонности с помощью метода опорных векторов, а выработка электроэнергии за каждый сезон была рассчитана с использованием нейронных сетей.

В работе [16] показано применение ансамблевого метода для прогнозирования скорости ветра. Модель была построена с использованием вейвлет-пакетной декомпозиции, нейронных сетей и алгоритма бустинга. Полученная ансамблевая модель дала более точный результат по сравнению с одиночными моделями.

L. Wang с соавторами [17] сравнили результаты статистических методов и ансамблевого метода. В работе доказано, что адаптивный бустинг может применяться для прогнозирования скорости ветра с достаточной точностью.

В работе [18] гибридные методы, основанные на экстремальном градиентном бустинге (*XGBoost*), адаптивном бустинге и нейронных сетях, используются для прогнозирования почасовой скорости ветра.

В работе [19] авторы спрогнозировали скорость ветра используя ансамблевый метод, включающий методы опорных векторов и вейвлет-преобразования. Первичные данные временного ряда были декомпозированы с помощью вейвлет-преобразования, а модель прогнозирования была построена с помощью алгоритма опорных векторов путем обучения на этих декомпозированных данных.

Область применения ансамблевых моделей машинного обучения достаточно широкая. Вышеуказанные работы доказывают преимущества и возможности применения ансамблевых методов для построения многофакторной модели, соответствующей

стохастическому временному ряду. В данной работе предлагаются методы прогнозирования скорости ветра, основанные на алгоритмах деревьев решений [20], в том числе случайный лес [21,22], адаптивный бустинг [23], экстремальный градиентный бустинг [24]. В качестве исходных данных были использованы временные ряды скорости ветра и генерации за период 2019–2021 гг. на трех ветровых электростанциях, расположенных в различных регионах Монголии.

Методы исследования (Research Methods)

Дерево решения.

Дерево решения [20] представляет собой набор узлов и ветвей, построенных по иерархической архитектуре без цикла. Каждый узел выполняет функцию регрессии или классификации по одному признаку, которая применяется к исходным данным. Решение каждого узла передается ветвями к следующим узлам. Окончательные узлы (листовые) дают результат классификации или регрессии. Рассмотрим определенный временной ряд, выражающийся следующим образом:

$$S_n = \{(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$$

где X – исходные векторы, содержащие функции $f(X)$; Y – выходные скаляры или метки; S_n – исследуемые выборки временного ряда (X_n, Y_n) с номером наблюдения n .

Для разработки алгоритма необходимо разделить данные на обучающую и тестовую выборки. После обучения на данных алгоритм будет построен на основе модели, которая вычисляет зависимости между соответствующими переменными. Иными словами, в конце процесса обучения алгоритм выдает функцию $\hat{h}(X, S_n)$ модели временного ряда. На основе принципа деревьев решений разработаны некоторые ансамблевые алгоритмы для построения моделей регрессии и классификации, которые рассмотрены ниже.

Случайный лес.

Случайный лес – ансамблевый алгоритм, разработанный Брейменом [21]. Данный алгоритм является одним из ансамблевых методов, основанных на применении деревьев решений. На рисунке 1 показана структура алгоритма случайного леса.

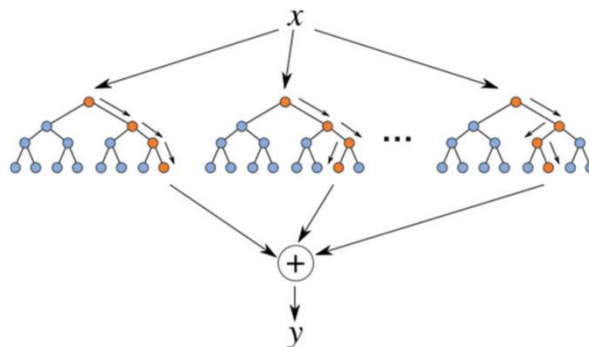


Рис. 1. Структура алгоритма случайного леса [22]

Fig. 1. Structure of the Random Forest algorithm [22]

Суть алгоритма случайного леса заключается в том, что выборки размером n из обучающего временного ряда S_n выбираются случайным образом и размещаются в узлах деревьев решений. На каждом дереве проводится регрессионный анализ и классификации случайных выборок и выводятся их модели, которыми выражаются зависимости между случайными переменными. В конце анализа каждое дерево дает выходную функцию $\hat{h}(X, S_n)$. Агрегирование результатов путем усреднения выходных функций в конечном итоге дает модель случайного леса:

$$\hat{Y} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \hat{h}(X, S_n^i)$$

где S_n^i – i -ая случайная выборка; q – число деревьев решений.

Кроме алгоритма случайного леса, еще одним методом повышения качества моделирования является бустинг (boosting), основная идея которого заключается в итеративном процессе построения ансамблевых моделей.

Адаптивный бустинг.

Адаптивный бустинг (AdaBoost) – алгоритм, который объединяет несколько слабых предикторов для создания сильного предиктора [23]. Слабыми предикторами в данном случае считаются отдельные регрессионные деревья.

В данном алгоритме выходу каждого слабого предиктора присваивается коэффициент, рассчитанный с учетом ошибок на предыдущих итерациях. В процессе

обучения алгоритма, весовые коэффициенты слабых предикторов получают большое значение в случае высокой погрешности и меньшее значение при низкой погрешности. Затем алгоритм снова обучается на основе обновленных весовых коэффициентов, чтобы улучшить прогнозируемый результат. Такой итерационный процесс продолжается до тех пор, пока все весовые коэффициенты не будут минимизированы. Процесс обучения алгоритма осуществляется в следующей последовательности. Предположим, что существует следующий набор выборок.

$$S = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, N\}. D_{q(i)}$$

где x_i – исходные переменные, y_i – выходные переменные, i – номер элемента выборки, $q = 1, 2, \dots, Q$ – номер итерации, D – весовые коэффициенты.

На первой итерации первичный весовой коэффициент определяется как

$$D_{1(i)} = 1/N$$

где N – количество элементов выборки набора S_n .

На основе весовых коэффициентов строится модель прогнозирования $\widehat{h}_q(x_i)$, а затем вычисляется погрешность модели:

$$e_{q(i)} = |\widehat{h}_q(x_i) - y_i|, e_{q(i)} \in [0, 1]$$

где $e_{q(i)}$ – погрешность i -ого элемента выборки на q -ой итерации, y_i – фактическое значение целевой переменной i -ого элемента выборки.

Далее алгоритм вычисляет пропорциональную ошибку ε_q на каждой итерации по следующему выражению:

$$\varepsilon_q = \sum_{i=1}^N D_{q(i)} e_{q(i)}$$

где $e_{q(i)}$ – погрешность, $D_{q(i)}$ – распределение весов i -ого элемента выборки на q -ой итерации.

Следующим шагом является расчет весовых коэффициентов на каждой итерации:

$$w_q = 1/2 \log(1/\beta_q), \quad \text{при} \quad \beta_q = \varepsilon_q / (1 - \varepsilon_q)$$

где w_q – весовой коэффициент.

Затем необходимо обновить распределение весов, установленное на предыдущих итерациях:

$$D_{q+1,i} = (D_{q,i} * \beta_q^{-\varepsilon_q}) / V_{q+1}, \quad \text{при} \quad V_{q+1} = \sum_{i=1}^N D_{q+1,i}$$

где $D_{q+1,i}$ – новое распределение весов i -ого элемента выборки на $(q + 1)$ -ой итерации.

После итерации Q строится итоговая модель алгоритма адаптивного бустинга, которая выражается следующим образом:

$$\widehat{Y}' = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q w_q \widehat{h}_q(x)$$

где $\widehat{Y}'$ – выходная функция алгоритма.

С точки зрения структуры алгоритм бустинга, как и алгоритм случайного леса, заключается в том, что алгоритм объединяет несколько деревьев решений, называемых слабыми предикторами, для создания сильного предиктора. Отличие от случайного леса в том, что каждая последующая модель данного алгоритма стремится исправить ошибки, допущенные на предыдущей итерации. В итоге в зависимости от распределения весовых коэффициентов не все деревья участвуют в процессе принятия окончательного решения: деревья решений, часто допускающие ошибки, оказывают меньшее влияние на параметры выходной функции алгоритма.

Экстремальный бустинг.

Экстремальный бустинг (XGBoost) – один из самых распространенных алгоритмов ансамблевых методов, который основан на методе градиентного спуска [24]. Данный алгоритм имеет несколько отличий от предыдущих алгоритмов и учитывает отличие прогнозируемых значений от фактических. Целью алгоритма является минимизация погрешности с помощью градиентного спуска. Экстремальный бустинг можно рассматривать как модель, состоящую из Q деревьев решений. Предположим, что существует следующий набор выборок:

$$S = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, N\}$$

где x_i – исходные переменные, y_i – выходные переменные, i – номер элемента выборки.

Поскольку принцип алгоритма экстремального бустинга заключается в минимизации погрешности, необходимо определить целевую функцию, или функцию потерь:

$$L(y_i, \gamma) = \frac{1}{2} (y_i - \gamma)^2, \quad i = (1, 2, \dots, n)$$

где $L(y_i, \gamma)$ – функция потерь, определяющая отклонение прогнозируемых γ от фактических y_i значений, i – номер элемента выборки.

В начале процесса обучения необходимо определить начальное прогнозируемое значение следующим выражением:

$$\hat{h}_0(x) = \operatorname{argmin}_{\gamma} \sum_{i=1}^N L(y_i, \gamma)$$

где $\hat{h}_0(x)$ – начальное прогнозируемое значение.

В этом случае начальное значение $\hat{h}_0(x)$ равно среднему значению всех фактических y_i значений. То есть с этого значения начинается итерационный процесс в следующей последовательности.

1.Вычисление остатков:

$$r_{iq} = - \left[\frac{\partial L(y_i, \hat{h}(x_i))}{\partial \hat{h}(x_i)} \right]_{\hat{h}(x) = \hat{h}_{q-1}(x)}, \quad q = (1, 2, \dots, Q)$$

где q – номер дерева, r_{iq} – остатка i -ого элемента выборки на q -м дереве, y_i – фактическое значение i -ого элемента выборки, $\hat{h}(x_i)$ – прогнозируемое значение i -ого элемента выборки.

2.Повторное обучение на основе остатков r_{iq} .

3.Определение значений в конечных узлах деревьев решений:

$$\gamma_{jq} = \operatorname{argmin}_{\gamma} \sum_{x_i \in R_{ij}} L(y_i, \hat{h}_{q-1}(x_i) + \gamma), \quad j = (1, 2, \dots, J)$$

где j – номер конечного узла, γ_{jq} – значение j -го узла на q -м дереве.

4.Обновление прогнозируемых значений:

$$\hat{h}_q(x) = \hat{h}_{q-1}(x) + \mu \sum_{j=1}^{J_q} \gamma_{jq} I(x \in R_{jq}), \quad \mu \in [0, 1]$$

где $\hat{h}_q(x)$ – прогнозируемое значение q -ого дерева, $\hat{h}_{q-1}(x)$ – прогнозируемое значение $(q - 1)$ -го дерева, μ – коэффициент уровня обучения.

В каждом случае, когда добавляется дерево решений, алгоритм обучает новую функцию и определяет ее коэффициенты так, чтобы минимизировать погрешность предыдущих итераций. После итерации Q , алгоритм экстремального бустинга объединяет результаты всех итераций $\hat{h}_q(x)$ путем построения выходной модели $\hat{Y}'$.

$$\hat{Y}' = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q L(y, \hat{h}_{q-1}(x)) + \hat{h}_q(x)$$

Ансамблевые алгоритмы, основанные на деревьях решений, способны обрабатывать значительный объем данных и не требуют сложных процедур оптимизации в отличие от нейронных сетей и метода опорных векторов [15].

Таким образом, модель случайного леса состоит из регрессоров, построенных независимо друг от друга. Алгоритмы адаптивного бустинга и экстремального бустинга отличаются от случайного леса тем, что состоят из регрессоров, построенных с учетом погрешности предыдущих регрессоров. Агрегирование результатов путем усреднения выходных данных в конечном итоге дает модель ансамблевого алгоритма.

Для построения модели с достаточной точностью с помощью данных алгоритмов необходимо указать число деревьев решений и их глубину. Чем больше деревьев решений, тем выше точность, но время построения случайного леса также пропорционально увеличивается. Точность модели также зависит от глубины деревьев решений. Несмотря на то, что увеличение глубины повышает качество ансамбля как на обучении, так и на тестировании, чем меньше глубина деревьев, тем быстрее выполняется данный алгоритм. Отсюда следует необходимость поиска оптимального количества деревьев решений и их глубины.

Зависимость выработки от скорости ветра.

По графику зависимости генерации от скорости ветра, представленному на рисунке 2, возможно проанализировать характер выработки ветровой турбины [25].

Данный график имеет три основные точки: минимальную скорость V_{cut-in} , номинальную скорость ветра V_{rated} и критическую скорость $V_{cut-out}$. Эти три точки делят график на четыре сегмента, каждый из которых имеет различные зависимости генерации от скорости ветра. Если скорость ветра V ниже минимальной V_{cut-in} или выше критической $V_{cut-out}$, генерация равна нулю. В случае $V_{rated} < V < V_{cut-out}$ мощность турбины достигает номинального значения. На графике те точки, которые находятся между минимальной и номинальной скоростью, могут быть описаны следующим выражением:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad \text{при } V_{cut-in} < V < V_{rated}$$

где P – выработка турбины, C_p – коэффициент ветровой турбины, ρ – плотность воздуха, R – радиус ротора, V – скорость ветра.

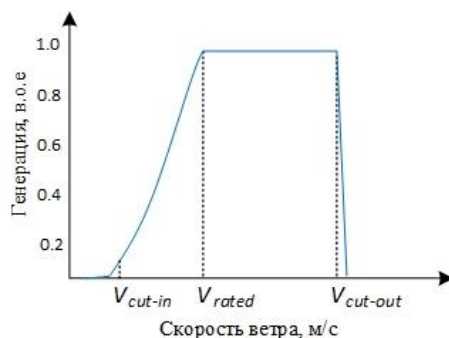


Рис. 2. График зависимости ветровой турбины

Fig. 2. Wind turbine power curve

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

В данной статье рассматривается применение ансамблевых методов, описанных выше, для прогнозирования скорости ветра в трех районах, где построены ветровые электростанции с различной установленной мощностью. Также на основе полученных данных по скорости ветра были построены графики выработки ветровых электростанций.

Для оценки модели были использованы такие метрики, как средняя ошибка по модулю (англ. MAE – Mean Absolute Error) и нормализованная средняя ошибка по модулю в процентах (англ. nMAE – Normalized MAE).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|,$$

$$nMAE = MAE / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i * 100,$$

где N – размер выборки, y_i – фактическое значение i -ого элемента выборки, $\hat{y}_i$ – прогнозируемое значение i -ого элемента выборки.

Результаты (Results)

Данные о скорости ветра и выработке регистрировались с часовым интервалом для трёх ветровых электростанций, расположенных в различных регионах Монголии, и были собраны за период с 2019 г по 2021 г. Весь набор данных был поделен на обучающую и тестовую выборки в отношении 70 на 30 процентов соответственно. В таблице 1 перечислены ветровые электростанции, которые функционируют в центральной энергосистеме Монголии.

Таблица 1

Table 1

Установленная мощность ветровой энергии

Installed capacity of wind energy

Наименование электростанций	Наименование в расчетах	Количество турбин	Установленная мощность, МВт
Салхит	ВЭС-1	31	50
Цэций	ВЭС-2	25	50
Сайншанд	ВЭС-3	25	55

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

В данной работе перечисленные выше ансамблевые алгоритмы были использованы для решения задачи прогнозирования скорости ветра. При построении модели важнейшей задачей является определение глубины деревьев решений, так как от этого существенно зависит достоверность модели R^2 . Зависимость достоверности модели R^2 от глубины деревьев решений (max_depth) показана на рисунке 3.

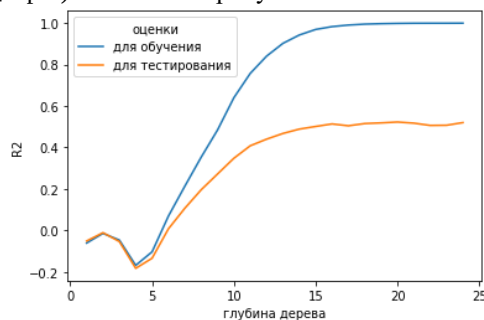


Рис. 3. Зависимость достоверности модели R^2 от глубины деревьев.

Fig. 3. Dependence of the reliability of the model R^2 on the depth of the trees.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Из рисунка 3 видно, что оптимальное значение глубины деревьев совпадает с точкой, в которой оценка обучения достигла своего максимального значения и где оценка тестирования стабилизируется. Количество деревьев было принято равным 100, поскольку увеличение количества деревьев свыше этого значения оказывает слабое влияние на качество модели. Таким образом, оптимальными значениями гиперпараметров являются 20 для глубины деревьев и 100 для их количества. Настройка параметров глубины и количества деревьев реализована с помощью функции GridSearchCV (библиотеки sklearn), которая подбирает наилучшие параметры модели. Оценки моделей приведены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Достоверности моделей Model validities								
	Параметры		ВЭС-1		ВЭС-2		ВЭС-3	
	Глубина деревьев	Количество деревьев	MAE, м/с	nMAE, %	MAE, м/с	nMAE, %	MAE, м/с	nMAE, %
RF	20	100	1,33	15,81	2,19	17,25	1,44	17,71
XGB			0,68	8,16	0,70	8,66	0,74	9,14
ADA			0,63	7,49	0,67	8,46	0,68	8,40

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Алгоритм обучается на временных рядах скорости ветра, полученных по почасовым данным за прошедшую неделю (wind-i). В дополнение к данным о скорости ветра рассчитывались данные о сезонности, включая названия месяцев (month), дней (day) и часов (hour). Это позволит определить уровень изменения скорости ветра по месяцам, то есть при прогнозировании скорости ветра будет учитываться особенность сезона. На рисунке 4 показана роль этих переменных при построении модели на основе вышеперечисленных алгоритмов и показан отрезок процесса тестирования модели на рисунке 5.

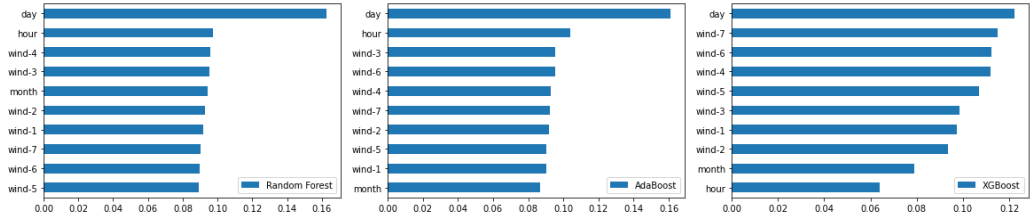


Рис. 4. Роль переменных при построении модели.

Fig. 4. The role of variables in building models.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

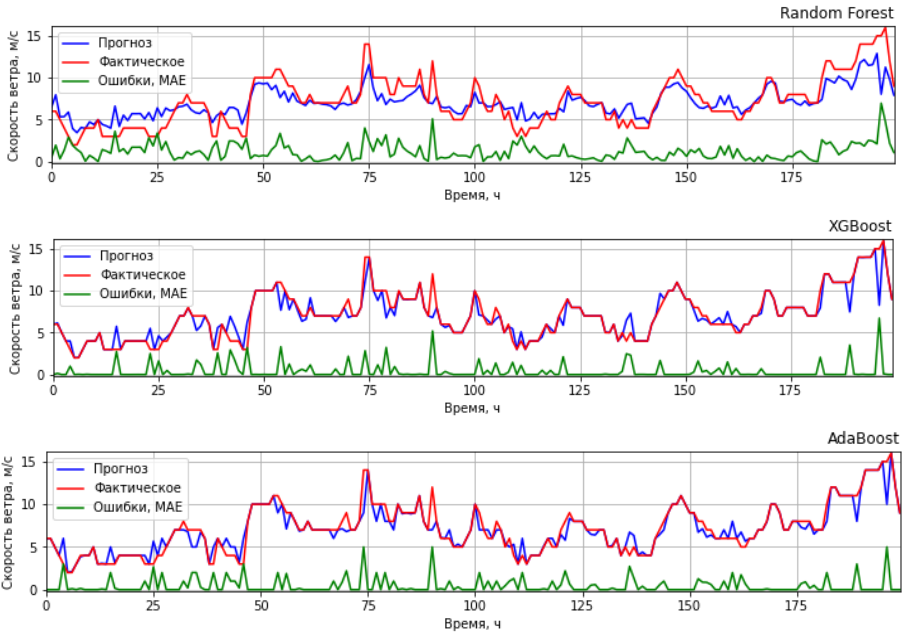


Рис. 5. Отрезок процесса тестирования модели.

Fig. 5. Samples of the testing process.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Из таблицы 3 и рисунка 5 видно, что модели, построенные по алгоритмам экстремального бустинга (XGBoost) и адаптивного бустинга (AdaBoost) имеют меньшую погрешность по сравнению с моделью случайного леса (Random Forest).

На основе данных о скорости ветра, спрогнозированных моделью адаптивного бустинга, был построен временной ряд выработки ветровых электростанций с помощью графика зависимости генерации от скорости ветра. На рисунке 6 показан график зависимости генерации от скорости ветра для ветровой электростанции «Сайншанд», оснащенной 25 турбинами типа Vestas V110-2.0.

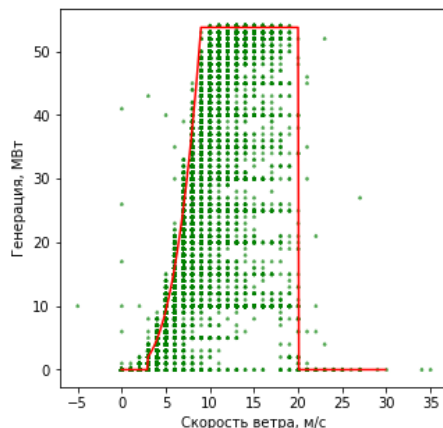


Рис. 6. Зависимость генерации от скорости ветра.

Fig. 6. Power curve of wind turbine.

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

В таблице 4 приведены результаты прогнозирования суточных графиков выработки ветровых электростанций, которые выбраны случайным образом.

Таблица 4

Результаты прогнозирования выработки ВЭС.

	ВЭС-1		ВЭС-2		ВЭС-3	
	MAE, МВт	nMAE, %	MAE, МВт	nMAE, %	MAE, МВт	nMAE, %
1	0,78	2,18	3,52	7,30	4,35	17,09
2	0,58	1,63	4,15	8,45	2,52	5,05
3	7,96	20,54	0,63	1,26	1,07	2,35
4	1,79	14,50	6,85	31,17	5,97	29,10
5	3,01	11,45	1,97	5,08	6,82	19,77
6	0,82	22,29	3,12	7,99	0,85	19,30
7	1,22	6,80	3,66	25,25	1,73	7,17
8	1,49	4,48	2,13	4,17	6,42	15,34
9	2,17	16,65	2,75	13,32	1,74	10,91
10	4,43	22,56	6,46	19,91	3,35	6,73
Средняя ошибка	2,42	12,30	3,52	12,39	3,48	13,28

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Заключение (Conclusions)

В данной работе было рассмотрено применение метода машинного обучения для прогнозирования почасового графика выработки ветровых электростанций. Из-за стохастических и резко переменных характеристик изменения скорости ветра возникает необходимость применения более сложных подходов к решению задачи прогнозирования скорости ветра, а именно искусственного интеллекта и машинного обучения. В данном случае были применены ансамблевые методы машинного обучения, преимущество которых заключается в возможности определения нелинейных и нестационарных зависимостей во временных рядах. В работе были построены модели скорости ветра с применением алгоритмов случайного леса (Random Forest), адаптивного бустинга (AdaBoost) и экстремального бустинга (XGBoost). В результате экспериментов наилучшее качество показал алгоритм адаптивного бустинга: средняя ошибка по модулю данного алгоритма не превышает 1,0 м/с.

С помощью графика зависимости выработки от скорости ветра и полученных данных о скорости ветра были спрогнозированы суточные почасовые графики генерации для трех ветровых электростанций, которые расположены в различных регионах Монголии. Средняя

ошибка по модулю прогнозирования (MAE) составила от 2,42 до 3,48 МВт; нормализованная средняя ошибка по модулю в процентах (nMAE) составила от 12,3 до 13,3 %. Таким образом, ошибка прогнозирования составляет от 5,0 до 7,0 % установленной мощности соответствующих ветровых электростанций.

Можно сделать вывод, что данный метод машинного обучения может быть применен в решении задачи прогнозирования суточного графика выработки ветроэлектростанций на практике. Повышение точности прогнозирования выработки ветроустановок имеет высокую значимость для эффективного функционирования и планирования режимов энергосистемы.

Литература

1. Olaofe Z. O. A 5-day wind speed and power forecasts using a layer recurrent neural network (LRNN) // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2014. Т. 6. С. 1-24. doi: [10.1016/j.seta.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.12.001)
2. Santos M., González M. Factors that influence the performance of wind farms // Renewable Energy. 2019. Т. 135. С. 643-651. doi: [10.1016/j.renene.2018.12.033](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.033)
3. Ouyang T., Kusiak A., He Y. Predictive model of yaw error in a wind turbine // Energy. 2017. Т. 123. С. 119-130. doi: [10.1016/j.energy.2017.01.150](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.150)
4. Matrenin P. V., Osgonbaatar T., Sergeev N. N. Overview of Renewable Energy Sources in Mongolia // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). IEEE. 2022. С. 700-703. doi: [10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986](https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986)
5. Zhao L., Muhammad S.N., Hafiz M.J., Ahmed N.A. A review on proliferation of artificial intelligence in wind energy forecasting and instrumentation management // Environmental Science and Pollution Research. 2022. №. 29. Т. 29. С. 43690-43709. doi: [10.1007/s11356-022-19902-8](https://doi.org/10.1007/s11356-022-19902-8)
6. Manusov V., Matrenin P., Nazarov M., Beryozkina S. Short-Term Prediction of the Wind Speed Based on a Learning Process Control Algorithm in Isolated Power Systems // Sustainability. 2023. №. 2. Т. 15. С. 1730. doi: [10.3390/su15021730](https://doi.org/10.3390/su15021730)
7. Tiwari S. Wind speed forecasting methods for wind energy generation // 2022 1st International Conference on Informatics (ICI). IEEE, 2022. С. 143-147. doi: [10.1109/ICI53355.2022.9786880](https://doi.org/10.1109/ICI53355.2022.9786880)
8. Weather forecasting for renewable energy system: a review / Meenal R. и др // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. №. 5. Т. 29. С. 2875-2891. doi: [10.1007/s11831-021-09695-3](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09695-3)
9. Li X., Sabas J. F., Mendéz V. D. Wind energy forecasting using multiple ARIMA models // 2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE, 2022. С. 2034-2039. doi: [10.1109/CASE49997.2022.9926516](https://doi.org/10.1109/CASE49997.2022.9926516)
10. A survey of artificial neural network in wind energy systems / Marugán A. P. и др // Applied energy. 2018. Т. 228. С. 1822-1836. doi: [10.1016/j.apenergy.2018.07.084](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.084)
11. Zhang Y., Li R. Short term wind energy prediction model based on data decomposition and optimized LSSVM // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Т. 52. С. 102025. doi: [10.1016/j.seta.2022.102025](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102025)
12. Regression model for predicting the speed of wind flows for energy needs based on fuzzy logic / Khasanzoda N. и др // Renewable Energy. 2022. Т. 191. С. 723-731. doi: [10.1016/j.renene.2022.04.017](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.017)
13. A new wind power prediction method based on chaotic theory and Bernstein Neural Network / Wang C. и др. // Energy. 2016. Т. 117. С. 259-271. doi: [10.1016/j.energy.2016.10.041](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.041)
14. Buhan S., Özkazanç Y., Çadircı I. Wind pattern recognition and reference wind mast data correlations with NWP for improved wind-electric power forecasts // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016. №. 3. Т. 12. С. 991-1004. doi: [10.1109/TII.2016.2543004](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2543004)
15. Negative correlation learning-based RELM ensemble model integrated with OVMD for multi-step ahead wind speed forecasting / Peng T. и др. // Renewable Energy. 2020. Т. 156. С. 804-819. doi: [10.1016/j.renene.2020.03.168](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.168)
16. Smart wind speed forecasting approach using various boosting algorithms, big multi-step forecasting strategy / Li Y. и др. // Renewable energy. 2019. Т. 135. С. 540-553. doi: [10.1016/j.renene.2018.12.035](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.035)
17. Wang L., Guo Y., Li X. Wind speed prediction using measurements from neighboring locations and combining the extreme learning machine and the AdaBoost algorithm // Energy Reports. 2022. Т. 8. С. 1508-1518. doi: [10.1016/j.egy.2021.12.062](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.062)

18. Dosdoğru A. T., İpek A. B. Hybrid boosting algorithms and artificial neural network for wind speed prediction // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. №. 3. Т. 47. С. 1449-1460. doi: [10.1016/j.ijepes.2021.107365](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107365)
19. A multi-level model for hybrid short term wind forecasting based on SVM, wavelet transform and feature selection / Abedinia O. и др.// 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, 2022. С. 1-6. doi: [10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854519](https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854519)
20. Lahouar A., Slama J. B. H. Hour-ahead wind power forecast based on random forests // Renewable energy. 2017. Т. 109. С. 529-541. doi: [10.1016/j.renene.2017.03.064](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.064)
21. Breiman L. Random forests // Machine learning. 2001. Т. 45. С. 5-32. doi: [10.1023/a:1010933404324](https://doi.org/10.1023/a:1010933404324)
22. Jorgensen K. L., Shaker H. R. Wind power forecasting using machine learning: State of the art, trends and challenges // 2020 IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). IEEE, 2020. С. 44-50. doi: [10.1109/SEGE49949.2020.9181870](https://doi.org/10.1109/SEGE49949.2020.9181870)
23. Freund Y., Schapire R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting // Journal of computer and system sciences. 1997. №. 1. Т. 55. С. 119-139. doi: [10.1006/jcss.1997.1504](https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504)
24. Phan Q. T., Wu Y. K., Phan Q. D. A hybrid wind power forecasting model with XGBoost, data preprocessing considering different NWP // Applied Sciences. 2021. №. 3. Т. 11. С. 1100. doi: [10.3390/app11031100](https://doi.org/10.3390/app11031100)
25. Ouyang T., Kusiak A., He Y. Modeling wind-turbine power curve: A data partitioning and mining approach // Renewable Energy. 2017. Т. 102. С. 1-8. doi: [10.1016/j.renene.2016.10.032](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.032)

Авторы публикации

Осгонбаатар Тувшин – аспирант, Новосибирский государственный технический университет. Email: o.tuvshin.21@gmail.com.

Русина Анастасия Георгиевна – д-р техн. наук, декан факультета энергетики, Новосибирский государственный технический университет. Email: anastasiarusina@gmail.com.

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет. Email: pavel.matrenin@gmail.com.

Сергеев Никита Николаевич – студент, младший научный сотрудник Межкафедральной научно-исследовательской лаборатории обработки, анализа и представления данных в электроэнергетических системах, Новосибирский государственный технический университет. Email: nikita.n.sergeev@gmail.com

References

1. Olaofe Z. O. A 5-day wind speed and power forecasts using a layer recurrent neural network (LRNN). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014. vol. 6, pp.1-24. doi: [10.1016/j.seta.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.seta.2013.12.001)
2. Santos M., González M. Factors that influence the performance of wind farms, *Renewable Energy*, 2019, vol.135, pp.643-651. doi: [10.1016/j.renene.2018.12.033](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.033)
3. Ouyang T., Kusiak A., He Y. Predictive model of yaw error in a wind turbine. *Energy*. 2017. vol.123. pp. 119-130. doi: [10.1016/j.energy.2017.01.150](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.150)
4. Matrenin P. V., Osgonbaatar T., Sergeev N. N. Overview of Renewable Energy Sources in Mongolia. 2022 *IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. IEEE, 2022. pp. 700-703. doi: [10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986](https://doi.org/10.1109/SIBIRCON56155.2022.10016986)
5. Zhao L, Muhammad S.N., Hafiz M.J., Ahmed N.A. A review on proliferation of artificial intelligence in wind energy forecasting and instrumentation management. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. vol. 29. pp. 43690-43709. doi: [10.1007/s11356-022-19902-8](https://doi.org/10.1007/s11356-022-19902-8)

6. Manusov V., Matrenin P., Nazarov M., Beryozkina S. Short-Term Prediction of the Wind Speed Based on a Learning Process Control Algorithm in Isolated Power Systems. *Sustainability*. 2023. vol. 2(15). pp. 1730. doi: [10.3390/su15021730](https://doi.org/10.3390/su15021730)
7. Tiwari, Seemant. Wind speed forecasting methods for wind energy generation. *2022 1st International Conference on Informatics (ICI)*. IEEE. 2022. pp. 143-147. doi: [10.1109/ICI53355.2022.9786880](https://doi.org/10.1109/ICI53355.2022.9786880)
8. Meenal, R., et al. Weather forecasting for renewable energy system: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. vol. 5(29). pp. 2875-2891. doi: [10.1007/s11831-021-09695-3](https://doi.org/10.1007/s11831-021-09695-3)
9. Li, Xiaou, Juan Francisco Sabas, and Vicente Duarte Mendéz. Wind energy forecasting using multiple ARIMA models. *2022 IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE, 2022. pp. 2034-2039. doi: [10.1109/CASE49997.2022.9926516](https://doi.org/10.1109/CASE49997.2022.9926516)
10. Marugán A. P. et al. A survey of artificial neural network in wind energy systems. *Applied energy* 228. 2018. pp.1822-1836. Doi: [10.1016/j.apenergy.2018.07.084](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.084)
11. Zhang Y., and Li R. Short term wind energy prediction model based on data decomposition and optimized LSSVM. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022. vol.52. pp. 102025. doi: [10.1016/j.seta.2022.102025](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102025)
12. Khasanzoda, Nasrullo, et al. Regression model for predicting the speed of wind flows for energy needs based on fuzzy logic. *Renewable Energy*. 2022. vol.191. pp. 723-731. doi: [10.1016/j.renene.2022.04.017](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.017)
13. Wang C, et.al. A new wind power prediction method based on chaotic theory and Bernstein Neural Network. *Energy*. 2016. vol. 117. pp. 259-271. doi: [10.1016/j.energy.2016.10.041](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.041)
14. Buhan S., Özkazanç Y., Çadircı I. Wind pattern recognition and reference wind mast data correlations with NWP for improved wind-electric power forecasts. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2016. vol. 3(12). pp. 991-1004. doi: [10.1109/TII.2016.2543004](https://doi.org/10.1109/TII.2016.2543004)
15. Peng T., et.al. Negative correlation learning-based RELM ensemble model integrated with OVMD for multi-step ahead wind speed forecasting. *Renewable Energy*. 2020. vol.156. pp. 804-819. doi: [10.1016/j.renene.2020.03.168](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.168)
16. Li Y., et.al. Smart wind speed forecasting approach using various boosting algorithms, big multi-step forecasting strategy. *Renewable energy*. 2019. vol.135. pp.540-553. doi: [10.1016/j.renene.2018.12.035](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.035)
17. Wang L., Guo Y., Li X. Wind speed prediction using measurements from neighboring locations and combining the extreme learning machine and the AdaBoost algorithm. *Energy Reports*. 2022. vol. 8. pp. 1508-1518. doi: [10.1016/j.egy.2021.12.062](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.062)
18. Dosdoğru A. T., İpek A. B. Hybrid boosting algorithms and artificial neural network for wind speed prediction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. no. 3. vol. 47. pp. 1449-1460. doi: [10.1016/j.ijepes.2021.107365](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107365)
19. Abedinia O., et.al. A multi-level model for hybrid short term wind forecasting based on SVM, wavelet transform and feature selection. *2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE, 2022. pp. 1-6. doi: [10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854519](https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854519)
20. Lahouar A., Slama J. B. H. Hour-ahead wind power forecast based on random forests. *Renewable energy*. 2017. vol. 109. pp. 529-541. doi: [10.1016/j.renene.2017.03.064](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.064)
21. Breiman, Leo. Random forests. *Machine learning*. 2001. vol.45. pp. 5-32. doi: [10.1023/a:1010933404324](https://doi.org/10.1023/a:1010933404324)
22. Jorgensen K. L., Shaker H. R. Wind power forecasting using machine learning: State of the art, trends and challenges. *2020 IEEE 8th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. IEEE, 2020. pp. 44-50. doi: [10.1109/SEGE49949.2020.9181870](https://doi.org/10.1109/SEGE49949.2020.9181870)
23. Freund Y., Schapire R. E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting. *Journal of computer and system sciences*. 1997. no. 1. vol. 55. pp. 119-139. doi: [10.1006/jcss.1997.1504](https://doi.org/10.1006/jcss.1997.1504)
24. Phan Q. T., Wu Y. K., Phan Q. D. A hybrid wind power forecasting model with XGBoost, data preprocessing considering different NWPs. *Applied Sciences*. 2021. no. 3. vol. 11. pp. 1100. doi: [10.3390/app11031100](https://doi.org/10.3390/app11031100)
25. Ouyang T., Kusiak A., He Y. Modeling wind-turbine power curve: A data partitioning and mining approach. *Renewable Energy*. 2017. vol. 102. pp. 1-8. doi: [10.1016/j.renene.2016.10.032](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.032)

Authors of the publication

Osgonbaatar Tuvshin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: o.tuvshin.21@gmail.com.

Anastasia G. Rusina – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: anastasiarusina@gmail.com.

Pavel V. Matrenin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: pavel.matrenin@gmail.com.

Nikita N. Sergeev – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. Email: nikita.n.sergeev@gmail.com

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика.

Получено **20.10.2023 г.**

Отредактировано **09.11.2023 г.**

Принято **07.02.2024 г.**

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ДЕМПФИРУЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ЛЕСТНИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

Довгун ¹ В.П., Егоров ¹ Д.Э., Боярская ² Н.П., Синяговский ¹ А.Ф., Рыжов ¹ Н.А.

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²Красноярский государственный аграрный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Рост числа потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками является одной из причин ухудшения качества электрической энергии в сетях промышленных и муниципальных потребителей. Низкое качество электроэнергии приводит к отрицательным последствиям, связанным с сокращением срока службы электрооборудования, увеличением электротехнического и технологического ущерба у потребителей. ЦЕЛЬ. Развитие общего метода проектирования и сравнительный анализ характеристик широкополосных пассивных фильтров (ШПФ), обеспечивающих снижение негативного влияния мощных нелинейных нагрузок на режимы электрических сетей. МЕТОДЫ. Процедура проектирования ШПФ основана на использовании методов оптимального синтеза линейных цепей. Рассмотрена базовая структура ШПФ в форме реактивного четырехполюсника с резистивной нагрузкой. Определены требования к структуре реактивного четырехполюсника, при выполнении которых обеспечиваются требуемые компенсационные характеристики. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что ШПФ 2-3 порядка, используемые в промышленных СЭС, являются простейшими вариантами предложено базовой структуры. С помощью рассмотренного метода синтезированы новые варианты фильтров, реализующих требуемую частотную характеристику в полосе ослабления. Сравнение характеристик фильтров показало, что предлагаемые варианты ШПФ обладают значительными преимуществами по сравнению с традиционными фильтрами 2 порядка. На основе проведенного анализа сформулированы рекомендации по выбору структуры фильтров, используемых для ослабления характеристических и нехарактеристических гармоник. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование предлагаемых конфигураций ШПФ позволит снизить негативное влияние мощных нелинейных потребителей на качество электроэнергии в промышленных системах электроснабжения.

Ключевые слова: гармоники; демпфирование резонансных режимов; широкополосные демпфирующие фильтры.

Для цитирования: Довгун В.П., Егоров Д.Э., Боярская Н.П., Синяговский А.Ф., Рыжов Н.А. Широкополосные демпфирующие фильтры лестничной структуры // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 77-92. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-77-92.

LADDER BROADBAND DAMPING FILTERS

Dovgun ¹ VP., Egorov ¹ DE., Boyarskaya ² NP., Sinyagovskiy ¹ AF., Ryzhov ¹ NA.

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: RELEVANCE. The large proliferation of various nonlinear loads has led to serious power-quality related problems in power systems. THE PURPOSE. In this paper, we consider design procedure of broadband passive filters with flat frequency characteristics. METHODS. A general method for optimally design the arbitrary order broadband passive filters (BBF) is considered. The base structure of BBF has the form of resistively loaded reactive two-port. Conditions of low fundamental frequency loss and required filter selectivity have been determined. The BBF design procedure minimizes the grid total current distortion and takes into account the power system performance. RESULTS. New broadband passive filter scheme are proposed. Compensating performances of different BBF configurations are discussed. Case studies demonstrated that proposed scheme can filter characteristic and damp non-characteristic

harmonic simultaneously. **CONCLUSION.** The results show that proposed broadband damping filters are the effective instrument for the power quality normalization in industrial power systems.

Keywords: harmonics; resonance damping; broadband passive filter.

For citation: Dovgun VP., Egorov DE., Boyarskaya NP., Sinyagovskiy AF., Ryzhov NA. Ladder broadband damping filters. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 77-92. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-77-92.

Введение (Introduction)

Ухудшение качества электроэнергии (КЭ) в системах электроснабжения в значительной степени вызвано технологическими изменениями в различных областях промышленности. Выросла доля мощных нагрузок с нелинейными вольтамперными характеристиками – многопульсных полупроводниковых преобразователей, частотно-регулируемых электроприводов, дуговых сталеплавильных печей. Преимущество многопульсных схем заключается в малой эмиссии низкочастотных нехарактеристических гармоник. Однако в реальных условиях спектры токов многопульсных преобразователей значительно сложнее. Несимметрия напряжений трехфазной сети сопровождается появлением нехарактеристических гармоник входного тока. Кроме того, входные токи частотно-регулируемых электроприводов содержат интергармоники, уровень и частоты которых зависят от загрузки и скорости вращения двигателя.

Для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) промышленных потребителей используются активные и пассивные силовые фильтры. Активные фильтры (АФ) представляют собой силовые электронные устройства, обеспечивающие адаптивную компенсацию искажений напряжений и токов. Серьезный недостаток АФ – их высокая стоимость.

Пассивные фильтры гармоник (ПФГ) являются стандартным решением, используемым для компенсации реактивной мощности и нормализации параметров, определяющих качество электроэнергии в сетях с мощными промышленными нагрузками [1-9]. Традиционные узкополосные пассивные фильтры в форме параллельного соединения резонансных контуров обеспечивают подавление мощных характеристических гармоник. Однако они не позволяют корректировать частотные характеристики сети в широком диапазоне частот. Кроме того, звенья узкополосного фильтра образуют параллельные контуры с внешней сетью. В результате частотная характеристика узкополосного фильтра имеет максимумы, чередующиеся с резонансными частотами отдельных звеньев. Максимумы частотной характеристики могут способствовать усилению отдельных нехарактеристических или интергармоник, что может вызвать еще большее искажение токов и напряжений сети. Для нормализации качества электроэнергии в промышленных СЭС необходимы широкополосные компенсирующие устройства, имеющие монотонную частотную характеристику, исключающую возможность резонансного усиления гармоник. Это стимулировало поиск новых структур и методов расчета пассивных фильтров [4, 7-9, 10, 11-13].

Широкополосные фильтры 2 порядка являются распространенным средством, применяемым для компенсации гармонических искажений и демпфирования резонансных явлений в электроэнергетических системах различных классов напряжения [5-7, 14, 17, 21, 22]. Примеры использования ШПФ 2 порядка в сетях с мощными промышленными нагрузками рассмотрены в [5, 6].

Недостаток демпфирующих фильтров 2 порядка – низкая энергоэффективность, вызванная большими потерями мощности в элементах фильтра. Для снижения потерь в фильтрах С-типа в поперечную ветвь последовательно с реактором включают дополнительный конденсатор. Это способствует уменьшению потерь в области низких частот.

Подробный обзор характеристик широкополосных фильтров 2-3 порядка представлен в статье [7]. Авторы получили аналитические выражения, с помощью которых проведено сравнение характеристик известных структур ШПФ. Исследовано влияние параметров фильтров (частоты настройки и добротности) на их компенсационные характеристики. Определены диапазоны частот, которые оптимальны для применения рассмотренных фильтров.

Во многих случаях ШПФ 2 порядка и фильтры С-типа имеют недостаточную селективность частотных характеристик, что затрудняет эффективную компенсацию

характеристических и нехарактеристических гармоник, значительно различающихся по мощности. Очевидный путь улучшения компенсационных характеристик – увеличение порядка фильтра. Однако широкополосные фильтры более высокого порядка рассмотрены лишь в небольшом числе работ, опубликованных в последние годы [8, 9, 12-16]. Одна из причин состоит в том, что аналитические выражения для расчета ШПФ высокого порядка очень громоздки, что затрудняет расчет таких структур.

Цель настоящего исследования – развитие процедуры проектирования широкополосных демпфирующих фильтров на основе использования теории оптимального синтеза линейных частотно-избирательных цепей, а также сравнительный анализ характеристик ШПФ.

Научная значимость исследования состоит в развитии общего подхода, позволяющего с единых позиций рассматривать различные конфигурации широкополосных демпфирующих фильтров. Показано, что известные конфигурации ШПФ представляют собой простейшие варианты базовой структуры в форме односторонне нагруженного реактивного четырехполюсника. Определены требования к характеру продольных и поперечных ветвей лестничного четырехполюсника, при выполнении которых обеспечиваются заданная избирательность и энергоэффективность реализуемых фильтров.

Практическая значимость исследования заключается в том, что новые варианты широкополосных демпфирующих фильтров, предложенные в статье, имеют значительные технико-экономические преимущества перед традиционными структурами ШПФ, используемых в промышленных системах электроснабжения. Их использование позволит уменьшить негативное влияние мощных нелинейных нагрузок на качество электроэнергии в СЭС.

Литературный обзор (Literature review)

Широкополосный демпфирующий фильтр второго или третьего порядка можно рассматривать как LC-четырёхполюсник, к внешним зажимам которого подключен демпфирующий резистор (рис. 1).

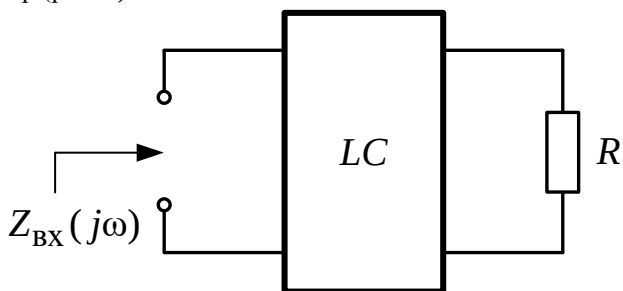


Рис. 1. Односторонне нагруженный LC-четырёхполюсник

Fig.1. Single-loaded LC-two-port

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Простейшим вариантом является демпфирующий ШПФ 2 порядка (рис. 2).

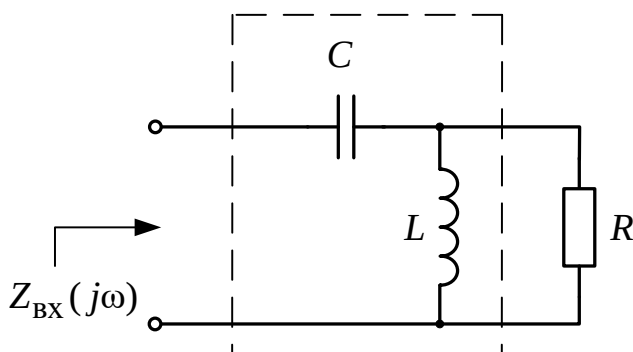


Рис. 2. Демпфирующий ШПФ 2 порядка

Fig. 2. Second-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Частотная характеристика сопротивления фильтра $Z_{BX}(\omega)$ имеет монотонный характер (рисунк 3). Минимум $Z_{BX}(\omega)$ находится на частоте, близкой к частоте настройки $\omega_H = 1/\sqrt{LC}$. В полосе ослабления, при $\omega > \omega_H$, сопротивление ШПФ определяется в основном сопротивлением демпфирующего резистора.

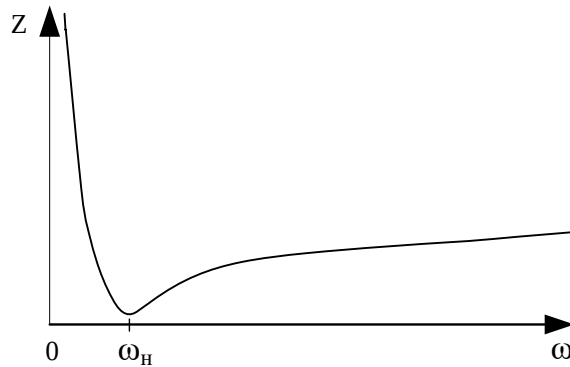


Рисунок 3. Частотная характеристика ШПФ

Fig. 3. The impedance characteristic of broadband damping filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Добротность широкополосного фильтра пропорциональна сопротивлению демпфирующего резистора

$$Q = \frac{R}{\sqrt{L/C}}.$$

Как правило, добротность ШПФ 2 порядка выбирают в интервале 0,5 - 5 [5, 6].

Реактивная мощность фильтра Q_Φ и мощность основного конденсатора C_1 связаны соотношением [2, 6]

$$Q_\Phi = \frac{n^2}{n^2 - 1} Q_{C(1)}.$$

Здесь $Q_{C(1)}$ – реактивная мощность конденсатора на частоте сети.

Активная мощность, потребляемая демпфирующим резистором

$$P_R = \sum_{n=1} R I_{R(n)}^2 = \frac{X_{L(1)}}{R} \sum_{n=1} (n I_{L(n)})^2,$$

где $X_{L(1)}$ – сопротивление реактора на частоте сети.

Приведем основные расчетные соотношения для ШПФ второго порядка [5, 6].
Емкость конденсатора

$$C_1 = \frac{Q_\Phi}{\omega_1 U^2}. \quad (1)$$

Индуктивность реактора

$$L = \frac{1}{\omega_H^2 C_1}.$$

Сопротивление демпфирующего резистора

$$R = \sqrt{\frac{L}{C_1}} Q = \frac{Q}{\omega_H C_1}.$$

Графики частотных характеристики входного сопротивления ШПФ 2 порядка, имеющих различные значения добротности, показаны на рисунке 4. Добротности фильтров равны 2 и 5.

При увеличении добротности фильтра обеспечивается эффективное подавление гармоник с частотами, близкими к частоте настройки ω_H . Однако при этом уменьшается эффективность компенсации гармоник высокого порядка. ШПФ 2 порядка в основном используются в составных фильтрах, включающих узкополосные звенья, осуществляющие подавление мощных низкочастотных гармоник. Широкополосный фильтр в такой схеме обеспечивает компенсацию гармоник высокого порядка ($n > 7$). По этой причине ШПФ 2 порядка многие авторы называют фильтрами верхних частот (high-pass filters, HPF).

Для уменьшения потерь мощности в схему ШПФ включают дополнительный конденсатор. В широкополосном фильтре 3 порядка конденсатор C_2 соединен последовательно с демпфирующим резистором (рис. 5).

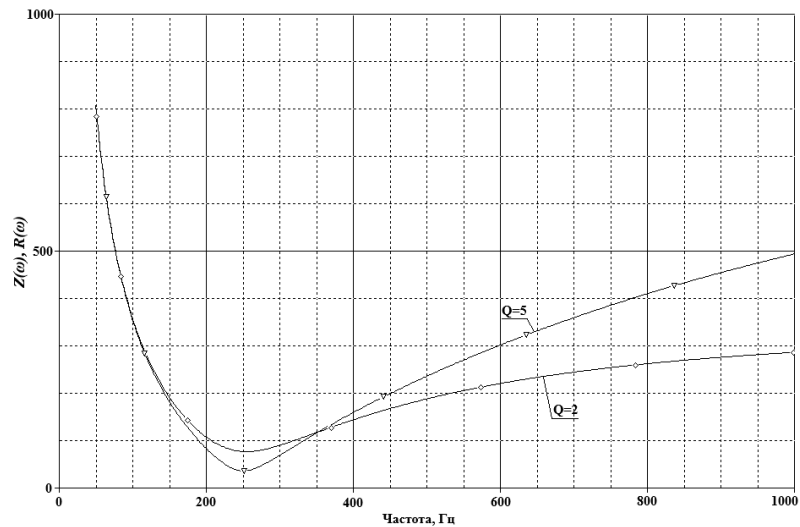


Рис. 4. Частотные характеристики сопротивления ШПФ 2 порядка Fig. 4. The impedance characteristics of second-order broadband filters

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

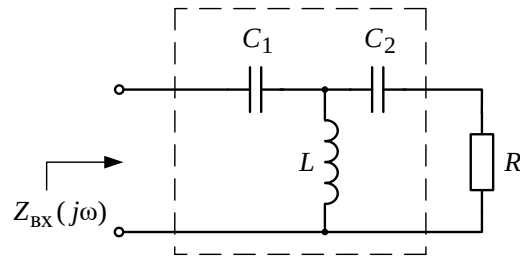


Рис. 5. Широкополосный фильтр третьего порядка Fig. 5. Third-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Анализ характеристик и процедура расчета ШПФ 3 порядка рассмотрены в работах [7, 11]. Емкость основного конденсатора C_1 и индуктивность реактора L рассчитываются с помощью формул

$$C_1 = Q_{\Phi} / (\omega_1 U^2) \quad (2)$$

$$L = 1 / (\omega_H^2 C_1) \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) ω_1 – частота основной гармоники, U – напряжение сети. Для расчета дополнительного конденсатора C_2 в [7] использована формула $C_2 = C_1 / (Q^2 - 1)$.

Фильтры С-типа (рисунок 6) являются по существу модификацией ШПФ 2 порядка. Для снижения потерь мощности в демпфирующем резисторе параллельно ему включен контур $L - C_2$, настроенный в резонанс на частоту сети.

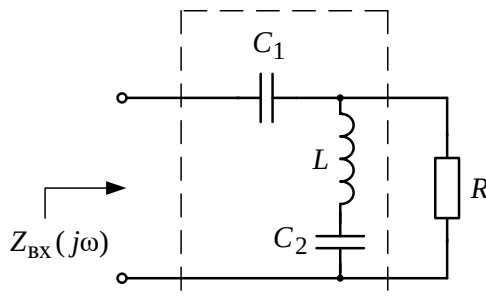


Рис. 6. Фильтр С-типа

Fig. 6. C-type filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Примеры использования фильтров С-типа в промышленных системах электроснабжения и методы их расчета рассмотрены в работах [17-21]. Емкость основного конденсатора C_1 определяется формулой (1). Емкость вспомогательного конденсатора зависит от отношения частоты настройки и частоты сети

$$C_2 = C_1 \left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right). \quad (4)$$

Индуктивность реактора должна быть такой, чтобы контур $L - C_2$ был настроен в резонанс на частоту сети:

$$L = \frac{1}{\omega_1^2 C_2}.$$

Сопротивление демпфирующего резистора можно определить с помощью соотношения, предложенного в работе [18]

$$R = \frac{\omega_H L}{Q}.$$

Здесь Q – добротность широкополосного фильтра.

Исследования, проведенные в [14, 19, 22] показали, что во многих случаях ШПФ 2 порядка и фильтры С-типа имеют недостаточную избирательность для эффективной компенсации искажений токов и демпфирования резонансных режимов. Причина заключается в том, что регулирование частотной характеристики в фильтре 2 порядка осуществляется с помощью единственного свободного параметра (сопротивления демпфирующего резистора). При увеличении R обеспечивается фильтрация низкочастотных гармоник, однако это достигается за счет менее эффективного ослабления гармоник высокого порядка. Таким образом, необходимы более сложные конфигурации ШПФ, осуществляющих компенсацию широкого спектра гармоник и демпфирование резонансных режимов в сети.

Синтез широкополосных демпфирующих фильтров (Materials and methods)

Используем представление широкополосного фильтра в виде реактивного четырехполюсника лестничной структуры, нагрузкой которого является резистор R . Иллюстрацией служит лестничный фильтр 5 порядка (рис. 7).

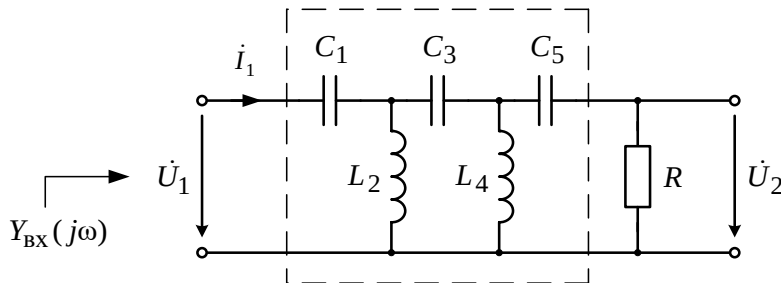


Рис. 7. Широкополосный фильтр пятого порядка Fig. 7. Fifth-order broadband filter

*Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Передаточные функции четырехполюсника на рисунке 7

$$T_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)}; \quad T_I(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)}.$$

Входная проводимость $Y_{BX}(j\omega) = 1/Z_{BX}(j\omega)$ и передаточные функции цепи на рисунке 7 связаны соотношением [13]:

$$\text{Re}\{Y_{BX}(j\omega)\} = G|T_U(j\omega)|^2. \quad (5)$$

$$\text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\} = R|T_I(j\omega)|^2. \quad (6)$$

На рисунке 8 показаны частотные характеристики входного сопротивления $Z_{BX}(j\omega)$ и вещественной части $R(\omega) = \text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\}$ широкополосного фильтра 3 порядка. График $\text{Re}\{Z_{BX}(j\omega)\}$ повторяет график амплитудно-частотной характеристики фильтра верхних

частот. В полосе ослабления входное сопротивление ШПФ определяется сопротивлением демпфирующего резистора.

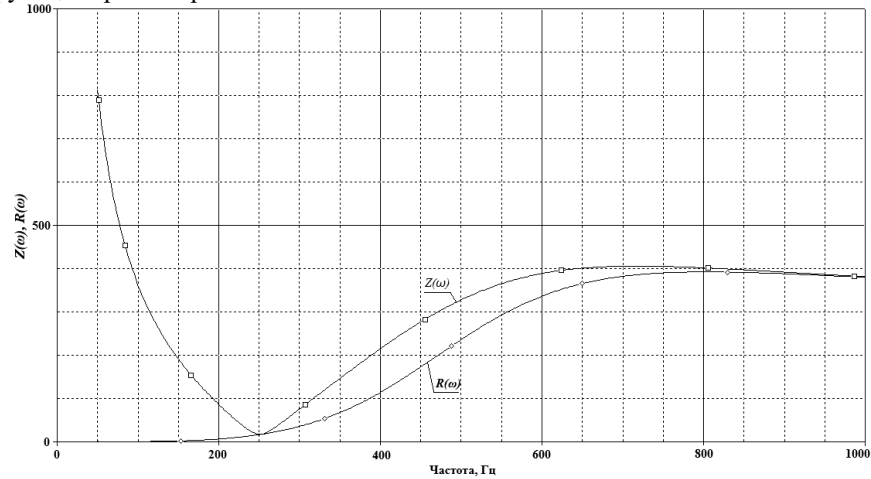


Рис. 8. Частотные характеристики ШПФ 3 порядка
Fig. 8. The frequency characteristics of the broadband third-order filter

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Заметим, что ШПФ 2 и 3 порядка на рисунках 2 и 5 представляют собой варианты односторонне нагруженного реактивного четырехполюсника.

Для подробного анализа характеристик ШПФ произвольного порядка представим его в форме каскадного соединения одноэлементных четырехполюсников (рис. 9, а, б)

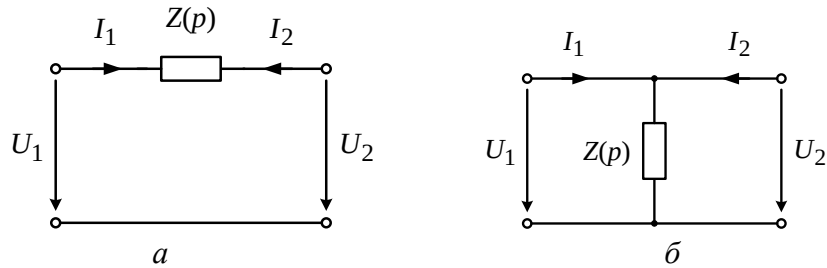


Рисунок 9. Одноэлементные четырехполюсники
Fig. 9. Single-element two-ports

Источник: составлено автором . Source: compiled by the author

Матрица цепных параметров четырехполюсника с продольной ветвью (рис. 9, а)

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & Z(p) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Здесь p – комплексная частотная переменная.

Цепная матрица четырехполюсника с поперечной ветвью (рис. 9, б)

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z(p)} & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрицу цепных параметров фильтра получим, перемножая цепные матрицы элементарных четырехполюсников. Согласно (5) нули $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}$ и нули передаточной функции $T_U(p)$ совпадают. Из теории синтеза пассивных LC-фильтров известно, что нули передачи лестничного четырехполюсника формируются полюсами сопротивлений продольных ветвей и проводимостей поперечных ветвей. Если ветви четырехполюсника имеют простейшую структуру и состоят из одиночных конденсаторов и реакторов, нули передаточной функции $T_U(p)$ расположены в начале координат:

$$T_U(p) = \frac{p^n}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_0} = \frac{p^n}{D(p)}. \quad (7)$$

Здесь $D(p)$ – полином Гурвица.

При увеличении порядка фильтра модуль $T_U(j\omega)$ в диапазоне низких частот уменьшается. При этом уменьшается значение $\text{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega)\}^2$, следовательно, снижаются потери мощности в этом диапазоне.

Дополнительные возможности для снижения потерь и увеличения избирательности дает включение резонансных контуров в поперечные или продольные ветви фильтра. При замене индуктивности одной из поперечных ветвей последовательным LC -контуром с операторным сопротивлением $Z(p) = L(p^2 + \omega_0^2)/p$ (рис. 10) передаточная функция $T_U(p)$ будет иметь нуль на частоте резонанса $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$

$$T_U(p) = \frac{p^{n-1}(p^2 + \omega_0^2)}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_0}.$$

Одновременно уменьшается и входное сопротивление четырехполюсника на частоте ω_0 . Соответственно, уменьшается мощность, потребляемая фильтром. Такой же эффект снижения мощности дает замена одиночного конденсатора в продольной ветви параллельным резонансным контуром.

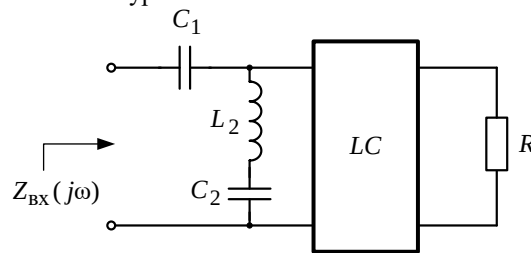


Рисунок 10. Лестничный фильтр с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 10. Ladder filter with resonant circuit in the shunt branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Заметим, что фильтр С-типа на рисунке 6 представляет собой простейший вариант лестничного фильтра, в котором в поперечную ветвь включен резонансный контур.

На рисунке 11 представлен модифицированный вариант ШПФ 3 порядка, в котором реактор в поперечной ветви заменен резонансным контуром. Отличие от фильтра С-типа заключается в том, что последовательно с резистором включен дополнительный конденсатор небольшой емкости. Это позволяет значительно улучшить избирательность фильтра.

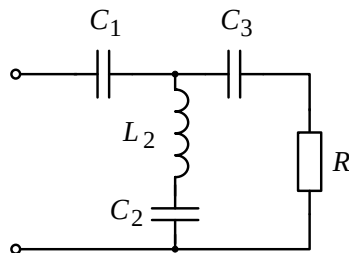


Рис. 11. ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в поперечной ветви

Fig. 11. Third-order filter with resonant circuit in the shunt branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Замена конденсатора в продольной ветви лестничной схемы последовательным LC -контуром дает дополнительную возможность варьировать частотные характеристики фильтра в полосе ослабления. Схема демпфированного фильтра с резонансным контуром $C_1 - L_1$ в продольной ветви (рис. 12) предложена в [12, 16]. Частотная характеристика фильтра имеет минимумы на частотах 5 и 11-й гармоник.

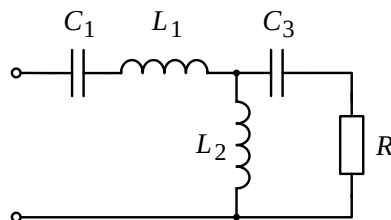


Рис. 12. Демпфированный фильтр, предложенный в [12, 16] Fig. 12. Damped high passive filter, proposed in [12, 16]

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Дополнительный реактор L_1 , включенный последовательно с основным конденсатором C_1 в схеме на рисунке 12, должен быть рассчитан на полный ток фильтра. Это является серьезным недостатком демпфированного фильтра на рисунке 12. Новый вариант фильтра третьего порядка с резонансным контуром $C_3 - L_3$ в продольной ветви показан на рисунке 13. В этом случае ток в дополнительном реакторе L_3 значительно меньше, чем в предыдущей схеме.

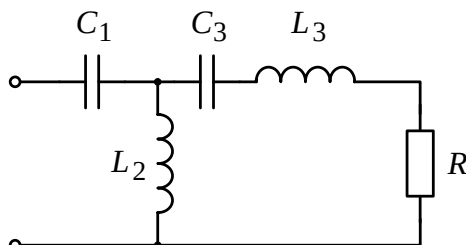


Рис. 13. Лестничный фильтр с резонансным контуром в продольной ветви Fig. 13. Third-order filter with resonant circuit in the series branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Оптимизация характеристик широкополосных фильтров. Как правило, расчет ШПФ 2 порядка и фильтров С-типа проводится с помощью аналитических соотношений [6, 7, 14, 17-19]. Однако для фильтров 3-4 порядка расчетные соотношения становятся очень громоздкими, поэтому для проектирования ШПФ целесообразно использовать численные методы. Процедура оптимизации характеристики ШПФ заключается в определении параметров реактивного четырехполюсника, при которых целевая функция, определяемая выражением (8), минимальна

$$\Phi(\bar{x}) = \sum_{(k)} \frac{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})|^2}{|Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_c(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i\} \quad (8)$$

В формуле (8) $Z_{\Phi}(j\omega_k, \bar{x})$, $Z_c(j\omega_k)$ – комплексные сопротивления фильтра и сети на частоте ω_k ; J_k – k -я гармоника тока, генерируемого нелинейной нагрузкой.

Пассивный фильтр, имеющий минимальное значение целевой функции, определяемой выражением (8), обеспечивает уменьшение искажений тока во внешней сети. В отличие от аналитических методов использование методов оптимизации даст возможность учесть при определении параметров фильтра спектр тока нелинейной нагрузки и влияние внешней сети.

Для ограничения активной мощности, потребляемой фильтром на частоте сети, используется ограничение-неравенство

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{\text{вх}}(j\omega_1)\}}{|Y_{\text{вх}}(j\omega_1)|} \leq \eta_0. \quad (9)$$

В соответствии с (9) коэффициент мощности фильтра не должен превышать значение η_0 .

В табл. 1 приведены параметры ШПФ 3 и 5, полученные в результате оптимизации с помощью пакета Optimization Toolbox программного комплекса MatLab. Частота настройки фильтров составляет 250 Гц.

Таблица 1
Table 1

Параметры ШПФ 3 и 5 порядка Element values of broadband filters						
Порядок фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	L_4 , мГн	C_5 , мкФ	R, Ом
3	1,0	330,49	0,26	-	-	1175
5	1,0	307,8	0,215	495,6	0,47	1175

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Значения элементов, представленные в таблице 1, можно использовать для расчета ШПФ, обеспечивающих компенсацию заданной величины реактивной мощности. Для этого необходимо рассчитать емкость основного конденсатора и провести масштабирование параметров фильтра.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

В настоящем разделе проведено сравнение характеристик широкополосных демпфирующих фильтров, рассмотренных выше. Фильтры имеют одинаковую емкость основного конденсатора и, следовательно, одинаковую реактивную мощность. Рассмотрим две группы фильтров.

Широкополосный фильтр второго порядка и фильтр С-типа.

Значения элементов фильтров, имеющих частоты настройки 150 и 250 Гц, приведены в таблице 2. Частотные характеристики показаны на рисунке 14. Добротность фильтров одинакова и равна 2.

Таблица 2

Table 2

Значения элементов ШПФ 2 порядка
The parameters of the second-order broadband filters

Тип фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_2 , мкФ	R_d , Ом
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 5$	3,79	350	-	1400
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 5$	3,79	107	-	850
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	3,79	297	-	560
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	3,79	107	-	340
С-фильтр $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	3,79	297	34,5	560
С-фильтр $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	3,79	107	91	340

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

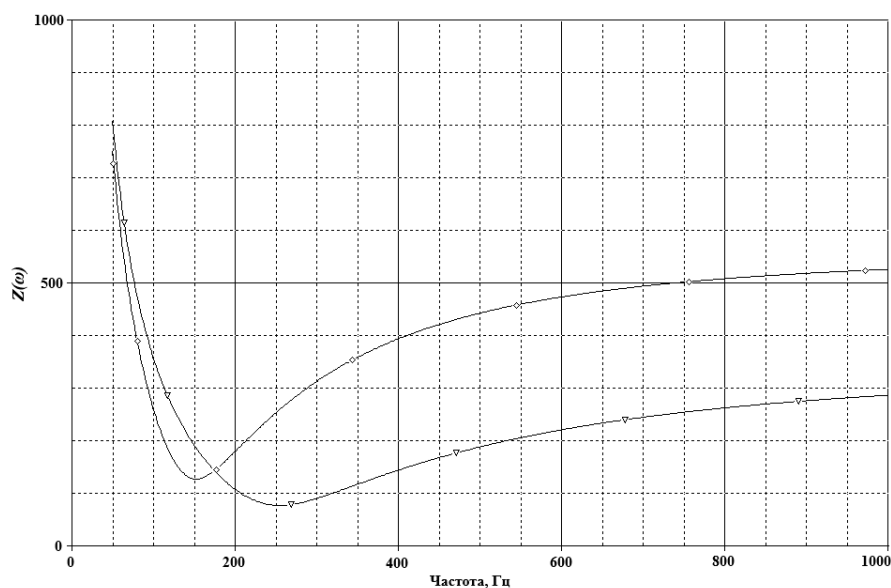


Рис. 14. Частотные характеристики ШПФ 2 порядка
Fig. 14. The impedance characteristics of 2-order BBF

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

В соответствии с рисунком 14 снижение частоты настройки сопровождается увеличением сопротивления в полосе ослабления, при $f > f_H$. Поэтому ШПФ 2 порядка нецелесообразно использовать для ослабления мощных гармоник низкочастотного диапазона.

Частотные характеристики фильтров С-типа практически не отличаются от характеристик ШПФ 2 порядка.

Потери мощности в фильтре равны активной мощности, потребляемой демпфирующим резистором и реакторами. Результаты расчета потерь для различных вариантов ШПФ второго порядка и фильтров С-типа приведены в таблице 3. Напряжение на входе фильтра равно 10 кВ. Добротности реакторов приняты равными 40.

Таблица 3

Table 3

Потери мощности в фильтрах 2 порядка
Power losses in second-order broadband filters

Тип фильтра	Потери в демпфирующем резисторе, Вт	Потери в реакторах, Вт	Суммарные потери, Вт
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	2650	410	3060
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	505	130	635
ШПФ 2 порядка $f_H = 150$ Гц, $Q = 5$	1610	510	2120
ШПФ 2 порядка $f_H = 250$ Гц, $Q = 5$	205	130	335
С-фильтр $f_H = 150$ Гц, $Q = 2$	0	490	490
С-фильтр $f_H = 250$ Гц, $Q = 2$	0	326	326

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

При уменьшении частоты настройки активное сопротивление ШПФ 2 порядка на основной частоте увеличивается. Это вызывает рост потерь мощности как в демпфирующем резисторе, так и в реакторе. Таким образом, ШПФ 2 порядка целесообразно использовать для ослабления высокочастотных гармоник. Последовательный колебательный контур $L - C_2$, включенный параллельно демпфирующему резистору в схеме фильтра С-типа (Рисунок 6), обеспечивает минимальные потери мощности в резисторе. Однако, согласно формуле (4), емкость вспомогательного конденсатора увеличивается пропорционально квадрату отношения $\left(\frac{\omega_n}{\omega_1}\right)$, поэтому емкость вспомогательного конденсатора быстро растет при увеличении частоты настройки. Поэтому фильтры С-типа целесообразно использовать для компенсации низкочастотных гармоник ($n = 3, 5$), когда отношение частоты настройки и основной частоты невелико.

Широкополосные фильтры лестничной структуры 3 и 5 порядка. Значения элементов лестничных ШПФ 3 и 5 порядка приведены в таблице 4. На рисунке 15 показаны частотные характеристики фильтров. Здесь же показана характеристика модифицированного ШПФ 3 порядка, в котором продольная индуктивность заменена последовательным резонансным контуром (рис. 13). Фильтры имеют одинаковую частоту настройки f_H , равную 250 Гц.

Таблица 4

Table 4

Значения элементов лестничных широкополосных фильтров

The parameters of the ladder broadband filters

Вид фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	$L_4, (L_3)$, мГн	C_5 , мкФ	R_d , Ом
ШПФ 3 порядка	3,79	87,2	0,983	-	-	310
ШПФ 5 порядка	3,79	81,2	0,815	130,8	1,78	310
ШПФ с резонансным контуром в продольной ветви	3,79	86,7	0,815	37,3	-	350

Частотные характеристики, представленные на рисунке 15, ясно показывают, что увеличение порядка фильтра позволяет повысить избирательность его характеристик. Однако в полосе ослабления частотная характеристика фильтра 3 порядка может иметь максимум, обусловленный резонансом в параллельном контуре $L - C_2$. Сопротивление ШПФ в полосе ослабления можно снизить, увеличив порядок схемы. Дополнительные возможности для регулирования частотной характеристики в полосе ослабления обеспечивает включение резонансного контура в продольную ветвь фильтра, как показано на рисунках 12 и 13.

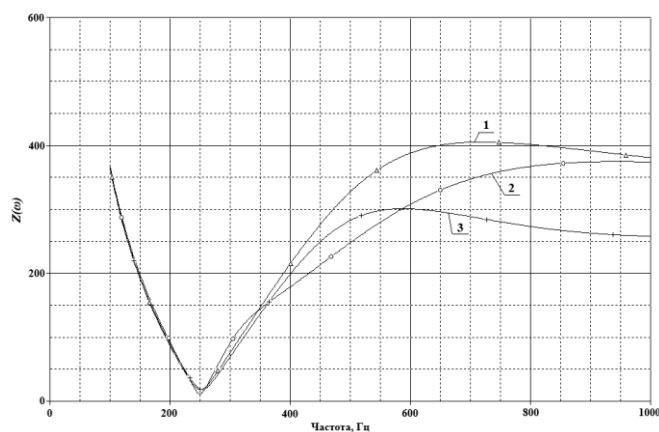


Рис. 15. Частотные характеристики лестничных ШПФ 1 – фильтр 3 порядка, 2 – фильтр 5 порядка, 3 – фильтр с резонансным контуром в продольной ветви (Рисунок 13)

Fig. 15. The impedance characteristics of ladder broadband filters 1 – 3-order filter, 2 – 5-order filter, 3 – 3-order filter with resonant circuit in the series branch

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Потери мощности в демпфирующих резисторах и реакторах лестничных ШПФ 3 – 5 порядка на частоте основной гармоники представлены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Потери мощности в лестничных широкополосных фильтрах

Power losses in ladder broadband filters

Тип фильтра	Потери в демпфирующем резисторе, Вт	Потери в реакторах, Вт	Суммарные потери, Вт
ШПФ 3 порядка	4	108	112
ШПФ 5 порядка	0	108	108
ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в поперечной ветви (рисунок 11)	0	100	100
ШПФ 3 порядка с резонансным контуром в продольной ветви (рисунок 14)	5	108	113

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Анализ показывает, что увеличение порядка ШПФ сопровождается повышением их избирательности и снижением активного сопротивления на частоте основной гармоники. Соответственно, уменьшаются потери мощности на этой частоте. Эффективным средством уменьшения потерь мощности в демпфирующем резисторе является использование последовательного резонансного контура в поперечной ветви лестничного фильтра.

Для оценки эффективности широкополосных фильтров рассмотрим их использование в системе регулируемого электропривода установки, получающей питание по линии электропередачи напряжением 10 кВ. Необходимо обеспечить компенсацию характеристических и нехарактеристических гармоник в диапазоне частот 250-1000 Гц. Мощность устройства равна 650 квар (на фазу). Параметры компонентов рассмотренных вариантов фильтров представлены в табл. 6.

Таблица 6

Table 6

Параметры компонентов ШПФ
The parameters of broadband filters

Вид фильтра	C_1 , мкФ	L_2 , мГн	C_3 (C_2), мкФ	L_3 , мГн	R_d , Ом
ШПФ 2 порядка	52,0	7,8	-	-	65
Фильтр С-типа	52,0	7,8	1300	-	65
ШПФ 3 порядка	52,0	6,35	13,5	-	23
ШПФ с резонансным контуром в продольной ветви	52,0	6,35	11,18	2,72	26

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Частотные зависимости коэффициента передачи токов (рисунок 16) показывают, что фильтр 3 порядка и его модификация обеспечивают эффективную компенсацию наиболее мощных гармоник тока нагрузки в диапазоне 250 – 1000 Гц.

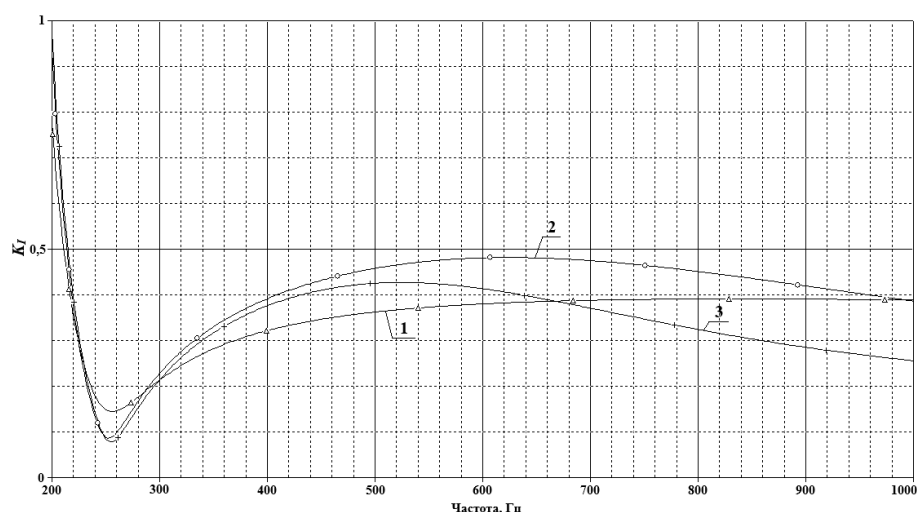


Рис. 16. Графики коэффициента передачи токов 1 – фильтр 2 порядка, 2 – фильтр 3 порядка, 3 – фильтр с резонансным контуром в продольной ветви (Рисунок 13)

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Гармонические составляющие тока нелинейной нагрузки, передаваемые в сеть (в процентах от тока основной гармоники), представлены в таблице 7.

Таблица 7
Table 7

Гармоники тока в сети The line current spectrum					
Тип фильтра	5	7	11	13	17
Без фильтра	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5
ШПФ 2 порядка ($Q = 5$)	2,6	3,1	1,67	1,1	0,6
ШПФ 3 порядка	1,5	3,6	2,1	1,4	0,4
ШПФ с рез. контуром в продольной ветви (Рисунок 14)	1,5	3,5	1,9	1,1	0,4

Источник: составлено автором Source: compiled by the author

Таким образом, новые варианты широкополосных демпфирующих фильтров 3 – 5 порядка обеспечивают эффективное ослабление высших гармоник в заданном диапазоне частот и коррекцию частотных характеристик сети.

Следует учитывать, что увеличение порядка фильтра сопровождается ростом его стоимости. В качестве базовой структуры ШПФ, обеспечивающего требуемые компенсационные характеристики, целесообразно использовать лестничный фильтр 3 порядка (рис. 5). Сопротивление фильтра в полосе ослабления можно регулировать с помощью резонансного контура, включенного в продольную ветвь (рис. 13). В фильтрах, осуществляющих подавление гармоник низкого порядка, для снижения потерь мощности целесообразно заменить реактор поперечной ветви последовательным резонансным контуром (рис. 11).

Заключение (Conclusions)

В статье рассмотрена процедура проектирования широкополосных демпфирующих фильтров, осуществляющих снижение негативного влияния мощных нелинейных нагрузок на режимы электрических сетей. Показано, что ШПФ различного порядка можно рассматривать как варианты общей структуры в форме реактивного четырехполюсника, нагруженного на демпфирующий резистор. Определены требования к структуре ветвей четырехполюсника, при выполнении которых достигается требуемая селективность характеристик и минимизируются потери мощности в компонентах фильтра.

Процедура проектирования ШПФ, рассмотренная в статье, основана на использовании методов оптимального синтеза линейных цепей. При оптимизации характеристик фильтра учитывается спектральный состав токов искажающих потребителей, а также влияние сети.

Сравнение характеристик ШПФ показало, что новые варианты фильтров, предложенные в статье, имеют значительные технико-экономические преимущества перед традиционными фильтрами 2 порядка и фильтрами С-типа. Увеличение порядка позволяет повысить избирательность фильтров, улучшить их компенсационные характеристики. Использование новых конфигураций компенсирующих устройств позволит снизить негативное влияние мощных нелинейных потребителей на режимы электрических сетей.

Литература

1. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов и др.; под ред. Ю. В. Шарова. – 3-е изд., – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – 347 с.
2. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
3. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
4. Nassif A. Assessing the Impact of Harmonics and Interharmonics of Top and Mudpump Variable Frequency Drives in Drilling Rigs. – IEEE trans. on Industry Applications. 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 5574-5583.
5. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE transactions on industry applications. 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 973-983.
6. Das J. Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives – A Case Study. – IEEE trans. on Industry Applications. 2015, Vol. 51, No. 2, pp. 1417-1426.
7. Wang Y., Chen P., Xu W., et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. IEEE trans. on Power Delivery. 2022, Vol. 37, No. 5, pp. 4212-4226.
8. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями. Электротехника, 2020, № 5, с. 47-51.
9. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., и др. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
10. Xu W., Ding T., Li X., et al. Resonance-free shunt capacitors: configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. № 5. pp. 2287–2295.
11. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for third-order high-pass filter. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 31, No. 1, 2016, pp. 402, 403.
12. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
13. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В., и др. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров. Электричество, 2018, № 12, с. 14-21.
14. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
15. Khattab N., El'Gharably A., Sayed M., T. et al. Optimal Multi-Objective Design of Anti-Resonance Fourth-Order Passive Power Filters Using TOPSIS-Based NSGA in Distorted Distribution Systems. 2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Kafrelshiekh University, Egypt 13-15 December 2022.
16. Li X., Xu W. A Novel Filter to Mitigate Interharmonic Problems Caused by Variable Frequency Drives. IEEE PEDS 2017, pp. 887 – 892.
17. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
18. Lamlom A. Ahmed Ibrahim, Balc A., et al. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/ICPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
19. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
20. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.

21. Xu S., Wang Y., Xiao X., et al. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2022, Vol. 37, no. 2, pp. 755-764.
22. Zhang G., Wang Y., Xu W., et al. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72

Авторы публикации

Довгун Валерий Петрович – д-р техн. наук, профессор кафедры Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. E-mail: vdovgun55@mail.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент Сибирского федерального университета. E-mail: denis.egorov.90@br.ru.

Боярская Наталия Петровна – канд. техн. наук, доцент кафедры ТОЭ Красноярского государственного аграрного университета. E-mail: bnp2006dvg@mail.ru

Синяговский Артем Феликсович – канд. техн. наук, доцент кафедры Систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования Сибирского федерального университета. E-mail: daily@bk.ru

Рыжов Никита Андреевич – аспирант Сибирского федерального университета. E-mail: ryzhov.nikita.andreevich@mail.ru.

References

1. Upravlenie kachestvom elektroenergii /I. I/ Kartashev, V.N. Tulskey, R.G. Shamonov I dr.; pod red, Uy.V. Sharova. – 3-e izd., – M.: Izdatelckiy dom MEI, 2017. – 347 s.
2. Nassif A. D., Xu W., Freitas W. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. – IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 3, 2009, pp. 1710-1718.
3. Das J. Passive filters – potentialities and limitations. – IEEE trans. on industry applications. Vol. 40, No. 1, January/February, 2004, pp. 232-241.
4. Nassif A. Assessing the Impact of Harmonics and Interharmonics of Top and Mudpump Variable Frequency Drives in Drilling Rigs. – IEEE trans. on Industry Applications. 2019, Vol. 55, No. 5, pp. 5574-5583.
5. Badrzadeh D., Smith K., Wilson R. Designing passive harmonic filters for an aluminum smelting plant. IEEE transactions on industry applications. 2011, Vol. 47, No. 2, pp. 973-983.
6. Das J. Design and Application of a Second-Order High-Pass Damped Filter for 8000-hp ID Fan Drives – A Case Study. – IEEE trans. on Industry Applications. 2015, Vol. 51, No. 2, pp. 1417-1426.
7. Wang Y., Chen P., Xu W., et al. A comprehensive investigation on the selection of high-pass harmonic filters. IEEE trans. on Power Delivery. 2022, Vol. 37, No. 5, pp. 4212-4226.
8. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V.V. Shirokopolosnye silovye filtry dlay system elektrosnabzheniya s mnogofaznymi preobrazovatelaymi. Elektrotekhika, 2020, № 5, s. 47-51.
9. Egorov D.E., Dovgun V. P., Boyarskaya N.P., et al. Power factor correction in power delivery systems with multipulse nonlinear loads. // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI, 2020. T. 22. № 6. S. 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.
10. Xu W., Ding T., Li X., et al. Resonance-free shunt capacitors: configurations, design methods and comparative analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, 2016. V. 31. №. 5. pp. 2287–2295.
11. Ding T., Xu W., Liang H. Design method for third-order high-pass filter. – IEEE trans. on power delivery, Vol. 31, No. 1, 2016, pp. 402, 403.
12. Li X., Xu W., Ding T. Damped high passive filter – a new filtering scheme for multipulse rectifier systems. – IEEE transactions on power delivery, Vol. 32, No. 1, 2017, pp. 117-124.
13. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V.V., et al. Parametritcheskiy sintezshirokopolusnykh shirokopolosnykh silovykh filtrov. Elekhrichestvo, 2018, № 12, s. 14-21.
14. Wang Y., Xu S., Xu W., et al. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
15. Khattab N., El’Gharably A., Sayed M., T. et al. Optimal Multi-Objective Design of Anti-Resonance Fourth-Order Passive Power Filters Using TOPSIS-Based NSGA in Distorted Distribution Systems. 2022 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Kafrelshiekh University, Egypt 13-15 December 2022.
16. Li X., Xu W. A Novel Filter to Mitigate Interharmonic Problems Caused by Variable Frequency Drives. IEEE PEDS 2017, pp. 887 – 892.

17. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – *Energies*, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
18. Lamlo A. Ahmed Ibrahim, Balci A., et al. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In *Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/ICPS Europe)*, Milan, Italy, 6–9 June 2017.
19. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, *IEEE Trans. Power Delivery*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
20. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, *Electric Power Systems Research*, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.
21. Xu S., Wang Y., Xiao X., et al. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. *IEEE Trans. Power Delivery*, 2022, Vol. 37, no. 2, pp. 755-764.
22. Zhang G., Wang Y., Xu W., et al. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – *IEEE power and energy technology systems journal*. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72

Authors of the publication

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Nataliya P. Boyarskaya – Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russia.

Artyom F. Sinyagovsky – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Nikita A. Ryzhov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика.

Получено **13.12.2023 г.**

Отредактировано **25.12.2023 г.**

Принято **09.01.2024 г.**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.175.8

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-93-106

ТЕПЛОВЫЕ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНО-КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ В СОСТАВЕ ПАРОТУРБИННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БЛОКА

Боруш О.В., Григорьева О.К., Францева А.А.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-0872>, olesyaborush@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть возможность применения воздушного конденсатора как альтернативный вариант использования в системах технического водоснабжения на электростанциях. В связи с возросшим потреблением воды тепловыми электрическими станциями и как следствие увеличением экологических проблем как в странах с ограниченным количеством источников водоснабжения, так и в странах, которые располагают достаточными запасами пресной воды. Представить методику расчета основных характеристик конденсатора (конденсаторных и дефлегматорных секций), оценить аэродинамические сопротивления и мощность вентилятора для конденсатора с воздушным охлаждением в составе паротурбинного энергоблока. Выявить влияние температуры воздуха и давления в конденсаторе на расчет воздушного конденсатора. Разработать рекомендации по выбору параметров воздушных конденсаторов, работающих в составе паротурбинных энергоблоков. МЕТОДЫ. При расчете воздушно-конденсаторной установки использованы методы проектирования теплообменных аппаратов, моделирования и интенсификации теплообменных процессов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана методика расчета конденсаторной установки с воздушным охлаждением для конденсационной турбины мощностью 110 МВт. Приведен анализ расчетов коэффициента теплопередачи, теплообменной площади поверхности конденсаторной установки в зависимости от давления пара в конденсаторе. Сформулированы рекомендации для выбора мощности вентилятора в конденсаторной установке и расчетной температуры воздуха охлаждающего. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Вопрос применения аппаратов воздушного охлаждения в энергетике пока мало освещен в литературе, однако экологические проблемы и нехватка пресной воды становится все более актуальной по всему миру. Развитие систем воздушного охлаждения весьма актуальный вопрос для современной энергетики. В статье показано, что для конденсации водяного пара в стационарных установках теплообменных секций более выгодно располагать в шатровой компоновке и при этом расположением вентиляторов должно быть нижним. Даны количественные оценки изменения коэффициента теплопередачи и площади теплообменной поверхности для диапазона давлений 8...20 кПа. Потребляемая мощность вентилятора существенно зависит от температуры охлаждающего воздуха и вакуума в конденсаторе.

Ключевые слова: воздушный конденсатор; дефлегматор; теплопередача; мощность; вентилятор.

Для цитирования: Боруш О.В., Григорьева О.К., Францева А.А. Тепловые и аэродинамические характеристики воздушно-конденсационной установки в составе паротурбинного энергоблока // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 93-106. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-93-106.

THERMAL AND AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AIR COOLED CONDENSER FOR STEAM TURBINE POWER UNIT

Borush OV., Grigoryeva OK., Frantseva AA.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5080-0872>, olesyaborush@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Increased water consumption at power plants leads to a deterioration of the environmental situation not only in countries with limited water supply sources, but also in countries with significant reserves of fresh water. There is a need to consider the possibility of using an air condenser as an alternative use in industrial water supply systems at a power plant. To present a methodology for calculating the main characteristics of a condenser (condensation and reflux sections), to estimate the aerodynamic resistance and fan power for an air-cooled condenser as part of a steam turbine power unit. Determine the influence of air temperature and pressure in the condenser on the calculation of the air condenser. To develop recommendations for the selection of parameters of air condensers operating as part of steam turbine power units. *METHODS.* Methods for designing heat exchangers, modeling and intensifying heat exchange processes were used in the course of calculating an air condenser unit. *RESULTS.* A method for calculating an air-cooled condenser for a 110 MW condensing turbine has been developed. The analysis of the calculation of the heat transfer coefficient is given. The analysis of the values of the heat exchange area of the condensing unit is presented. The effect of pressure in the condenser on the main calculated characteristics of the condenser is shown. Recommendations for the selection of the fan capacity in the condenser and the design temperature of the cooling air have been developed. *CONCLUSION.* The issue of using air coolers in the power industry is still poorly covered in the literature, however, environmental problems and the shortage of fresh water are becoming more and more urgent all over the world. The development of air-cooling systems is a very topical issue for modern power engineering. It is shown that for stationary installations of condensation of water vapor, the most suitable is the hipped-roof arrangement of the heat-exchange sections with the lower arrangement of the fans. Quantitative estimates of the change in the heat transfer coefficient and the area of the heat-exchange surface are given for the pressure range of 8...20 kPa. The power consumption of the fan depends significantly on the temperature of the cooling air and the vacuum in the condenser.

Keywords: air cooled condenser; reflux condenser; heat transfer; capacity; fan.

For citation: Borush OV., Grigoryeva OK., Frantseva AA. Thermal and aerodynamic characteristics of air cooled condenser for steam turbine power unit. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 93-106. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-93-106.

Введение и литературный обзор (Introduction)

Развитие тепловых электрических станций (ТЭС) неразрывно связано с наличием необходимого количества воды, часть из которой расходуется на охлаждение основного потока рабочего тела. Существуют различные схемы технического водоснабжения ТЭС. Так, например, прямоточная система, при которой в конденсатор паровой турбины постоянно поступает из водоема свежая холодная вода, ограничено. Кроме того, возможность применения прямоточных систем с каждым годом снижается из-за экологических ограничений [1]. Система оборотного водоснабжения позволяет повторно использовать отработавшую в конденсаторе воду после охлаждения её в атмосферных условиях.

Последнее время большое внимание уделяется экологическим проблемам при функционировании энергетических объектов, не остается без внимания и дефицит охлаждающей воды. Запас объема воды на Земле оценивается на сегодня примерно в $1,39 \cdot 10^9$ км³, доля твердого состояния достигает порядка 70 % и лишь 2,5 % составляют запасы пресной воды [2]. Оставшееся количество пресной воды постоянно снижается вследствие возрастающего использования её для охлаждения и очистки.

При эксплуатации водяных систем охлаждения конденсаторов паротурбинных необходимо также учитывать климатические особенности региона, например, таких как районы Крайнего Севера. В зимний период возникает обмерзание оборудования, что приводит к снижению надежности работы. Уход от системы охлаждения пара водой также позволяет упростить задачу с прокладкой коммуникаций в условиях вечной мерзлоты.

Экономия водных ресурсов и применение альтернативных вариантов – направление весьма актуальное для современной энергетики [3]. С этой точки зрения большой интерес представляют системы конденсации пара с применением окружающего воздуха в качестве охладителя, например, такие как воздушно-конденсационная установка (ВКУ). В течение долго времени такие установки в зарубежной энергетике применялись в составе турбин малой мощности – от 1 до 15 МВт, и только лишь в 1968 году впервые был использован с более мощной паровой турбиной в 150 МВт. В настоящее время установки с ВКУ получили достаточно широкое применение [4, 5, 6]. В таблице 1 представлены действующие электростанции с воздушно-конденсационной установкой, введенные в эксплуатацию в течение последних двух десятилетий.

Таблица 1

Table 1

Функционирующие электростанции с системой воздушного охлаждения*

Operating power plants with air cooling system

Электростанция	Мощность энергоблоков, МВт	Страна	Год установки
Babelan	280	Индонезия	2015
Fujian Henglian	1320	Китай	2015
Tuyou 2	1320	Китай	2015
Hami Danahu	1320	Китай	2014
Wyodak	330	США	2011
Rio Turbio	240	Аргентина	2010
Rehab	300	Иордания	2006

* Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Анализ рынка оборудования показал, что основными производителями конденсаторов с воздушным охлаждением являются иностранные компании GEA EGI (Венгрия), FBM Hudson Italiana S.p.A. (Италия), Bronswerk Heat Transfer (Нидерланды), Creusot-Loire (Франция) и др. Среди российских производителей ВКУ лидируют ПАО «Калужский турбинный завод», АО «Машиностроительный завод» (АО «ЗиО»), ООО «Октябрьскхиммаш», АО «ЗиО-Подольск», ПАО «Уралхиммаш», АО «Инжиниринговая компания «ЗИОМАР»», ООО «Опытно-экспериментальный завод БЕЛЭНЕРГОМАШ» и др.

Производством вентиляторов для конденсационных установок воздушного типа занимаются: ООО «НПО «Кондиционер»», группа компаний «Гидроаэроцентр», АКВАНН, «Гидросервис», ООО «ИВК-Сервис».

Анализ данных по производителям, показал, что преимущественно теплообменные аппараты с воздухом в качестве охладителя ранее изготавливали только предприятия химического оборудования. Увеличение дефицита пресной воды, применяемой на тепловых электрических станциях в качестве основного охлаждающего теплоносителя, привело к развитию исследований и внедрению технологии воздушного охлаждения на объектах энергетики. Например, такие производители энергетического оборудования, как ПАО «Калужский турбинный завод», АО «ЗиО-Подольск», АО «Машиностроительный завод», АО «Инжиниринговая компания «ЗИОМАР»», осваивают сегодня ВКУ.

Опыт применения воздушных установок для конденсации пара в промышленности и зарубежный опыт, представленный в литературе [6-12], позволяет успешно развивать внедрение технологии воздушного охлаждения на паротурбинных энергоустановках [6, 13-15]. Один из самых часто встречающихся вариантов компоновки секций установок воздушной конденсации представлен на рисунке 1. Поверхность теплопередачи представлена в виде секций, формируемых в конструкцию по типу шатра [5, 7, 15, 16]. Секции состоят из двух отдельных панелей, имеющих характерную конструкцию, при этом они разделяются на, так называемые, рабочие (конденсаторные) и дефлегматорные ступени конденсации.

Теплообменные поверхности дефлегматорной части и рабочей ступени состоят, как правило, из труб круглой или эллиптической формы, при этом длина дефлегматорных труб короче. Для предотвращения замерзания конденсата, пар подается в трубы дефлегматоров снизу навстречу конденсату, поступающему в сливную емкость. При конденсации пара доля несконденсированного рабочего тела составляет около 15% и этот поток через сливной коллектор поступает в противоточные теплообменные поверхности дефлегматорной части, а основной поток пара конденсируется в рабочих поверхностях. В конструкции воздушного конденсатора вывод неконденсирующихся газов (воздуха) осуществляется через герметичную камеру, расположенную на трубной решетке дефлегматорной части. [8, 14, 18-20].

На металлический каркас секции теплообменных поверхностей крепятся следующим образом: дефлегматоры – в средней части секции, рабочие – с каждой стороны от дефлегматоров. Исследования других авторов показывают, что наиболее эффективный теплообмен достигается, если панели секций расположены в шатре под углом $45^\circ - 65^\circ$. [3, 17, 19].

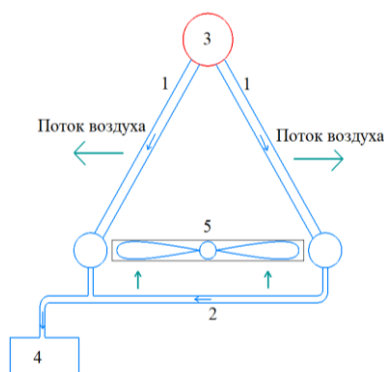


Рис. 1. Воздушный конденсатор, где 1 – поверхность теплообмена (конденсаторные и дефлегматорные секции); 2 – сконденсировавшийся пар; 3 – распределительный патрубок; 4 – коллектор сбора конденсата, 5 – вентилятор

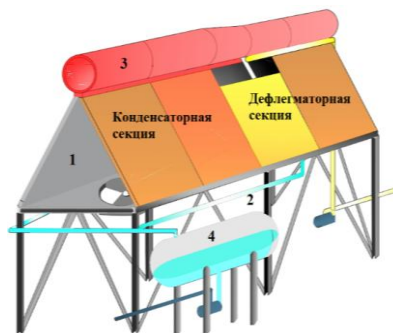


Fig. 1. Air cooled condenser, where 1 – heat exchange surface (condensing and refluxing section); 2 – steam condensate; 3 – distribution pipe; 4 – condensate collector; 5 – fan

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Одним из направлений исследования ВКУ является процесс теплообмена как в установки в целом, так и в отдельных ее элементах. По результатам исследований [11, 12] при использовании гибридного ВК в паротурбинных установках цикла Ренкина теплоотдача дефлегматорных секций возрастает в 4,7 раза. Для воздушного конденсатора, работающего на ОРС, необходимо при расчете теплообмена учитывать поправочные коэффициенты [21]. Авторами в [22] рассмотрен способ интенсификации теплообмена воздушных теплообменников, который позволяет повысить энергоэффективность независимо от срока эксплуатации.

Многие исследователи предлагают меры против неблагоприятного воздействия ветра, которое ухудшает характеристики конденсатора, в статьях [7, 8, 17] рассмотрены совершенствование конструкции ВКУ, а в работах [9, 10] приводятся решения многокритериальной оптимизации по смягчению последствий ветра для конденсатора.

Вопросы влияния аэродинамических характеристик и выбор мощности вентилятора приведены в [14, 22, 23]. Применение тихоходных двигателей положительно сказывается на эффективности работы ВКУ. Показано, что реальные расходно-напорные характеристики заводов-изготовителей не всегда соответствуют эксплуатационным.

Цель работы – получить численные оценки влияния температуры воздуха и давления в конденсаторе на коэффициент теплопередачи, теплоотдачи, гидравлические сопротивления; расширить информационную базы для разработки рекомендаций по выбору параметров воздушных конденсаторов, работающих в составе паротурбинных энергоблоков

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом исследования был выбран конденсационный энергоблок мощностью 110 МВт, предполагаемое место функционирования – северные районы со среднегодовой температурой -5°C [19, 20]. Основные исходные данные, принятые при расчете воздушно-конденсационной установки, приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Исходные данные для расчета воздушного конденсатора*
Initial data for calculating an air condenser

Наименование	Единицы измерения	Значение			
Давление в конденсаторе	кПа	8	10	15	20
Расход водяного пара	кг/с	96,17			
Энтальпия водяного пара на входе в конденсационную установку	кДж/кг	2576,2	2584	2392	2425,6
Температура насыщения	$^\circ\text{C}$	41,51	45,81	53,97	60
Энтальпия конденсата на выходе из конденсационной установки	кДж/кг	173	192	226	251

Продолжение таблицы 2. *Continuation of Table 2*

Наименование	Единицы измерения	Значение
Количество ходов пара по теплообменным поверхностям		1
Охлаждающий теплоноситель		воздух
Начальная температура охлаждающего теплоносителя	°C	-5

* *Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

При давлении в конденсаторе менее 8 кПа прирост мощности оказывается меньшим, чем дополнительное потребление энергии вентиляторами. Таким образом, отпуск электроэнергии потребителя при снижении давления в конденсаторе менее 8 кПа уменьшается при одновременном росте размеров поверхности теплообмена. Иными словами, давление 8 кПа для заданных расчетных условий является нижним техническим пределом при выборе давления конденсации. Эксплуатация ВКУ при плюсовых температурах окружающего воздуха может привести к необходимости снижения расхода пара и, как следствие, снизится мощность турбины, чтобы поддерживать давление конденсации в допустимых рабочих пределах [8, 19, 20]. Максимально допустимое значение давления по условиям работы последних ступеней и выхлопного патрубка турбины является верхним техническим пределом при выборе давления конденсации.

Применяя пучки оребренных труб, можно развить площадь поверхности теплообмена со стороны воздуха и тем самым скомпенсировать относительно низкие коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха по сравнению с коэффициентами теплоотдачи для охлаждаемых или конденсируемых технологических жидкостей.

Преимуществом эллиптических труб является тот факт, что аэродинамическое сопротивление при поперечном обтекании воздухом таких форм меньше, чем труб круглого сечения [6, 7, 18, 24, 25]. Данное преимущество дает возможность в случае равных потерь напора в трубном пучке конденсатора получить больше скорость течения воздуха, вследствие чего повышается удельный теплосъем с поверхности теплообмена. Эллиптическая форма труб также позволяет сократить площадь, занимаемую конденсационной установкой, из-за более компактной компоновки со стороны обтекаемого воздуха. Более того, при работе воздушных конденсаторов в суровом климате, овальная форма труб имеет эксплуатационное преимущество. Так, в случае замерзания в трубах конденсата они расширяются в сторону своей меньшей оси, принимая круглую форму, без потери плотности.

При расчете поверхности теплообмена и геометрии секций конденсатора с воздушным охлаждением принимались эллиптические трубы с эллиптическим оребрением с соотношением осей 4:1, на рисунке 2 пример трубы представлен схематично [19, 20].

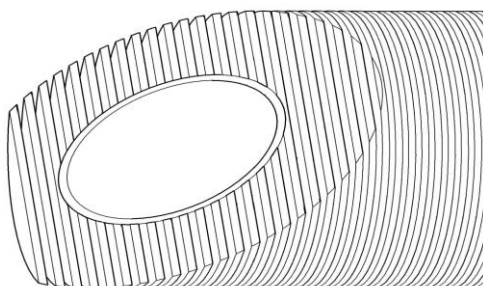


Рис. 2. Теплообменная труба эллиптической формы с оребрением эллиптическим

* *Источник: составлено автором*

Fig. 2. Elliptical-shaped heat exchange tube with elliptical fins

* *Source: compiled by the author*

Расчет конструктивных и аэродинамических характеристик конденсатора с воздушным охлаждением выполняется методом последовательных итераций. На рисунке 3 представлен алгоритм расчета для конденсаторных секций, дефлегматорные рассчитываются аналогично. Некоторые результаты расчета конденсатора с воздушным охлаждением были представлены авторами в более ранних работах [19, 20].

Определение размеров эллиптических труб, их количества и коэффициент оребрения поверхности труб проводится на основе методов проектирования теплообменных аппаратов и интенсификации теплообменных процессов [5, 6, 19, 24-26].

При расчете коэффициента теплопередачи учитывается поверхность теплообмена, к которой он отнесен, например, это может быть поверхность гладкой трубы по основанию ребер или полная поверхности оребрения. В зависимости от того, к какой поверхности теплообмена трубы отнесен коэффициент теплопередачи в воздушной конденсационной установке, его значения могут быть разными. И, соответственно, площадь поверхности, рассчитанная из уравнения теплообмена, также будет разной. Предлагается оценивать коэффициент теплопередачи относительно полной наружной площади поверхности оребрения. Тогда для эллиптической трубы с оребрением коэффициент теплопередачи, определяется по уравнению:

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_{\Pi}} \phi + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \phi + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} \right]^{-1},$$

где α_{Π} – конвективный коэффициент теплоотдачи с внутренней стороны трубы; $\alpha_{\text{в}}$ – приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи от оребрения к воздуху, отнесенный к полной поверхности оребрения; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки теплообменной трубы; $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенок теплообменной трубы; ϕ – коэффициент увеличения площади оребренной поверхности.



Рис. 3. Блок-схема методики расчета конденсаторных секций ВКУ* Fig. 3. Flow chart of the calculation method for the condenser sections of an Air-Cooled Condenser*

* Источник: составлено автором

* Source: compiled by the author

Конвективный коэффициент отдачи теплоты воздуха для поперечного обтекания шахматных пучков труб заданной формы определяется по формуле:

$$\alpha_{\text{в}} = 0,93 \frac{\lambda}{L} \left(\frac{w_{\text{в}} L}{9} \right)^{0,45} \text{Pr}^{0,33},$$

где L – характерная длина оребренной трубы в поперечном потоке воздуха, $w_{\text{в}}$ – скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка; λ – коэффициент теплопроводности воздуха; 9 – коэффициент кинематической вязкости воздуха; Pr – число Прандтля для воздуха.

Конвективный коэффициент отдачи теплоты для ламинарного и турбулентного режима течения пара и пленки конденсата, при полной или частичной конденсации насыщенного и перегретого пара внутри труб, при опускном движении по длине трубы может быть рассчитан по уравнению:

$$\alpha_{\Pi} = \frac{0,925\lambda}{\text{Re}_{\Pi}^{1/3} L} \left(\sin\Theta + 0,345 \frac{L}{d_3} \cos\Theta \right)^{1/3} \left[1 + \frac{(cAB)^3}{\sin\Theta + 0,345 \frac{L}{d_3} \cos\Theta} \right]^{-1/3},$$

где λ – коэффициент теплопроводности пара; Re_{Π} – число Рейнольдса в выходном сечении трубы, d_3 – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка; A – безразмерный параметр; B и c – коэффициенты.

Тепловая нагрузка конденсатора, определяется из уравнения теплового баланса воздушного конденсатора:

$$Q = G_{\Pi} (h_{\Pi} - h_k) \eta,$$

где G_{Π} – массовый расход пара на входе в конденсатор; h_{Π} , h_k – энтальпии пара и конденсата на входе и выходе из конденсатора соответственно, η – эффективность теплообмена; в расчетах принимается, что 85 % пара конденсируется в конденсаторных секциях, 15 % – в дефлегматорных секциях ВКУ.

Расчетная площадь поверхности воздушного конденсатора определяется как:

$$F_p = \frac{Q}{k \Delta t},$$

Δt – средний температурный напор в конденсаторе.

При поперечном обтекании пучков труб сопротивление рассматривают как сумму местных сопротивлений от внезапного сужения и расширения потока воздуха при движении его по межтрубному пространству z-рядного пакета:

$$\Delta p_B = \Delta p_2 + \Delta p_{y2} + \Delta p'_2,$$

где Δp_2 – потери давления изотермического потока воздуха; Δp_{y2} – потери давления от ускорения потока воздуха вследствие его нагревания; $\Delta p'_2$ – потери давления от самотяги.

Основным компонентом аэродинамической системы конденсатора является вентилятор, через который проходит большой объемный расход воздуха при этом величина напора будет относительно невелика.

Объемный расход воздуха через вентилятор:

$$V_{\text{вр}} = 3600 \chi_{\text{фр}} f_{\text{фр}} w \frac{\rho_{\text{н.у}}}{\rho},$$

где $\chi_{\text{фр}}$ – коэффициент «загромождения» поперечного сечения пучка секции для прохода воздуха; $f_{\text{фр}}$ – фронтальное сечение аппарата; w – скорость воздуха; $\rho_{\text{н.у}}$ – плотность воздуха при нормальных условиях; ρ – плотность воздуха при средней температуре его в секциях.

Потребляемая вентиляторами мощность:

$$N = V_{\text{вр}} \Delta p_B / 3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{вен}},$$

где $\eta_{\text{вен}}$ – коэффициент полезного действия вентилятора.

Результаты (Results)

При проектировании конденсатора с воздушным охлаждением, необходимо задать некоторые технические и конструктивные характеристики не только для самого конденсатора, но и для энергоустановки в целом. Основными характеристиками являются расчетная температура окружающего воздуха, расход конденсирующегося пара и давление конденсации. Естественно, что с уменьшением давления конденсации (при расчетной температуре окружающего воздуха), увеличивается площадь поверхности теплообмена и мощность, потребляемая вентиляторами. Расчеты проводились для давления в конденсаторе от 8 до 20 кПа. Результаты расчетов для эллиптических труб конденсаторных и дефлегматорных секций представлены в таблице 3 при давлении 15 кПа в конденсационной установке. Данное значение давления обусловлено оценкой и анализом величины полезной мощности паровой турбины, которые были выполнены авторами ранее и приведены в работе [19].

Конструктивные особенности труб конденсатора с воздушным охлаждением варьируются в зависимости от принятого расчетного давления конденсации пара, а расход охлаждающего воздуха определяется в зависимости от температуры окружающей среды. Однако, в приведенных расчетах площадь поверхности теплообмена конденсатора принимается постоянной во всех вариантах.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчетов для эллиптических труб конденсаторных и дефлегматорных секций при давлении 15 кПа в воздушно-конденсационной установке*

Results of calculations of condenser and reflux condenser sections with elliptical pipes and a pressure of 15 kPa in an air condenser

Наименование	Обозначение	Единицы измерения	Конденсатная секция	Дефлегматорная секция
Расчетная площадь поверхности теплообмена одной секции	F_p	m^2	635	580
Фронтальное сечение аппарата	$f_{фр}$	м	65,4	71,4
Рабочий расход воздуха через одну секцию	$V_{ср}$	$m^3/ч$	47541	102397,5
Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха	α_v	$Вт/м^2 \cdot K$	25,1	30,73
Коэффициент теплоотдачи со стороны пара	$\alpha_{п}$	$Вт/м^2 \cdot K$	16136,9	14886
Коэффициент теплопередачи	k	$Вт/м^2 \cdot K$	24,34	29,54
Средний температурный напор	ΔT	К	39	42

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Из рисунка 4 видно, что расчетная площадь поверхности теплообмена для одной конденсатной секции изменяется в пределах от 365,25 до 828,6 m^2 , для дефлегматорной секции площадь составляет 331,12...751 m^2 , при этом давление в конденсаторе принято от 8 до 20 кПа.

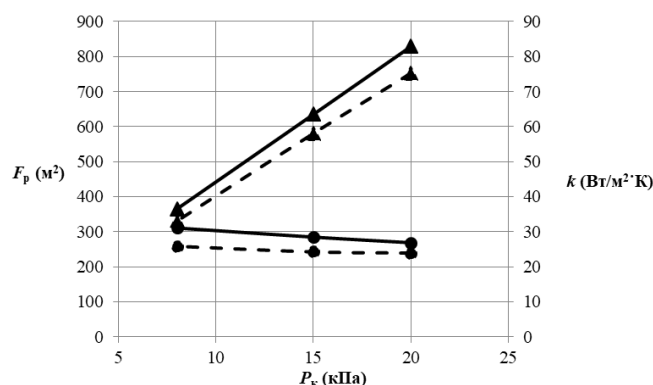


Рис. 4. Расчетная площадь поверхности теплообмена одной секции $F_p (m^2)$ обозначена ▲ и коэффициент теплопередачи $k (W/m^2 \cdot K)$ – ● для конденсатных (—) и дефлегматорных (- - -) секций при различных давлениях в воздушном конденсаторе

* Источник: составлено автором

Fig. 4. The calculated heat exchange surface area of one section $F_p (m^2)$ is indicated by ▲ and the heat transfer coefficient $k (W/m^2 \cdot K)$ is indicated by ● for condensate (—) and dephlegmator (- - -) sections at different pressures in the air condenser*

* Source: compiled by the author

Рекомендуется принимать значение установленной площади поверхности теплообмена одной конденсаторной и дефлегматорной секции на 12...15% превышающее расчетное значение. Такое увеличение по значению обеспечит запас поверхности теплообмена при снижении коэффициента теплопередачи вследствие загрязнения поверхности оребренных труб как внутри, так и снаружи, а также при превышении атмосферного воздуха выше расчетной.

Коэффициент теплопередачи для конденсаторной секции составляет 31,1...26,9 $Вт/м^2 \cdot K$, для дефлегматорной секции – 25,95...23,98 $Вт/м^2 \cdot K$.

Из рисунка 5 можно видеть, что коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха для конденсаторных секций 26,5...24,9 $Вт/м^2 \cdot K$, для дефлегматорных секций – 31,9...28,12 $Вт/м^2 \cdot K$. Коэффициент теплоотдачи пара для конденсаторных секций 16981...16141 $Вт/м^2 \cdot K$, для дефлегматорных секций – 15791...14891 $Вт/м^2 \cdot K$.

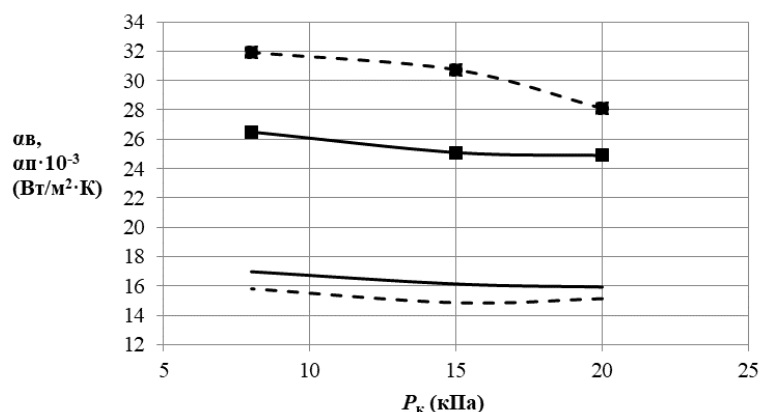


Рис. 5. Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_{\text{в}}$ (Вт/м²·К) обозначен ■ и коэффициент теплоотдачи пара $\alpha_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$ (Вт/м²·К) для конденсаторных (—) и дефлегматорных (---) секций*

*Источник: составлено автором

Fig. 5. The coefficient of heat transfer from the air side $\alpha_{\text{в}}$ (W/m²·K) is indicated by ■ and the coefficient of heat transfer of steam $\alpha_{\text{п}} \cdot 10^{-3}$ (W/m²·K) for condensate (—) and dephlegmator (---) sections*

* Source: compiled by the author

Наклон трубы относительно вертикальной оси уменьшает влияние экранирующего слоя конденсата и обеспечивает более эффективный процесс теплообмена. Шатровое расположение секций воздушного конденсатора позволяет реализовать это наилучшим образом. Увеличение угла наклона каждой секции приводит к снижению конвективного коэффициента теплоотдачи от пара и увеличивает проецирующую поверхность (рис. 6).

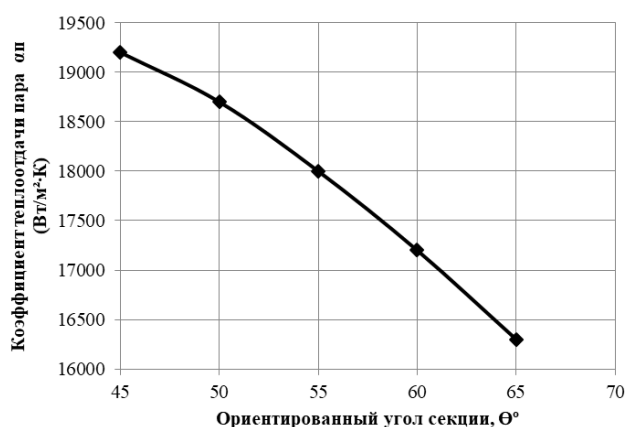


Рис. 6. Влияние ориентированного угла секций на конвективный коэффициент теплоотдачи пара*

*Источник: составлено автором

Fig. 6. Convective heat transfer coefficient of steam from the oriented angle of the sections *

*Source: compiled by the author

Потери давления воздушного потока, аэродинамическое сопротивление и потребляемая мощность вентилятора воздушно-конденсационной установки при различных давлениях в конденсаторе приведены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Результаты расчета аэродинамического сопротивления*

Aerodynamic drag calculation results

Наименование	Обозначение, размерность	Конденсаторные секции			Дефлегматорные секции		
		$p_{\text{к}}$ кПа			$p_{\text{к}}$ кПа		
		8	15	20	8	15	20
Потери давления изотермического потока воздуха	Δp_2 , Па	15,4	13,32	13,04	27,50	25,10	19,15
Потери давления от ускорения потока воздуха вследствие его нагревания	Δp_{y2} , Па	0,48	0,70	0,85	0,93	1,46	1,35

Продолжение таблицы 4. Continuation of Table 4.

Потери давления от самотяги**	$\Delta p'_2$, Па	2,50	4,17	4,59	2,50	4,17	4,59
Аэродинамическое сопротивление	Δp_b , Па	13,40	18,20	18,49	25,95	22,40	15,91
Потребляемая мощность вентилятором	N , кВт	2,30	3,06	3,26	6,17	5,40	3,34

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

**В ВКУ охлаждающий воздух движется восходящим потоком, поэтому сопротивление $\Delta p'_2$ следует вводить в формулу с отрицательным знаком, при нисходящем потоке воздуха сопротивление $\Delta p'_2$ является дополнительным сопротивлением.

На рисунке 7 показано изменение мощности, затрачиваемой на привод вентилятора в зависимости от температуры окружающего воздуха при различных давлениях в конденсаторе.

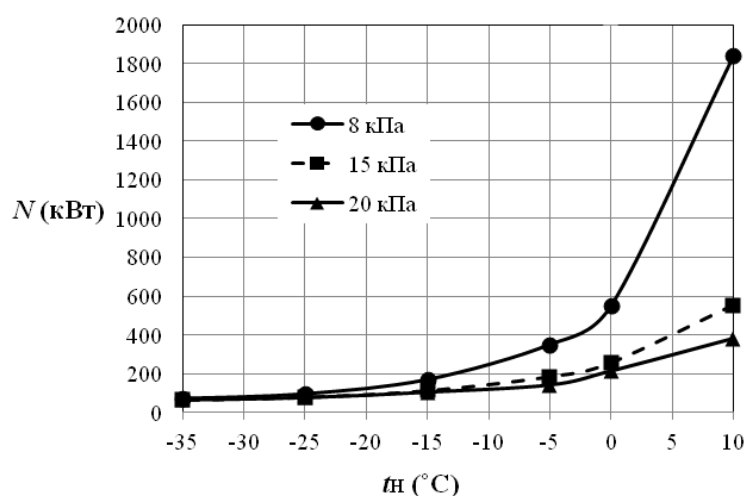


Рис. 7. График зависимости мощности вентиляторов от температуры охлаждающего воздуха*
Fig.7. The influence of cooling air temperature on fan power*
*Source: compiled by the author

*Источник: составлено автором

Для конденсационного энергоблока мощностью 110 МВт затраты электроэнергии на привод вентиляторов ВКУ варьируется в диапазоне от 65 до 1820 кВт, и зависят от температуры охлаждающего воздуха. Из рисунка 7 видно, что при плюсовых температурах воздуха мощность на привод вентиляторов существенно увеличивается и чем глубже вакуум в конденсаторе, тем выше прирост мощности.

Закключение (Conclusion)

1. Вопросы проектирования и применения конденсаторов с воздушным охлаждением широко обсуждаются в публикациях нефтехимического сектора, однако в энергетике в настоящее время изучены недостаточно полно.

2. Были рассмотрены существующие конструкции конденсаторов с воздушным охлаждением, установлено, что для стационарных конденсационных установок для водяного пара наиболее оптимальной является конструкция с шатровой компоновкой теплообменных секций и нижним расположением вентилятора.

3. При повышении температуры охлаждающего воздуха увеличиваются энергозатраты на привод вентиляторов, что ограничивает применение энергоблоков с воздушным охлаждением в регионах с теплым климатом и позволяет использовать их в районах Крайнего Севера со среднегодовой температурой воздуха на уровне -5°C .

4. При определении значения коэффициента теплоотдачи оребренной трубы большую роль имеет значение конвективного коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха. Коэффициент теплопередачи оребренной трубы ВКУ находится в пределах $24...26 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{K}$ для конденсаторной секции и $27...31 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{K}$ для дефлегматорной секции (в зависимости от конечного давления пара). В отличие от системы водяного охлаждения конденсаторов, системы с воздушным охлаждением требуют развитых поверхностей теплообмена, чтобы полностью конденсировать пар. Однако, для систем с воздушным охлаждением не требуются дополнительные трубопроводы для подвода воды.

5. На основе проведенных исследований принято, что для предотвращения замерзания конденсата, по мере понижения температуры охлаждающего воздуха уменьшается и значение коэффициента теплопередачи за счет снижения мощности работы вентиляторов. Данное решение позволяет также в значительной степени сократить затраты на собственные нужды.

6. Для решения проблемы замерзания возможно использование труб эллиптической формы, с соотношением осей 4:1. Такие трубы, в случае замерзания в них конденсирующегося пара, расширяются в направлении малой оси сечения без значимого утонения и разрушения стенки благодаря вытянутой форме сечения. Поэтому нет необходимости в остановке работы конденсатора. Стоит также упомянуть, что США имеют положительный опыт эксплуатации данной технологии в штате Аляска, схожей по своим климатическим условиям с климатом, рассмотренным авторами в расчете.

7. Уменьшение расчетного значения давления в воздушном конденсаторе (при фиксированной температуре охлаждающего воздуха) приводит к увеличению необходимой мощности вентиляторов. При этом в области отрицательных температур окружающего воздуха до -15°C увеличение мощности вентиляторов происходит на 28 до 57 %, при -5°C уже в 2 раза возрастает мощность, при $+10^{\circ}\text{C}$ и выше наблюдается существенное увеличение мощности вентиляторов, поэтому требуется решать задачу оптимизации давления в конденсаторе с учетом изменения мощности турбины, затрат мощности на вентиляторы и поверхности теплообмена ВКУ.

Литература

1. Хассан Т., Дыганова Р. Я. Инженерные решения по снижению воздействия тепловых сбросов энерготехнологических установок на качество вод водоемов-охладителей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2010. №5-6. С. 105-110.
2. Ларионов В.Г., Шереметьева Е.Н. Современное состояние мировых водных ресурсов и основные направления по увеличению их доступности // Известия Иркутской государственной экономической академии. 2015. Т. 25. № 4. С. 590–596. doi: [http://dx.doi.org/10.17150/1993-3541.2015.25\(4\).590-596](http://dx.doi.org/10.17150/1993-3541.2015.25(4).590-596).
3. Дмитриева К.В., Дмитриева О.С. Повышение эффективности теплоэнергетических процессов при использовании воздушных конденсаторов // Вестник технологического университета. 2014. Т.17. № 11. С. 103 – 105.
4. Гомборагчаа Н., Аронсон К.Э. Применение воздушных конденсационных установок на паровых турбинах ТЭС // Третья научно-техническая конференция молодых ученых Уральского энергетического института УРФУ. Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 98 – 101.
5. Федоров В.А., Мильман О.О. Конденсаторы паротурбинных установок. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 560 с.
6. Dry cooling systems. SPX Corporation. 2014. Доступно по: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30728866/186111.pdf>. Ссылка активна на 05.05.2023.
7. Chen L., Yang L., Du X., et al. Novel air-cooled condenser with V-frame cells and induced axial flow fans // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. N 117. pp. 167–182.
8. Kong Y., Wang W., Huang X. et al. Annularly arranged air-cooled condenser to improve cooling efficiency of natural draft direct dry cooling system // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. N 118. pp. 587 – 601.
9. Marincowitz F.S., Owen M.T.F., Muiyser J. Multi-objective optimisation for wind resistant air-cooled condenser operation // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 218. 119382.
10. Marincowitz F., Owen M., Muiyser J., et al. Uniformity index as a universal air-cooled condenser fan performance metric // International Journal of Turbomachinery. Propulsion and Power. 2022. Vol. 7, N 4. p. 35.
11. Du Plessis J., Owen M. Techno-economic analysis of hybrid ACC performance under different meteorological conditions // Energy. 2022. Vol. 255, N 1. 124494.
12. Du Plessis J., Owen M. A single-stage hybrid (dry/wet) dephlegmator for application in air-cooled steam condensers: Performance analysis and implications // Thermal Science and Engineering Progress. 2021. Vol. 26, N 1. 101108.
13. Филимонов В.А., Шаломов В.И. Воздушно-конденсационные установки как эффективное средство обеспечения тепловой экономичности и экологической безопасности строящейся Советско-Гаванской ТЭЦ // ДАЛЬНЕВОСТОЧНАЯ ВЕСНА – 2018. Материалы

16-й Международной научно-практической конференции по проблемам экологии и безопасности; 27 апреля 2018 г., Комсомольск-на-Амуре. КСЛ.: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2018. С. 167-170.

14. Фёдоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А. и др. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркуляционных воздушных конденсаторов паротурбинных установок // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия машиностроение. 2015. №5. С. 87-105.

15. Фёдоров В.А., Мильман О.О., Кирюхин А.В. и др. Разработка, изготовление и испытание типовой натурной секции высокоэффективного воздушного конденсатора // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2015. №6. С.102-112.

16. Owen M., Kröger D.G. A numerical investigation of vapor flow in large air-cooled condensers // Applied Thermal Engineering. 2017. N127. pp. 157–164.

17. Huang X., Chen L., Kong Y., et al. Effects of geometric structures of air deflectors on thermo-flow performances of air-cooled condenser // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. N 118. pp. 1022 – 1039.

18. Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Кунтыш В.Б. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 5. С.128-141.

19. Боруш О.В., Синельников Д.С., Григорьева О.К. и др. Оценка влияния параметров пара в воздушном конденсаторе на эффективность турбогенератора // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. Т. 68, № 3. Новосибирск: изд-во НГТУ, 2017. С. 49 – 61.

20. Rylskiy A, Borush O, Peterson G. The analysis of an air condenser's performance in Russia's high northern climate // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 792. pp. 393–400.

21. Tsibulskiy S., Galashov N., Mel'nikov D. et al. Improvement air condensers evaluation model. MATEC Web of Conferences: 2018 Heat and mass transfer in the thermal control system of technical and technological energy equipment, HMTTSC 2018;24-26 Apr 2018; Tomsk, Russia. France: EDP Sciences; 2018. Art. 01017.

22. Жинов А.А., Шевелев Д.В., Ананьев П.А. Моделирование потерь давления воздуха в оребренном трубном пучке воздушного конденсатора // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. №3. С. 105-116.

23. Мильман О.О., Кондратьев А.В., Птахин А.В. и др. Экспериментальные исследования распределения потоков воздуха в воздушных конденсаторах пара // Теплоэнергетика. 2019. №12. С. 77-85.

24. Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю. и др. Повышение эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок за счет применения профильных витых трубок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016. №7-8. С. 72-78.

25. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19. №11-12. С. 3-11.

26. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А., Гайнуллин Р.Н. и др. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования // Вестник КГЭУ. 2022. Т. 14. № 4(56). С. 91-102.

Авторы публикации

Боруш Олеся Владимировна – д-р техн. наук, профессор, кафедра «Тепловые электрические станции», Новосибирский государственный технический университет.

Григорьева Оксана Константиновна – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Тепловые электрические станции», Новосибирский государственный технический университет.

Францева Алина Алексеевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Тепловые электрические станции», Новосибирский государственный технический университет.

References

1. Khassan T, Dyganova RYa. Engineering solutions for reducing the impact of thermal discharges from power plants on the water quality of reservoirs-coolers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2010; (5-6): 105-110. (In Russ).
2. Larionov VG, Sheremetieva EN. The current state of the world's water resources and main directions for increasing their availability. *Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy*. 2015; 25(4):590–596. (In Russ). doi: [http://dx.doi.org/10.17150/1993-3541.2015.25\(4\).590-596](http://dx.doi.org/10.17150/1993-3541.2015.25(4).590-596).
3. Dmitrieva KV, Dmitrieva OS. Povyshenie ehffektivnosti teploehnergeticheskikh protsessov pri ispol'zovanii vozdushnykh kondensatorov. *Herald of technological university*. 2014; 17(11): 103-105. (In Russ).
4. Gomboragchaa N, Aronson KE. Primenenie vozdushnykh kondensatsionnykh ustanovok na parovykh turbinakh TEHS [Use of air cooled condenser on steam turbine in the thermal power plant]. *Tret'ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh Ural'skogo ehnergeticheskogo instituta URFU*. Ekaterinburg: Izd-vo UrFU, 2018. Pp.98-101. (In Russ.).
5. Fedorov VA., Mil'man OO. *Kondensatory paroturbinnykh ustanovok*. Moscow: Baumanpress; 2013. (In Russ).
6. Dry cooling systems. SPX Corporation. Available at: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30728866/186111.pdf>. Accessed: 05.05.2023.
7. Chen L., Yang L., Du X., et al. Novel air-cooled condenser with V-frame cells and induced axial flow fans // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. N 117. pp. 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.139>.
8. Kong Y, Wang W, Huang X, et al. Annularly arranged air-cooled condenser to improve cooling efficiency of natural draft direct dry cooling system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018;118:587 – 601. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.031>.
9. Marincowitz FS, Owen MTF, Muiyser J. Multi-objective optimisation for wind resistant air-cooled condenser operation. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 218:119382. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119382>.
10. Marincowitz F, Owen M, Muiyser J, et al. Uniformity index as a universal air-cooled condenser fan performance metric. *International Journal of Turbomachinery. Propulsion and Power*. 2022;7(4):35. <https://doi.org/10.3390/ijtp7040035>.
11. Du Plessis J, Owen M. Techno-economic analysis of hybrid ACC performance under different meteorological conditions. *Energy*. 2022;255(1):124494. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124494>.
12. Du Plessis J, Owen M. A single-stage hybrid (dry/wet) dephlegmator for application in air-cooled steam condensers: Performance analysis and implications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2021;26(1):101108. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101108>.
13. Filimonov VA, Shalomov VI. Vozdushno-kondensatsionnye ustanovki kak effektivnoe sredstvo obespecheniya teplovoi ekonomichnosti i ekologicheskoi bezopasnosti stroyashcheisya Sovetsko-Gavanskoi TETs. *DAL"NEVOSTOChNAYa VESNA – 2018. 16-i Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po problemam ekologii i bezopasnosti; 27 Apr 2018; Komsomolsk-on-Amur, Russia*. Komsomolsk-on-Amur: SEIHPE Publ., 2018. pp. 167-170. (In Russ.).
14. Fedorov VA, Mil'man OO, Anan'ev P.A., et al. Results of experimental and computational analysis of air flow in circle channels of air-cooled condensers of steam power plants. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Mechanical engineering*. 2015; (5):87-105. (In Russ).
15. Fedorov VA, Mil'man OO, Kiryukhin AV. Development, production and test of typical full-scale section of the highly efficient air-cooled condenser. *Thermal engineering*. 2015; (6):102-112. (In Russ).
16. Owen M, Kröger DG. A numerical investigation of vapor flow in large air-cooled condensers. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 27:157–164. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.026>.
17. Huang X, Chen L, Kong Y, et al. Effects of geometric structures of air deflectors on thermo-flow performances of air-cooled condenser. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 118:1022 – 1039. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.071>.
18. Danilchik ES, Sukhotsky AB, Kuntyshev VB. Experimental studies of the efficiency of a single-row bundle of bimetallic finned tubes with different finning heights in free convective heat exchange with air. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(5):128-141. (in Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-5-128-141>.

19. Borush OV, Sinel'nikov DS, Grigor'eva OK, et al. Evaluation of the effect of steam parameters in the air condenser on the efficiency of the turbogenerator. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017; 68(3):49-61. (In Russ.).
20. Ryl'skiy A, Borush O, Peterson G. The analysis of an air condenser's performance in Russia's high northern climate. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 792:393–400. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.792.393>
21. Tsibul'skiy S., Galashov N., Mel'nikov D. et al. Improvement air condensers evaluation model. *MATEC Web of Conferences: 2018 Heat and mass transfer in the thermal control system of technical and technological energy equipment, HMTTSC 2018; 24-26 Apr 2018; Tomsk, Russia*. France: EDP Sciences; 2018. Art. 01017. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819401017>.
22. Zhinov AA, Shevelev DV, Anan'ev PA. Modelirovanie poter' davleniya vozdukha v orebrennom trubnom puchke vozdušnogo kondensatora. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2013; (3):105-116. (In Russ.).
23. Mil'man OO, Kondrat'ev AV, Ptakhin AV, et al. Experimental studies on the distribution of air flows in air cooled steam condensers. *Thermal engineering*. 2019; 66(12):936-943. <https://doi.org/10.1134/S004060151912005X>.
24. Brodov YuM, Aronson KE, Ryabchikov AYU, et al. Povyshenie effektivnosti teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok za schet primeneniya profil'nykh vitykh trubok. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2016; (7-8):72-78. (In Russ.).
25. Sukhotskii AB, Sidorik GS. Investigation of a mixed-convective heat treatment of single-air air cooled exchangers in various cross-steps pipe installation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017; 19(11-12):3-11. (In Russ.).
26. Gil'fanov KKh, Shakirov RA, Gainullin RN. A method for intensifying heat exchange based on intelligent control of the operating characteristics of heat exchange equipment. *Vestnik KGEU*. 2022; 14(4(56)):91-102. (In Russ.).

Authors of the publication

Olesya V. Borush – Novosibirsk State Technical University.

Oksana K. Grigoryeva – Novosibirsk State Technical University.

Alina A. Frantseva – Novosibirsk State Technical University.

Шифр научной специальности: 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.

Получено 04.12.2023 г.

Отредактировано 10.01.2024 г.

Принято 18.01.2024 г.



ПЕРЕВОД КОТЕЛЬНЫХ НА АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО

Макеева Е.Н.¹, Зверева Э.Р.², Морозова О.Ю.¹

¹Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого, Гомель,
Республика Беларусь

²Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Российская Федерация

6elvira6@list.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Обосновать необходимость перевода котельных с мазута на печное бытовое топливо. МЕТОДЫ. Были проведены сравнительные исследования основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера). Рассчитаны экологические параметры загрязняющих веществ, образующихся при сжигании мазута и печного бытового топлива и проведено их сравнение со значениями, регламентируемыми ЭкоНП 17.01.06-001-2017. Экологические нормы и правила. Охрана окружающей среды и природопользование, и ТКП 17.02-17-2019 (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование». РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате проведенных сравнительных исследований основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу. В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие основным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам за счет уменьшения в 70 раз количества выброшенного в атмосферный воздух диоксида серы за 10 суток сжигания печного бытового топлива, а также снижения концентрации данного вида выброса в 72,5 раза. При переходе с мазута на печное бытовое топливо, обеспечивается также уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы при десятидневном использовании нового резервного вида топлива. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Таким образом, в результате экспериментальных и расчетных исследований было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останов котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива.

Ключевые слова: мазут; печное бытовое топливо; вязкость; теплота сгорания; выбросы; оксиды серы; примеси; котельная.

Для цитирования: Макеева Е.Н., Зверева Э.Р., Морозова О.Ю. Перевод котельных на альтернативное топливо // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

CONVERSION OF BOILER HOUSES TO ALTERNATIVE FUEL

Makeeva E.N.¹, Zvereva E.R.², Morozova O.Yu.¹

¹Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation,

6elvira6@list.ru

Abstract: THE PURPOSE. To justify the need to transfer boiler houses from fuel oil to furnace domestic fuel. METHODS. Comparative studies of the main indicators of the quality of fuel oil and

domestic heating oil (DHO) (heat of combustion, kinematic viscosity, flash point, pour point, ash content, humidity, sulfur content) were carried out. The environmental parameters of pollutants formed during the combustion of fuel oil and domestic stove fuel are calculated and compared with the values regulated by the EkoNiP 17.01.06-001-2017 "Environmental protection and nature management. Requirements of environmental safety" and TCU 17.02-XX-2019 "Environmental protection and nature management". **RESULTS.** As a result of comparative studies of the main indicators of the quality of fuel oil and furnace household fuel (PBT), it was shown that combustion in PBT boilers in comparison with fuel oil is preferable in terms of environmental consequences in terms of emissions into the atmosphere. As a result of the comparative analysis, it was found that during the transition from fuel oil to furnace household fuel, compliance with the basic environmental standards regulated by these regulatory documents is ensured by reducing by 70 times the amount of sulfur dioxide released into the atmospheric air during 10 days of burning furnace household fuel, as well as reducing the concentration of this type of emission by 72.5 times. When switching from fuel oil to furnace household fuel, pollution and equipment wear are also reduced due to the ash content index for furnace household fuel being 7 times lower than that of fuel oil, as well as a 2-fold reduction in the formation of soot and 70-fold reduction in sulfur dioxide during ten-day use of a new reserve type of fuel. **CONCLUSION.** Thus, as a result of experimental and calculated studies, it was shown that combustion in DHO boilers in comparison with fuel oil is preferable in terms of environmental consequences in terms of emissions into the atmosphere, reducing corrosion, stopping boilers for repairs, reducing fuel heating costs to facilitate transportation, reducing steam and fuel costs. When switching from fuel oil to furnace household fuel, pollution and equipment wear are also reduced due to the ash content index for furnace household fuel that is 7 times lower than that of fuel oil, as well as a 2-fold reduction in the formation of soot and 70-fold reduction in sulfur dioxide during ten-day use of a new reserve type of fuel.

Keywords: fuel oil; domestic furnace fuel; viscosity; heat of combustion; emissions; sulfur oxides; impurities; boiler room.

For citation: Makeeva E.N., Zvereva E.R., Morozova O.Yu. Conversion of boiler houses to alternative fuel. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 107-117. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-107-117.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

В качестве основного вида топлива для ТЭЦ и промышленных котельных Российской Федерации и Республики Беларусь используется природный газ. Резервным или аварийным источником топливоснабжения котельных и ТЭЦ являлся в основном мазут [1].

Среди весомых достоинств мазута, а именно, высокой теплоты сгорания (38-42 МДж/кг), малого содержания золы (до 0,5 %), возможности получения светящегося пламени, обеспечивающего высокий радиационный теплообмен в топочном пространстве, имеется и ряд серьезных недостатков.

К недостаткам мазута, как топлива относятся: высокая стоимость (27-30 тыс. руб. за тонну); высокая вязкость мазута, что приводит к закоксовыванию форсунок, к неполноте сгорания, к увеличению времени испарения и горения капли мазута; высокая токсичность; высокая огнеопасность, приводящая к повышенным требованиям к технике безопасности; высокое содержание серы (до 3,5 %) приводит к образованию сернистых газов, вызывающих низкотемпературную коррозию оборудования и вредные выбросы в атмосферу; высокая температура застывания (25-27 °С), что приводит к высоким затратам электроэнергии на перекачку и транспортировку топлива [2-4].

Система топливоподготовки мазута на ТЭЦ достаточно сложная, многоступенчатая включающая: разогрев, слив, организация хранения без расслоения на мазут и воду, разогрев и перемешивание в баках, транспортировка по трубопроводам, дополнительный подогрев перед форсунками, распыл, сжигание, предотвращение коррозионных процессов в котлах и экологических последствий по составу выбросов в атмосферу и по сливу замазученных вод, обеспечение требований техники безопасности [3-4].

В процессе эксплуатации установлено, что в настоящее время из-за глубокой переработки мазута на российских и белорусских нефтеперерабатывающих заводах условная вязкость мазута марки М-100 при 100 °С составляет более 6,8 ВУ [1]. Для его устойчивого горения требуется повысить температуру разогрева со 125 °С, как было ранее и на которую были спроектированы подогреватели мазута и горелки котлов, до 135 °С и более. Помимо этого, для применения мазута высокой вязкости требуется выполнить реконструкцию

мазутного хозяйства и горелок котлов, а также увеличить расход пара, а, следовательно, и топлива на его разогрев.

В процессе эксплуатации на теплотехническом оборудовании мазута глубокой переработки, который поставляется в данный момент времени на котельные установки, было выявлено, что использование подобного высоковязкого мазута, приводит к физическому загрязнению и порче оборудования [5-6].

Котельные топлива применяют в стационарных паровых котлах, в промышленных печах. Тяжелые моторные топлива используют в судовых энергетических установках. К котельным топливам относят топочные мазуты марок 40 и 100, вырабатываемые по ГОСТ 10585-2013, к тяжелым моторным топливам относят флотские мазуты Ф-5 и Ф-12, вырабатываемые по ГОСТ 10585-99. В общем балансе перечисленных топлив основное место занимают мазуты нефтяного происхождения. В таблице 1 приведены основные характеристики мазута М100 (ГОСТ 10585-2013).

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики мазута М100

The main characteristics of fuel oil M 100

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Метод испытания	Значение по ГОСТ 10585-2013	
				мини- мальное	макси- мальное
1	Вязкость кинематическая при 100 °С	мм ² /с	СТБ ИСО 3104	-	50,00
2	Зольность	%	ГОСТ 1461	-	0,14
3	Массовая доля механических примесей	%	ГОСТ 6370	-	1,0
4	Массовая доля воды	%	ГОСТ 2477	-	1,0
5	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	-	ГОСТ 6307, п. 7.5 ГОСТ 10585	Отсутствие	
6	Массовая доля серы	%	ГОСТ 32139	- -	2,50 3,00
7	Температура вспышки в открытом тигле	°С	ГОСТ 4333	110	-
8	Температура застывания	°С	ГОСТ 20287 (метод Б)	-	25
9	Теплота сгорания (низшая) в пересчете на сухое топливо	кДж/кг	ГОСТ 34210	39900	-
10	Плотность при 15 °С	кг/м ³	ГОСТ ISO 3675	Не нормируется. Определение обязательно	

*Источник: Межгосударственный стандарт. Топливо нефтяное. Мазут. ГОСТ 10585-2013 <https://megakorm.ru/Data2/1/4293773/4293773181.pdf>. (Source: Interstate standard. Oil fuel. Fuel oil. GOST 10585-2013 <https://megakorm.ru/Data2/1/4293773/4293773181.pdf>)

Таким образом, мазут в котельных и на тепловых электрических станциях Российской Федерации и Республики Беларусь использовался длительное время, который был нормативно (в СНиП, ОСТ, ГОСТ) прописан как основное, резервное, аварийное, растопочное топливо. В результате появилось и существовало в советское и постсоветское время большое число объектов, где мазут был единственным стратегическим топливом.

В настоящее время является актуальным то, что эксплуатация мазута на ТЭЦ и котельных становится многозатратной (высокая цена, низкое качество, сернистость, затраты электроэнергии на перекачку и т.д.), поэтому мазут в настоящее время по многим параметрам не отвечает современным требованиям по энергоэффективности и экологичности, предъявляемым к основному и резервному котельному топливу и требуется его замена на другие виды топлив [7-11].

Целью исследования является обоснование необходимости перевода котельных с мазута на печное бытовое топливо.

Научная значимость данного исследования заключается в оценке соблюдения экологических требований, обосновании экономической эффективности и оптимальности технико-технологической реализации перехода на резервное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива взамен мазута.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при переводе пиковых котельных на резервное либо аварийное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива взамен мазута в целях экономии топливно-энергетических ресурсов.

По решению Республиканской комиссии по контролю за осуществлением расчетов за природный газ, электрическую и тепловую энергию Совета Министров Республики Беларусь от 26.06.2011 года, в целях экономии топливно-энергетических ресурсов Министерству энергетики было поручено исключить сжигание топлива на поддержание мазутного хозяйства на пиковых котельных [12].

В соответствии со СНиП II-35-76 «Котельные установки» с изменениями, утвержденными постановлением Госстроя России от 11.09.97 N 18-52 (введено в действие с 01.01.98), виды и объемы потребления основного, резервного и аварийного топлива, а также необходимость резервного или аварийного топлива для котельных устанавливается с учетом категории котельной, и в соответствии с утвержденными схемами теплоснабжения, по согласованию с топливоснабжающими организациями.

В связи со всем вышеизложенным и согласно разработанной «Схеме теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года», было принято решение перевести на резервное либо аварийное топливоснабжение с использованием печного бытового топлива (ПБТ) взамен мазута ряд котельных. Характеристики топлива регламентированы ГОСТом ТУ ВУ 400091131.004-2009 (ТУ 38. 101656–87), 10585-99 (ТУ 38.101656-87) и приведены в таблице 2 [12].

Таблица 2

Table 2

Основные характеристики печного бытового топлива

The main characteristics of domestic stove fuel

№ п/п	Наименование показателя	Значения по ТУ ВУ 400091131.004-2009
1	Фракционный состав:	Не нормируется.
	при 250 °С перегоняется, % об.	Определение обязательно 84
	при 300 °С перегоняется, % об.	
	при 350 °С перегоняется, % об., не более	
2	Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с, не более	15,0
3	Температура застывания, °С, не выше:	
	в период с 1 октября по 31 марта	-15
	в период с 1 апреля по 30 сентября	-5
4	Температура вспышки, определяемая в закрытом тигле, °С, не ниже	62
5	Массовая доля серы, %, не более:	
	вид II	0,05
	вид III	0,1
	вид IV	0,5

**Источник: 14. Открытое акционерное общество «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://mnpz.by>. Дата доступа: 12.10.2023 (Source: [14]. Open Joint Stock Company "Mozyr Oil Refinery" // [Electronic resource]. Access mode <https://mnpz.by>. Access date: 12.10.2023).*

Печное бытовое топливо вырабатывается из дизельных фракций прямой перегонки и вторичного происхождения – дистиллятов термического, каталитического крекинга и коксования. Если в качестве основы для производства был использован дизель, то на выходе получается темное печное топливо, которое обладает специфическими свойствами. Чаще всего такое топливо используется в стационарных отопительных системах [13]. ПБТ изготавливается на высокотехнологичном оборудовании, которое позволяет регулировать свойства и показатели топлива. После изготовления топливо необходимо хранить в

специальных герметичных резервуарах, чтобы оно не испарялось, и не утрачивало своих полезных свойств. Обычно, для этого используются небольшие баллоны (бочки).

По физико-химическим свойствам печное топливо очень похоже на дизельное, но все же некоторые характеристики у них отличаются. Главными преимуществами печного топлива по сравнению с основными видами является высокая теплотворная способность и небольшая стоимость [12].

К прочим достоинствам печного топлива стоит отнести отсутствие какого-либо специфического запаха во время горения и хранения, который характерен для многих других видов нефтепродуктов. Также стоит отметить и низкую температуру застывания, что значительно расширяет сферу применения данного типа топлива. Хорошая текучесть, высокая теплота сгорания и экономичность – те преимущества, которые обеспечивают печному топливу широкое распространение и возможность использования в разных областях.

Основными характеристиками ПБТ являются: коксуемость, кислотность, зольность, кинематическая вязкость, температура вспышки, плотность.

Кинематическая вязкость топлива не должна превышать 8 мм²/с, а температура вспышки должна быть не менее 45 °С, чтобы оно не воспламенялось в процессе перевозки. Максимальное значение параметра зольности – 0,2 %. Что же касается плотности, цетанового и йодного числа, которые являются важными параметрами для дизельного топлива, то в данном случае они не нормируются.

Печное топливо по ряду показателей можно классифицировать на разные виды. Так, сегодня выделяют следующие марки: тяжелое, среднее, легкое. Соответствие той или иной марке определяется по ряду показателей, среди которых температура горения, вязкость, температура застывания, а также теплоемкость и наличие примесей.

По фракционному составу печное бытовое топливо может быть несколько тяжелее дизельного топлива по ГОСТ 305–82 (до 360 °С перегоняется до 90 % вместо 96 %, вязкость печного бытового топлива до 8,0 мм²/с при 20 °С против 3,0–6,0 мм²/с дизельного). В нем не нормируются цетановое и йодное числа, температура помутнения. При переработке сернистых нефтей массовая доля серы в топливе – до 1,1 %. В период с 1 апреля по 1 сентября допускается производство топлива с температурой застывания не выше – 5 °С. Для улучшения низкотемпературных свойств печного топлива в промышленности применяют депрессорные присадки, синтезированные на основе сополимера этилена с винилацетатом [12].

Печное бытовое топливо предназначено для сжигания в отопительных установках небольшой мощности, расположенных непосредственно в жилых помещениях, а также в теплогенераторах средней мощности, используемых в сельском хозяйстве. Требования, предъявляемые к качеству котельных, тяжелых моторных и судовых топлив, устанавливающие условия их применения, определяются такими показателями качества топлива, как вязкость, содержание серы, теплота сгорания, температуры застывания и вспышки, содержание воды, механических примесей и зольность.

Научное обоснование перевода котла с мазута на печное бытовое топливо авторам представлялось в получении, обобщении и сравнении полученных экспериментальных данных по основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам мазута М100 и ПБТ, а также полученных расчетных данных по выбросам вредных веществ, образующихся при сжигании данных видов топлива в котлах.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объекта исследования выбраны мазут и печное бытовое топливо (ПБТ) производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод». Основные характеристики мазута и ПБТ производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» приведены в таблицах 1 и 2 [14].

Требования, предъявляемые к качеству котельных топлив, устанавливающие условия их применения, определяются такими показателями качества, как вязкость, содержание серы, теплота сгорания, температуры застывания и вспышки, содержание воды, механических примесей и зольность [15].

Были проведены эксперименты и определены теплоты сгорания, зольность, вязкость кинематическая, зольность, влажность, содержание серы, воды, температура застывания и температура вспышки.

1. Изучение теплоты сгорания

Исследования низшей рабочей теплоты сгорания мазута и печного бытового топлива проводилось с использованием адиабатического бомбового калориметра АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 21261-91. Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания

Метод определения заключался в полном сжигании определенной массы испытуемого образца жидкого топлива в калориметрической бомбе в среде сжатого кислорода и измерении

количества теплоты, выделившейся при сгорании топлива.

2. Исследования вязкости

Определение вязкости проводилось согласно СТБ ИСО 3104, ГОСТ 33-2016 «Нефть и нефтепродукты. прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости» при температурах +20 °С (для ПБТ) и +100 °С (для мазута М100). Сущность метода заключается в измерении калиброванным стеклянным вискозиметром времени истечения в секундах определенного объема испытуемой жидкости под влиянием силы тяжести при известной и постоянно контролируемой температуре. Кинематическая вязкость является произведением измеренного времени истечения на постоянную вискозиметра

3. Определение массовой доли серы

Определение массовой доли серы в образцах мазута и печного бытового топлива проводилось методом сжигания образцов в адиабатическом бомбовом калориметре АБК-1В (Россия) согласно ГОСТ 3877-88. Метод определения заключался в сжигании определенной массы образцов мазута и печного бытового топлива в калориметрической бомбе в адиабатическом режиме в среде сжатого кислорода под давлением и расчете теплового эффекта.

4. Исследование температуры вспышки в закрытом тигле.

Определение температуры вспышки в закрытом тигле в мазуте и печном бытовом топливе проводилось по ГОСТ 6356-75. Группа Б09. «Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле». Сущность метода заключается в определении самой низкой температуры горючего вещества, при которой в условиях испытания над его поверхностью образуется смесь паров и газов с воздухом, способная вспыхивать в воздухе от источника зажигания, но скорость их образования еще недостаточна для последующего горения. Для этого испытуемые продукты нагреваются в закрытом тигле аппарата «ТВЗ» для определения температур вспышки в закрытом тигле с постоянной скоростью при непрерывном перемешивании и испытывается на вспышку через определенные интервалы температур.

5. Определение зольности

Определение температуры текучести в мазуте и печном бытовом топливе проводилось согласно ГОСТ 1461-75 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности». Сущность метода заключается в сжигании массы испытуемого нефтепродукта и прокаливании твердого остатка до постоянной массы в муфельной печи Е72-24960 Печь муфельная Л9/11/SKM/B180.

6. Определение температуры застывания

Исследование температуры застывания мазута и печного бытового топлива проводилось согласно ГОСТ 20287-91 «Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания». Сущность методов заключается в предварительном нагревании образца испытуемого нефтепродукта с последующим охлаждением его с заданной скоростью до температуры, при которой образец остается неподвижным. Указанную температуру принимают за температуру застывания.

7. Определение влажности

Определение влажности в мазуте и печном бытовом топливе проводилось по ГОСТ 2477-2014 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды». Сущность метода состоит в нагревании пробы нефтепродуктов с нерастворимым в воде растворителем и изменении объема сконденсированной воды.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результаты исследований представлены в качестве сравнения показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера) на диаграммах (рис. 1-3).



Рис. 1. Низшая теплота сгорания (МДж/кг) и вязкость кинематическая (мм²/с) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 1. Lower calorific value (MJ/kg) and kinematic viscosity (mm²/s) for fuel oil and household heating fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

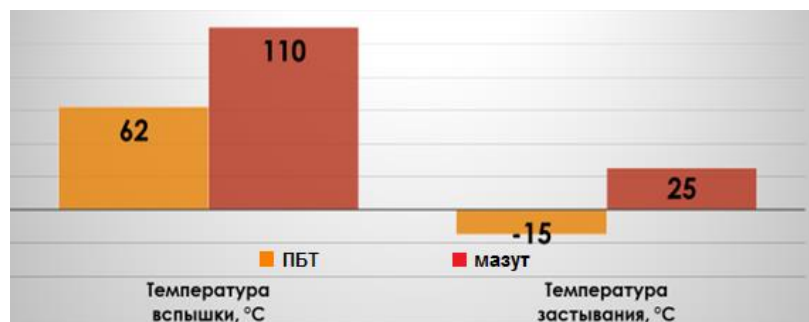


Рис. 2. Температура вспышки и температура застывания (°C) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 2. Flash point and pour point (°C) for fuel oil and heating household fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).



Рис. 3. Зольность, массовая доля воды и массовая доля серы (%) для мазута и печного бытового топлива

Fig. 3. Ash content, mass fraction of water and mass fraction of sulfur (%) for fuel oil and heating household fuel

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Как видно из рисунка 1 печное бытовое топливо обладает большей (42,2 МДж/кг) по сравнению с мазутом 100 (39,9 МДж/кг) теплотой сгорания, следовательно, расход топлива на котельной при использовании мазута будет выше, чем при использовании печного бытового топлива.

Вязкость топлива определяет методы и продолжительность сливно-наливных операций, условия перевозки и перекачки, гидравлические сопротивления при транспортировании топлива по трубопроводам, эффективность работы форсунок. Как показано на сравнительных диаграммах, (рисунок 1) печное бытовое топливо здесь имеет явные преимущества по сравнению с мазутом. Для устойчивого горения мазута (с условной вязкостью 6,99069 °ВУ) потребуется повысить температуру разогрева с 125 °C, как было ранее и на которую были спроектированы подогреватели мазута и горелки котлов, до 135 °C. Кроме того потребуются дополнительный расход пара а, следовательно, и топлива на его разогрев [12].

Сравнение температур вспышки (рис. 2) показало, что мазут 100 имеет более высокую температуру вспышки (110 °C) по сравнению с ПБТ (62 °C), поэтому оно нуждается в добавлении присадок, обладающих каталитическим эффектом – активаторы горения.

Температура застывания у топлив производства ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» (рис. 2) следующая: у мазута М100 не выше +25 °C, у ПБТ – летом не выше -5 °C, а зимой не выше -15 °C. Следовательно, условия слива и перекачки топлива по трубопроводам значительно лучше у ПБТ, и для поддержания указанного топлива в высокотекучем состоянии будет значительно меньше произведено энергозатрат, по сравнению с мазутом.

Изучение зольности, массовой доли воды и массовая доли серы (%) для мазута и печного бытового топлива показало, что бытовое технологическое топливо при сжигании образует меньшее количество твердых частиц, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами. При сжигании мазута (с массовой долей серы 3 %) образуется значительно большее количество токсичных оксидов серы, которые также выбрасываются в атмосферу, вызывают интенсивную низкотемпературную коррозию поверхностей теплоэнергетического оборудования, требуют повышенные температуры для дымовых газов за котлом для снижения коррозии [15-17].

Повышенные значения воды в мазуте, по сравнению с ПБТ будут снижать эффективность использования топлива. В случае подачи в форсунки плохо перемешанного

обводненного мазута наблюдаются пульсации горения, которые приводят и к срыву пламени. Наблюдается также перерасход топлива за счет недожога [18-19].

Следовательно, как показали результаты исследований, сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останов котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива. Далее проведена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива.

Оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива

Выполнена в соответствии с ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт». Используемые для расчета характеристики мазута и печного бытового топлива приведены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Характеристики жидкого топлива согласно ТКП 17.08-04-2006

Characteristics of liquid fuel according to the TCP 17.08-04-2006

Наименование	Вид	Состав рабочей массы топлива, %							Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_n^r
		W_t^r	A^r	S^r	C^r	H^r	N^r	O^r	
Мазут малозольный	вид VI	1	0,04	2,7	82,4	13,16	-	0,7	39,64
Печное бытовое топливо	вид В	-	0,02	0,04	84,3	15,46	-	0,18	42,30

* Источник: ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт». (Source: TCP 17.08-04-2006 (02120) "Environmental protection and nature management. Atmosphere. Emissions of pollutants into the atmospheric air. The procedure for determining emissions from fuel combustion in boilers with a heating capacity of more than 25 MW".).

Расчеты проводились с учетом того, что оксиды серы в котле летучей золой не связываются, золоуловители и сероулавливающие установки не используются. Максимальный расчетный расход топлива принимаем равным 5,9 т/ч. Результаты расчетов, выполненные согласно ТКП 17.08-04-2006 (02120) «Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосфера. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок определения выбросов при сжигании топлива в котлах теплопроизводительностью более 25 МВт», представлены в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Выбросы загрязняющих веществ

Emissions of pollutants

Наименование	Вид	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, г/с					Низшая теплота сгорания, МДж/кг Q_n^r
		M_{SO_2}	M_{NO_x}	M_{CO}	M_v	M_c	
Мазут малозольный	вид VI	88,57	2,175	3,75	0,46	0,4	39,64
Печное бытовое топливо	вид В	1,312	2,424	4,007	-	0,21	42,30

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

где M_{SO_2} – количество диоксида серы, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_{NO_x} – количество оксидов азота в пересчете на диоксид азота (NO_2), г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_{CO} – количество оксида углерода, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании газообразного, жидкого и твердого топлива;

M_c – количество сажи, г/с, образующееся в топке в результате недожога топлива и выбрасываемое в атмосферный воздух при сжигании мазута, дизельного, печного бытового и других легких жидких топлив;

M_v – количество мазутной золы в пересчете на ванадий, г/с, поступающее в атмосферный воздух с дымовыми газами при сжигании мазута.

Заключение (Conclusions)

В советское время мазут был нормативно (в СНиП, ОСТ, ГОСТ) прописан как основное, резервное, аварийное, растопочное топливо. Но в связи с увеличением степени глубины переработки нефти качество мазутного топлива продолжает неуклонно ухудшаться, что приводит к снижению энергетической, экономической и экологической эффективности его использования. Поэтому мазут практически по всем своим параметрам не отвечает современным требованиям, которым должно удовлетворять топливо [14, 16]. На сегодняшний день эксплуатация котельных и ТЭЦ, на которых мазут используется как основное и резервное топливо, является высокочрезвычайной и не может быть надежной с точки зрения исключения чрезвычайных ситуаций. В качестве альтернативного резервного топлива на котельных и ТЭЦ предлагается использовать печное бытовое топливо.

В результате проведенных сравнительных исследований основных показателей качества мазута и печного бытового топлива (ПБТ) (теплоты сгорания, кинематической вязкости, температуры вспышки, температуры застывания, зольности, влажности, содержания сера) было показано, что сжигание в котлах ПБТ по сравнению с мазутом предпочтительно в плане экологических последствий по составу выбросов в атмосферу, снижения коррозии, останова котлов на ремонт, снижения затрат на подогрев топлива для облегчения транспортировки, снижения расходов пара и топлива.

Далее проведена оценка количества выбросов загрязняющих веществ при сжигании мазута и печного бытового топлива. Рассчитаны экологические параметры загрязняющих веществ, образующихся при сжигании мазута и печного бытового топлива и проведено их сравнение со значениями, регламентируемыми ЭкоНиП 17.01.06-001-2017. Экологические нормы и правила. Охрана окружающей среды и природопользование, и ТКП 17.02-17-2019 (33140) «Охрана окружающей среды и природопользование».

В результате проведенного сравнительного анализа установлено, что при переходе с мазута на печное бытовое топливо обеспечивается соответствие основным экологическим нормативам, регламентируемым указанным нормативным документам. При переходе с мазута на печное бытовое топливо, обеспечивается уменьшение загрязнения и износа оборудования за счет меньшего, чем у мазута в 7 раз показателя зольности для печного бытового топлива, а также уменьшения в 2 раза образования сажи и в 70 раз диоксида серы.

Литература

1. Морозова О.Ю., Шаповалов А.В., Заглубоцкий Н.З. Резервное топливоснабжение котельных РУП «Гомельэнерго», работающих в пиковом режиме // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления. XX Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых. 2020. С. 142–146.
2. Zvereva E.R. et al. Modification of the rheological properties of heavy boiler fuel by adding carbon nanotubes and dehydrated carbonate sludge // Petroleum Chemistry. 2019. Vol. 59, No. 1. Pp. 106–110.
3. Власова Г.В., Сальникова Т.В., Пивоварова Н.А. Участие химических реагентов в изменении физико-химических свойств мазута // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 1. С. 29–36.
4. Hamidreza F.F., Hojat G., Hasan K.M.Sh. Газификация тяжелого нефтяного топлива: энергетический и эксергетический анализ для различных газифицирующих агентов // Нефтехимия. 2021. Т. 61. № 2. С. 184–194.
5. Морозов А.Л. и др. Опыт эксплуатации блока по удалению сероводорода из мазута // Химия и технология топлив и масел. 2021. № 4 (626). С. 53–56.

6. Макеева Е.Н., Найденов Е.С. Влияние концентрации этанола и изопропанола на октановое число бензина и цетановое число дизельного топлива // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2022. № 4 (91). С. 66–72.
7. Ведрученко В.Р. и др. Разработка схем и выбор энергосберегающих технологий при проектировании и эксплуатации отопительных котельных // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 5 (139). С. 19–22.
8. Hong T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings // Applied Energy. 2014. 126. Pp. 90–106.
9. Ахметшин М.Р., Няшина Г.С., Медведев В.В. Антропогенные газовые выбросы при сжигании суспензионных топлив и отходов нефтепереработки // Кокс и химия. 2021. № 4. С. 36–43.
10. Ветошкин А.Г. Инженерная защита атмосферы от вредных выбросов. Учебно-практическое пособие. 2-е изд. доп. и перераб. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 316 с.
11. Thring R.H. Platinum Improves Economy and Reduces Pollutants from A Range of Fuels // The Catalytic Engine. 1980. No. 24. Pp. 126–133.
12. Шаповалов А.В., Заглуботский Н.З., Морозова О.Ю. Реконструкция топливного хозяйства Гомельского теплофикационного комплекса // Современные проблемы машиноведения. XIII Международная научно-техническая конференция студентов, магистрантов и молодых ученых. 2020. С. 210–212.
13. Рыков А.Н., Бушкевич О.А. Схема теплоснабжения г. Гомеля на 2025 год с перспективой до 2030 года: в 3 т. М.: Проектное научно-исследовательское республиканское предприятие «БелНИПИЭнергоПром», 2018. Т. 1, ч. 1. 230 с.
14. Открытое акционерное общество «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://mnpz.by>. Дата доступа: 12.10.2023.
15. Hu Z. A Mathematical Model for In-Cylinder Catalytic Oxidation of Hydrocarbons in Spark-ignition Engines // SAE Paper 961196. 1996.
16. Зверева Э.Р. и др. Изучение влияния карбонатной присадки на реологические свойства нефтяного котельного топлива // Промышленная энергетика. 2021. № 7. С. 22–26.
17. Орлов М.Е., Шаронов В.И. Проблемы обеспечения котельных резервным топливом в современных условиях // Промышленная энергетика. 2007. № 9. С. 8–13.
18. Грибков А.М. Обеспечение технологического норматива по оксидам серы для котлов ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 164–175.
19. Халид Э.Ш., Рябов Г.А., Бухаркина Т.В. особенности образования и подавления выбросов оксидов серы при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO₂ // Электрические станции. 2019. № 8 (1057). С. 18–24.

Авторы публикации

Макеева Екатерина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Морозова Ольга Юрьевна. – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого.

References

1. Morozova O.Yu., Shapovalov A.V., Zaglubotsky N.Z. Backup fuel supply to boiler houses of RUE “Gomelenergo” operating in peak mode. *Research and Development in the Field of Mechanical Engineering, Energy and Management. XX International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists*. 2020: 142–146.
2. Zvereva E.R. et al. Modification of the rheological properties of heavy boiler fuel by adding carbon nanotubes and dehydrated carbonate sludge. *Petroleum Chemistry*. 2019; 59 (1): 106–110.
3. Vlasova G.V., Salnikova T.V., Pivovarova N.A. Participation of chemical reagents in changing the physical and chemical properties of fuel oil. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2023; 1: 29–36.

4. Hamidreza F.F., Hojat G., Hasan K.M.Sh. Gasification of heavy fuel oil: energy and exergy analysis for various gasifying agents. *Neftekhimiya*. 2021; 61 (2): 184–194.
5. Morozov A.L. et al. Experience in operating a unit for removing hydrogen sulfide from fuel oil. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 2021; 4 (626): 53–56.
6. Makeeva E.N., Nayden E.S. The influence of the concentration of ethanol and isopropanol on the octane number of gasoline and the cetane number of diesel fuel. *Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi*. 2022; 4 (91): 66–72.
7. Vedruchenko V.R. et al. Development of schemes and selection of energy-saving technologies in the design and operation of heating boiler houses. *Energy saving and water treatment*. 2022; 5 (139): 19–22.
8. Hong T. Data and analytics to inform energy retrofit of high performance buildings. *Applied Energy*. 2014; 126: 90–106.
9. Akhmetshin M.R., Nyashina G.S., Medvedev V.V. Anthropogenic gas emissions from the combustion of suspension fuels and oil refining waste. *Coke and Chemistry*. 2021; 4: 36–43.
10. Vetoshkin A.G. *Engineering protection of the atmosphere from harmful emissions. Educational and practical manual*. 2nd ed. Moscow: Infra-Engineering; 2016.
11. Thring R.H. Platinum Improves Economy and Reduces Pollutants from A Range of Fuels. *The Catalytic Engine*. 1980; 24: 126–133.
12. Shapovalov A.V., Zaglubotsky N.Z., Morozova O.Yu. Reconstruction of the fuel economy of the Gomel heating complex. *Modern Problems of Mechanical Engineering. XIII International Scientific and Technical Conference of Students, Masters and Young Scientists*. 2020: 210–212.
13. Rykov A.N., Bushkevich O.A. *Heat supply scheme for the city of Gomel for 2025 with a perspective until 2030: in 3 volumes*. M.: Design Research Republican Enterprise “BelNIPIEnergoProm”; 2018.
14. Open joint-stock company “Mozyr Oil Refinery”. [Electronic resource]. Access mode <https://mnpz.by>. Access date: 10.12.2023.
15. Hu Z. *A Mathematical Model for In-Cylinder Catalytic Oxidation of Hydrocarbons in Spark-ignition Engines*. SAE Paper 961196; 1996.
16. Zvereva E.R. et al. Study of the influence of carbonate additives on the rheological properties of oil boiler fuel. *Industrial Energy*. 2021; 7: 22–26.
17. Orlov M.E., Sharapov V.I. Problems of providing boiler houses with reserve fuel in modern conditions. *Industrial Energy*. 2007; 9: 8–13.
18. Gribkov A.M. Ensuring technological standards for sulfur oxides for thermal power plant boilers. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2020; 22 (6): 164–175.
19. Khalid E.Sh., Ryabov G.A., Bukharkina T.V. Features of the formation and suppression of sulfur oxide emissions during combustion of fuels in an oxygen environment with CO₂ recycling. *Electric Stations*. 2019; 8 (1057): 18–24.

Authors of the publication

Ekaterina N. Makeeva – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi.

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University.

Olga Y. Morozova – Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Получено 29.11.2023 г.

Отредактировано 18.12.2023 г.

Принято 09.01.2024 г.



**РЕКОНСТРУКЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ ЗАО
«НП НЧ КБК ИМ. С.П. ТИТОВА» С РАСШИРЕНИЕМ ЗДАНИЯ**

Низамова А.Ш., Абасев Ю.В.

**Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия**

nizamova_tes@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В России действует большое количество крупных и мелких котельных, снабжающих паром и горячей водой промышленные предприятия. Сегодня более 70% котельных требуют серьезной модернизации, варианты которой могут быть различными. Исследование области модернизации и реконструкции котельных в стране имеет важное значение, так как большая часть оборудования исчерпала свой ресурс, а потребность в теплоснабжении увеличивается в связи с увеличением выпуска промышленной продукции. *ЦЕЛЬ.* Рассмотрение одного из вариантов модернизации и реконструкции конкретной котельной. *МЕТОДЫ.* При рассмотрении варианта, за основу принят пароводогрейный котел, разработанный Таганрогским котельным заводом и известные методы расширения энергетических предприятий. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, представлен вариант модернизации водогрейного котла, дающего возможность работы котла в комбинированном режиме, что позволяет решить вопросы парового резерва в краткосрочной перспективе, а также представлен вариант расширения котельной. *ВЫВОДЫ.* Вариант реконструкции и модернизации промышленно-отопительной котельной с ее расширением и переводом водогрейных котлов в паровой режим является возможностью решения нарастающей потребности производства в технологическом паре.

Ключевые слова: *технологический пар; теплоснабжение; котельная; промышленное производство; водогрейный котел.*

Благодарности: *Подразделению по проектированию объектов тепло- и электрогенерации и инженерных сетей АО «Центр технического заказчика» в городе Казань.*

Для цитирования: Низамова А.Ш., Абасев Ю.В. Реконструкция производственно-отопительной котельной ЗАО «НП НЧ КБК им. С.П. Титова» с расширением здания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 118-130. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-118-130.

**RECONSTRUCTION OF PRODUCTION AND HEATING BOILER PLANT JSC "NP NC
KBK IM. S.P. TITOV" WITH BUILDING EXPANSION**

Nizamova ASh., Abasev YuV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Abstract: *RELEVANCE.* In Russia there are a large number of large and small boiler houses that supply steam and hot water to industrial enterprises. Today, more than 70% of boiler houses require serious modernization, the options for which can be different. Research into the area of modernization and reconstruction of boiler houses in the country is important, since most of the equipment has exhausted its service life, and the need for heat supply is increasing due to the increase in industrial output. *TARGET.* Consideration of one of the options for modernization and reconstruction of a specific boiler house. *METHODS.* When considering the option, the steam-water heating boiler developed by the Taganrog Boiler Plant and well-known methods for expanding energy enterprises were taken as the basis. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, presents an option for modernizing a hot water boiler, which makes it possible to operate the boiler in a combined mode, which allows solving steam reserve issues in the short term, and also

presents an option for expanding the boiler room. **CONCLUSIONS.** The option of reconstructing and modernizing an industrial heating boiler house with its expansion and transfer of hot water boilers to steam mode is an opportunity to solve the growing production need for process steam.

Key words: process steam; heat supply; boiler room; industrial production; hot water boiler.

For citation: Nizamova ASh., AbasevYuV. Reconstruction of production and heating boiler plant JSC "NP NC KBK IM. S.P. Titov" with building expansion. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 118-130. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-118-130.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

В крупных городах России промышленные предприятия, как правило, обеспечиваются паром на технологические нужды и сетевой водой для отопления и горячего водоснабжения от теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). В тоже время в этих городах существует множество предприятий, которые имеют свои собственные паровые или пароводогрейные котельные с паровыми котлами, отпускающими потребителю пар разных параметров, и водогрейными котлами, отпускающими горячую воду на отопление производственных зданий, а также для хозяйственных нужд. В стране также много промышленных городов, большинство из которых были основаны на базе одного или нескольких предприятий и развились из рабочих поселков. Эти города специализируются в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности, и их территории включают обширные промышленные зоны. В таких городах может не быть централизованного теплоснабжения и предприятия для переработки своей продукции используют пар своей котельной, или мини ТЭЦ, часто находящейся на территории данного предприятия. Города Альметьевск в Татарстане и Ачинск в Красноярском крае могут служить примерами таких городов.

Серьезной проблемой таких котельных, как и всей нашей теплоэнергетики стало старение оборудования, которое ведет к неполной его загрузке и как следствие к низкой энергоэффективности. Но, кроме того, износ котельного оборудования и исчерпание его ресурса может привести не только к остановке данного оборудования, но и к частичной или полной остановке самого промышленного предприятия, что в лучшем случае повлечет за собой потерю прибыли, а в худшем – серьезную аварию.

Целью исследования является определение возможности и способа модернизации службы Теплогазоводоснабжения Набережночелнинского картонно-бумажного комбината. Практическая важность данного исследования заключается в содействии стабильной и непрерывной работе комбината.

Анализ публикаций по данной тематике показал, что исследования проводятся, в основном в области повышения энергоэффективности самого котла путем изменения конструкции горелок или поверхностей нагрева. Также рассматривается применение промышленных котлов для получения электрической энергии.

В работе [1] авторы рассмотрели возможность получения электрической энергии на промышленно-отопительной котельной, используя винтовую расширительную машину.

В работе [2] исследованы методы интенсификации теплообмена в форме дискретной шероховатости. Авторами отмечено, что использование разнообразных турбулизаторов в виде дискретной шероховатости позволяет осуществить экономию электроэнергии на прокачку теплоносителя и снизить металлоемкость при создании теплотехнического и теплоэнергетического оборудования.

В работе [3] описывается проект модернизации котла ПТВМ-30, внедренный в крупной котельной города Винница (Украина). Проект предполагал внедрение нескольких технических решений. При реализации этих решений снизился уровень эмиссии оксидов азота и образование оксида углерода.

В статье [4] Петриков С. А. и его коллеги, наряду с авторами работы [2] исследовали интенсификацию теплообмена в отопительных котлах с применением искусственной шероховатости.

Овчинников В.А. и др. в работе [5] изложили сведения о становлении и развитии водогрейного котлостроения на Дорогобужском котельном заводе (далее ДКЗ) за период

1962– 2010 гг. Назвали основные направления совершенствования и модернизации конструкции выпускаемых заводом котлов.

Анализируется возможность оптимального распределения нагрузки между котельными агрегатами, работающими на газе и мазуте, основываясь на критерии максимального КПД в статье Пуринга С.М. и др. [6].

В публикации [7] авторами рассматривается проблема отопления промышленных помещений и цехов различных предприятий.

Статьи Дубровина [8] и Низамутдинова М.И. [9] перекликаются по своей тематике. В работе [8] рассмотрены современные котельные установки, выпускаемые зарубежными производителями и промышленностью РФ. В работе [9] также анализируются современные водогрейные котлы российских и зарубежных производителей.

В работе [10] авторы рассматривают меры, способствующие более эффективному использованию первичных энергетических ресурсов, а также вовлечению в экономику нетрадиционных и восстанавливаемых источников энергии.

В статье [11] авторы Барабаш В.В. и Овчинников В.А., представляющие компанию ОАО «ДКМ», акцентируют внимание на ключевых аспектах модернизации котлов КВ-ГМ и ПТВМ. Среди них: увеличение тепловой мощности при сохранении размера камеры сгорания, улучшение технико-экономических характеристик и экологической безопасности до уровня европейских требований, установка новых горелок, применение автоматизированных систем, сохранение стандартного ассортимента труб и увеличение расхода воды в котле.

В статье [12] рассматриваются возможности повышения КПД котлов малой мощности путем утилизации теплоты отходящих газов для подогрева дутьевого воздуха.

В монографии Прохорова С.Г. [13] приведены примеры модернизации паровых котлов в водогрейный режим.

В зарубежных публикациях достаточно много работ на тему модернизации котлов с целью повышения их энергоэффективности, то есть повышения КПД котлов путем интенсификации теплообмена, снижения температуры уходящих газов при различных способах утилизации тепла отходящих газов и т.д. Но, к сожалению, не так много работ касающихся непосредственно тематики нашей статьи, но приближенные к ней работы есть. Рассмотрим несколько зарубежных публикаций.

В статье Kumar K. и коллег [14] «Роль методов модификации поверхности для предотвращения выхода из строя компонентов, подвергающихся воздействию огня в котле» рассматриваются причины отказов промышленных котлов и предлагаются материалы или комбинации материалов покрытий жаротрубных поверхностей нагрева, что позволит защитить эти трубы от разрушения.

Авторы публикации [15] «Инновационное преобразование водотрубного котла централизованного теплоснабжения для когенерации электрической и тепловой энергии» Свѣнтковски Т. и др. рассматривают метод получения условий когенерации, то есть одновременного производства тепловой и электрической энергии в цикле, где источником тепла является водогрейный котел. Рассмотрим эту работу подробнее в связи с тем, что она близка тематике нашей статьи. На рисунке 1. Представлена модель когенерационной установки на базе водогрейного котла с дросселирующими 2, сепарационными 3 и перегревательными устройствами 4.

Вода нагревается в водогрейном котле до температуры 150 °С и имеет давление выше давления насыщения для этой температуры (4,761 бар). Предполагается, что поток воды изоэнтальпийно дросселируется до давления 3,5 бар, т.е. ниже давления насыщения, что приведет к частичному, незначительному испарению воды примерно 2% от расхода. Далее сепаратор разделяет полученный поток смеси воды и пара на два отдельных потока. Водная фаза используется в первичном цикле нагрева. Поскольку ее массовый поток уменьшается на 2%, то количество тепла, поступающего в теплосеть, уменьшается пропорционально. Насыщенный пар направляется в пароперегреватель 4. Пароперегреватель расположен в байпасе экономайзера водогрейного котла и в него подаются дымовые газы с температурой, позволяющей перегреть пар до 400 °С. Далее, перегретый пар с давлением в 3,5 бара, температурой 400 °С и энтальпией 3275 кДж/кг, используется для приведения в действие

паровой турбины. В турбине, пар расширяется до давления немного выше атмосферного, в результате чего вырабатывается около 0,5 МВт электроэнергии.

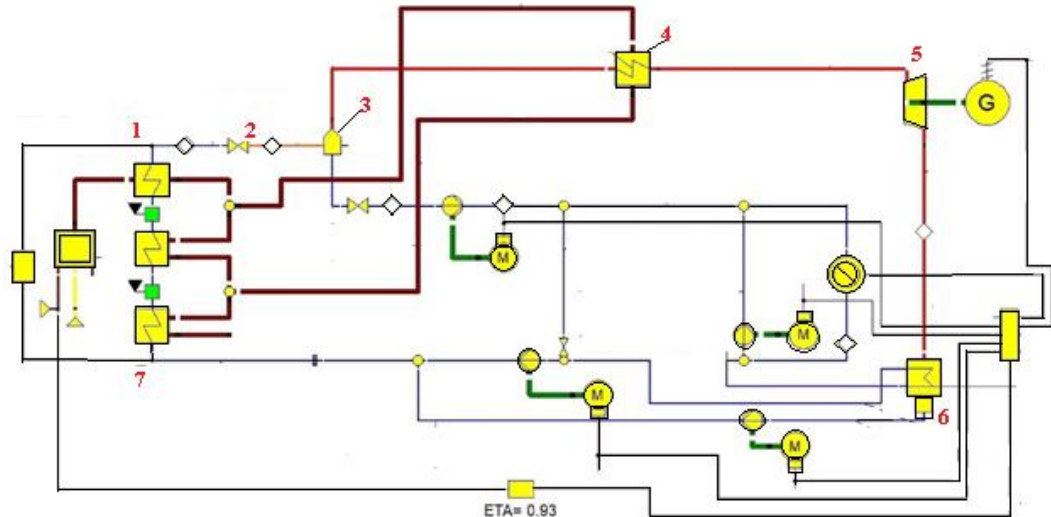


Рис. 1. Модель когенерационной установки на базе водогрейного котла с дросселирующими, сепарационными и перегревательными устройствами

Fig. 1. Model of a cogeneration plant based on a hot water boiler with throttling, separation and superheating devices

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Выходящий из турбины пар направляется в конденсатор, охлаждаемый возвращаемой из города сетевой водой, и рециркулирует обратно в первичный контур. Температура воды, поступающей из города, оказывает существенное влияние на электрическую мощность турбины. В летнее время, когда эта температура может опускаться до 40 °С, она может поглощать больше скрытой теплоты конденсации, чем в зимний период, когда температура возвращаемой воды поднимается примерно до 70 °С. Это позволяет полностью использовать теплоту конденсации пара в системе централизованного теплоснабжения.

В некоторых случаях рекуперированная теплота конденсации приводит также к нагреву питательной воды в котле до 70 °С или даже выше, без необходимости смешивания с горячей водой на выходе из котла. Выработанная электроэнергия сначала используется для собственных нужд, а в случае избыточного производства продается в энергосистему.

В работе [16] исследуется техническая возможность перевода водогрейного котла мощностью 400 кВт в парогенераторный режим. Выработанный пар может использоваться для питания конденсационной или когенерационной паровой турбины, чтобы удовлетворить потребности фермеров в электричестве и тепле. Авторы отмечают, что эти парогенераторы могут быть соединены в параллельную конфигурацию, чтобы удовлетворить потребности в энергии большинства агропромышленных предприятий. Но авторы ошибаются утверждая, что это первая попытка превратить водогрейный котел в парогенератор.

Авторы [16] в дальнейшем продолжили свои исследования в этом направлении, результаты которых представлены в работе [17]. Рассмотрены котлы мощностью 450 – 700 кВт с водогрейными жаровыми трубами, работающие на отходах сельскохозяйственного производства, разработанные компанией EnacheMorărit. Авторы доказали целесообразность преобразования этих котлов в котлы насыщенного пара. Габаритные размеры были обусловлены технологическими возможностями цеха компании. В работе был проведен анализ металлоемкости по категориям технологических компонентов котла с оценкой транспортных проблем и затрат.

Ж. Буюк автор работы «Энергосбережение и тепловая эффективность в бумажной промышленности: пример машины для производства гофрокартона» [18] представил материал по модернизации системы, которая состоит из парового котла (работающего на природном газе), трубопроводов пара и конденсата и установки для производства гофрокартона (потребителя пара). Им предложен закрытый бак для конденсата вместо открытого, чтобы исключить вторичное пропаривание. В станке для изготовления картона изменена система температурного контроля. Таким образом, была устранена причина

вторичного пропаривания и сохранен поток пара через картоноделательную машину, что исключило потери энергии и тепла.

Проанализировав достаточно большое количество научных работ, была найдена одна статья российских авторов, рассматривающая вопрос перевода промышленного котла из одного режима в другой, а точнее из парового – в водогрейный [13]. Среди зарубежных работ таких публикаций оказалось немного больше [15, 16, 17]. Но, что важно, ими рассмотрены различные возможности перевода именно водогрейных котлов в паровой режим.

Материалы и методы (materials and methods)

Реконструкция и модернизация котельной проводятся в соответствии с Программой развития, реконструкции и модернизации основных производственных фондов ЗАОР «Народное предприятие Набережночелнинский картонно-бумажный комбинат им. С.П. Титова» до 2025 г.

Цель этого процесса – повышение технико-экономических показателей, для обеспечения экономической обоснованности и максимальной энергетической эффективности всей котельной.

Как правило производственному потребителю требуется пар различных параметров от 8 кгс/см² до 24 кгс/см² иногда 40 кгс/см². Горячая вода может использоваться для бытовых и производственных целей, а также для отопления.

На рисунке 2 можно увидеть принципиальную схему пароводогрейной котельной.

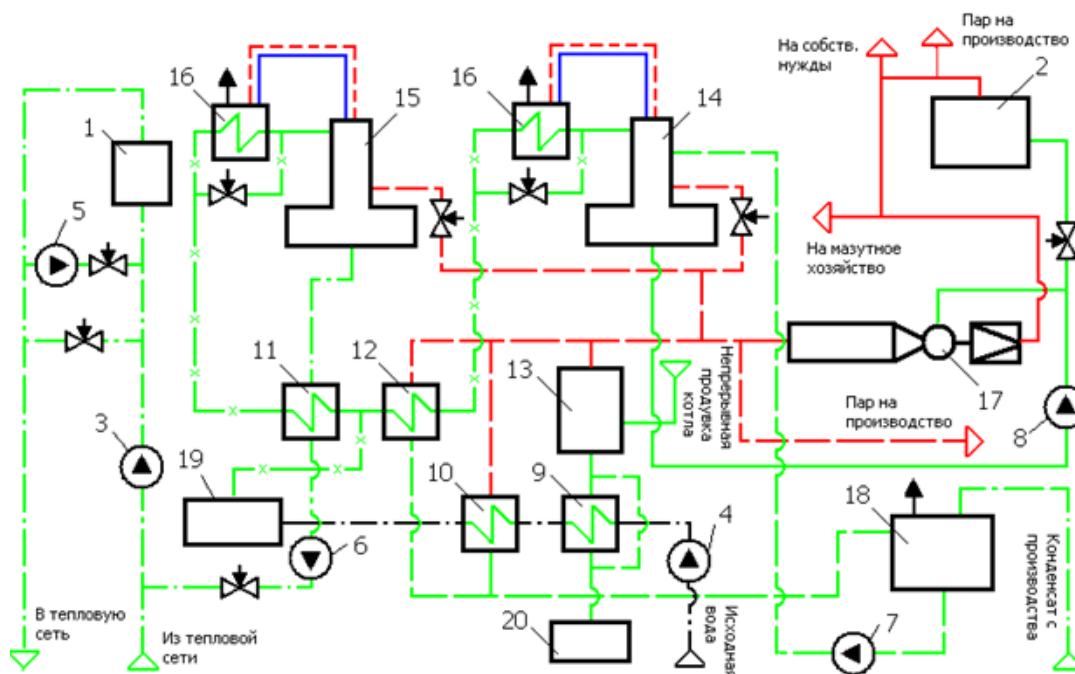


Рис.2. Принципиальная тепловая схема котельной с паровыми и водогрейными котлами:

1 – водогрейный котел, 2 – паровой котел, 3 – сетевой насос (СН), 4 – насос исходной воды, 5 – насос рециркуляции, 6 – подпиточный насос, 7 – конденсатный насос (КН), 8 – питательный насос, 9 – охладитель продувочной воды, 10 – подогреватель исходной воды, 11 – охладитель подпиточной воды, 12 – подогреватель хим. очищенной воды (ПХОВ), 13 – сепаратор непрерывной продувки, 14 – деаэрактор питательной воды, 15 – деаэрактор подпиточной воды, 16 – охладитель выпара, 17 – редукционно-охладительное устройство, 18 – бак конденсатный, 19 – установка для подготовки воды, 20 – продувочный колодец

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Fig.2. Schematic thermal diagram of a boiler room with steam and hot water boilers:

1 – hot water boiler, 2 – steam boiler, 3 – network pump (SN), 4 – source water pump, 5 – recirculation pump, 6 – makeup pump, 7 – condensate pump (CN), 8 feed pump, 9 – purge cooler water, 10 – source water heater, 11 – make-up water cooler, 12 – chemical heater, purified water (PHOV), 13 – continuous blowing separator, 14 – feed water deaerator, 15 – make-up water deaerator, 16 – vapor cooler, 17 – reduction-cooling device, 18 – condensate tank, 19 – water treatment unit, 20 – blow-off well

Сегодня промышленные предприятия ставят перед собой задачу увеличить количественно выпуск своей профильной продукции со снижением ее себестоимости. С этой

целью они модернизируют свое производство с внедрением современных технологий. Но выпуск какой-либо продукции невозможен без использования пара и горячей воды в технологическом процессе. Следовательно, увеличение выпуска промышленной продукции ведет к увеличению прежде всего производства пара на промышленных котельных и горячей воды в том числе. Для промышленных предприятий приоритетом является надежность паро- и теплоснабжения. Аварии в котельных приведут в лучшем случае к останову производства предприятий, в худшем – к аварии на предприятии.

Одной из насущных проблем сегодня остается высокий уровень изношенности оборудования в котельных. Большая часть оборудования была установлена в восьмидесятих годах прошлого века, а его расчетный срок службы, как правило, составляет 30 лет, хотя в некоторых случаях он может быть и большим. В настоящее время большой парк котлов малой и средней мощности физически и морально изношен. Количество и объем ремонтов для этих котлов увеличиваются. Кроме того, котлы не соответствуют современным экологическим нормам по уходящим газам, превышение окислов азота (NOx) составляет не менее 125 мг/м³ при работе на газе и 250 мг/м³ при работе на мазуте.

Паровые котлы на многих котельных работают без резерва. Котлам приходится работать с периодическим превышением номинальной производительности. Очевидно, что для обеспечения надежного теплоснабжения предприятий, при работе на максимальных нагрузках котельным требуется наличие резерва котельного оборудования. Это можно осуществить, расширив котельное предприятие новыми современными паровыми котлами с высоким уровнем автоматизации и водоподготовки. Расширение, то есть строительство по новому проекту следующей очереди котельной приведет к увеличению его производственной мощности в более короткие сроки и при меньших затратах по сравнению с созданием аналогичных мощностей вследствие нового строительства. Но это все равно очень дорого для промышленного предприятия, которое обновляет свое производство. Поэтому на каком-то этапе можно обойтись незначительной модернизацией действующего оборудования, но с последующим расширением производственной котельной.

Примером такой производственной котельной может являться котельная ЗАОр «НП НЧ КБК им. С.П. Титова», так называемая служба Теплогазоводоснабжения.

Пароводогрейная котельная картонно-бумажного комбината была введена в эксплуатацию в 1987 году вместе с запуском парового котла Е-160-2,4-250 ГМ марки ТГМЕ-187 под номером 1. В котельной комбината установлены и эксплуатируются два котла типа Е-160-2,4-250 ГМ марки ТГМЕ-187 Таганрогского котельного завода «Красный котельщик» и два котла марки ПТВМ-30 Дорогобужского котельного завода.

На рисунке 3 представлена технологическая схема котельной с двумя паровыми котлами типа Е-160-2,4-250 ГМ и двумя водогрейными котлами типов ПТВМ-30М (КВ-ГМ-35-150М).

Котлы Е-160-2,4-250 ГМ производят пар под давлением 24 кгс/см², который затем редуцируется до различных уровней давления для разных нужд картонной и бумажной фабрик.

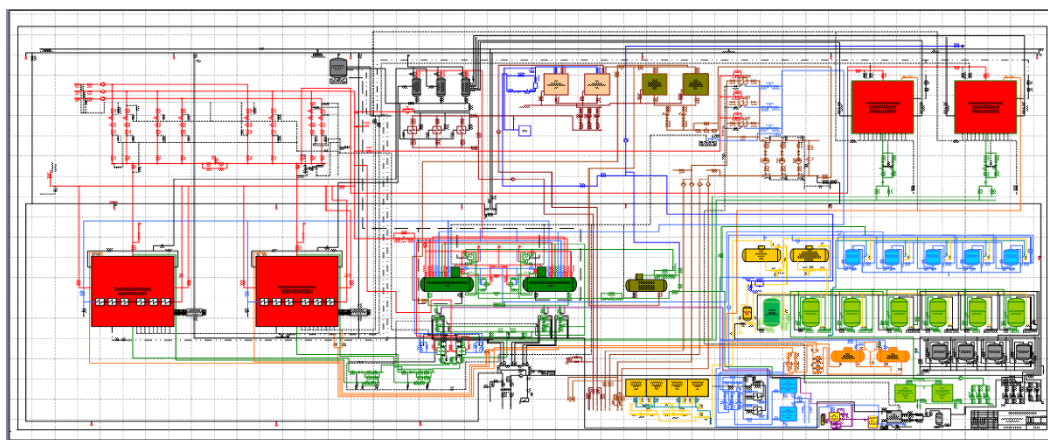


Рис. 3. Технологическая схема промышленной котельной закрытого акционерного общества «Народное предприятие Набережночелнинский КБК им.С.П.Титова»

Fig. 3. Technological diagram of an industrial boiler house JSC "NP NC KBK im. S.P. Titov"

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

В котельной комбината также осуществляется подготовка воды для системы отопления комбината.

В настоящее время котлы Е-160-2,4-250 ГМ физически изношены и часто выводятся в аварийный ремонт. На сегодняшний день требуется капитальный ремонт котлов с заменой всей конвективной части котла.

Паровая нагрузка котельной при работе на мазуте в самое холодное время года составляет 234 т/ч:

- пар 8 кгс/см² на КДМ – 70 т/ч (картонная фабрика);
- пар 16 кгс/см² на нагрев спрысковой воды – 15 т/ч;
- пар 16 кгс/см² на ФГТ (фабрика гофротары) – 8 т/ч;
- пар 14 кгс/см² на БДМ (бумажная фабрика) – 6 т/ч;
- пар 14 кгс/см² на РПО ВК КФ – 15 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на теплосеть – 60 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на нагрев мазута – 10 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на распыл мазута – 10 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на нагрев дутьевого воздуха в калориферах – 10 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на подогрев питательной воды – 15 т/ч;
- пар 8 кгс/см² на деаэрацию воды – 15 т/ч.

Для покрытия нагрузок до 240 т/ч необходимо включить в работу оба паровых котла и надежно отработать весь период установившейся нагрузки. При таком режиме работы надежность теплоснабжения комбината минимальна так как отсутствует резерв. При аварийном отказе одного из котлов, необходимо ограничить нагрузку до 160 т/ч, которую максимально может дать один паровой котел. Это не покроет технологические нужды комбината. В таком случае необходимо будет ввести ограничения либо на отопление и вентиляцию, либо ограничить работу картонно-бумажной машины (КДМ).

Очевидно, что для обеспечения надежного теплоснабжения комбината, при работе на максимальных нагрузках, требуется наличие резервного основного оборудования.

Поэтому было предложено чисто водогрейные котлы ПТВМ-30 реконструировать и модернизировать с переводом в паровой режим работы типа Е-40-2,4-250 ГМ марки ПТВМ-30М(р) с номинальной производительностью 40 т/ч пара.

Подготовку горячей воды можно осуществлять в сетевых подогревателях вертикального типа (ПСВ), подогревая паром паровых котлов.

Технология реконструкции базируется на конструкции уже известных комбинированных котлов, выпускаемых Дорогобужским котельным заводом (ДКЗ). Такие котлы устанавливались в котельных с основной нагрузкой на отопление и вентиляцию и городское водоснабжение. Паровая нагрузка в них, в основном на собственные нужды котельной, не превышает 10 – 15 % общей производительности котельной. Потребление пара иногда резко меняется в течение суток. Первые такие котлы построены ДКЗ на базе водогрейных котлов ПТВМ-30М еще в 1965 году. В этих котлах испарительные поверхности представлены в виде боковых топочных экранов, входящие без барабанные контуры с естественным циклическим движением. Сепарация пара осуществляется в двух выносных циклонах Ø 426х13 мм.

На рисунке 4 представлена конструкция газомазутного котла типа ПТВМ-30М (КВ-ГМ-35-150М). Водогрейные котлы ПТВМ-30М (КВ-ГМ-35-150М) используются в отопительных котельных для обеспечения основного теплоснабжения и нагрева воды от 70 °С до 150 °С. Их топка полностью окружена трубами диаметром 60 мм и толщиной стенки 3 мм, которые расположены на расстоянии 64 мм друг от друга, и оснащена шестью горелками для работы на газе или мазуте, установленными в противоположных сторонах боковых стенок. Диапазон регулировки мощности котлов от 30 до 100% их номинальной теплопроизводительности. Для поддержания стабильного расхода воды через котел требуется сохранять постоянную разницу температур на входе и на выходе из котла. Конвективные теплообменники располагаются в газоходе с конвектором, боковые стенки которого экранированы с помощью труб диаметром 28 мм и стенкой 3 мм с шагом между ними 128 мм. Такие трубы служат в качестве коллекторов для ширм U-образной формы, выполненных из тех же труб. Эти ширмы устанавливаются таким образом, чтобы трубы формировали конвективный шахматный пучок, с расстоянием между ними в 64 и 40 мм соответственно.

На рисунке 5 показана схема работы модернизированного водогрейного котла ПТВМ-30М в режимах выработки пара и горячей воды.

Для обеспечения работы котла ПТВМ-30М в исключительно паровом режиме необходимо оборудовать его паровым контуром. Этот контур включает в себя два внешних циклона и две выравнивающие емкости, изготовленные из труб диаметром 636 мм и толщиной 14 мм.

Внешний циклон №5 и выравнивающая емкость №7 включены в контур естественной циркуляции топочных экранов №1, №2 и №3. Поверхности нагрева конвективной камеры 4 функционируют в качестве парового контура с многократной принудительной циркуляцией и подключаются к внешнему циклону 6 и отдельно взятой уравнивающей ёмкости 7. Многократную принудительную циркуляцию обеспечивает насос рециркуляции 8.

При работе на мазуте рассматриваемый котёл может вырабатывать примерно 60 тонн пара в час. При работе на природном газе это число увеличивается до 70 тонн в час. Рабочее давление пара варьируется от 14 до 24 кгс/см² в зависимости от нужд потребителя.

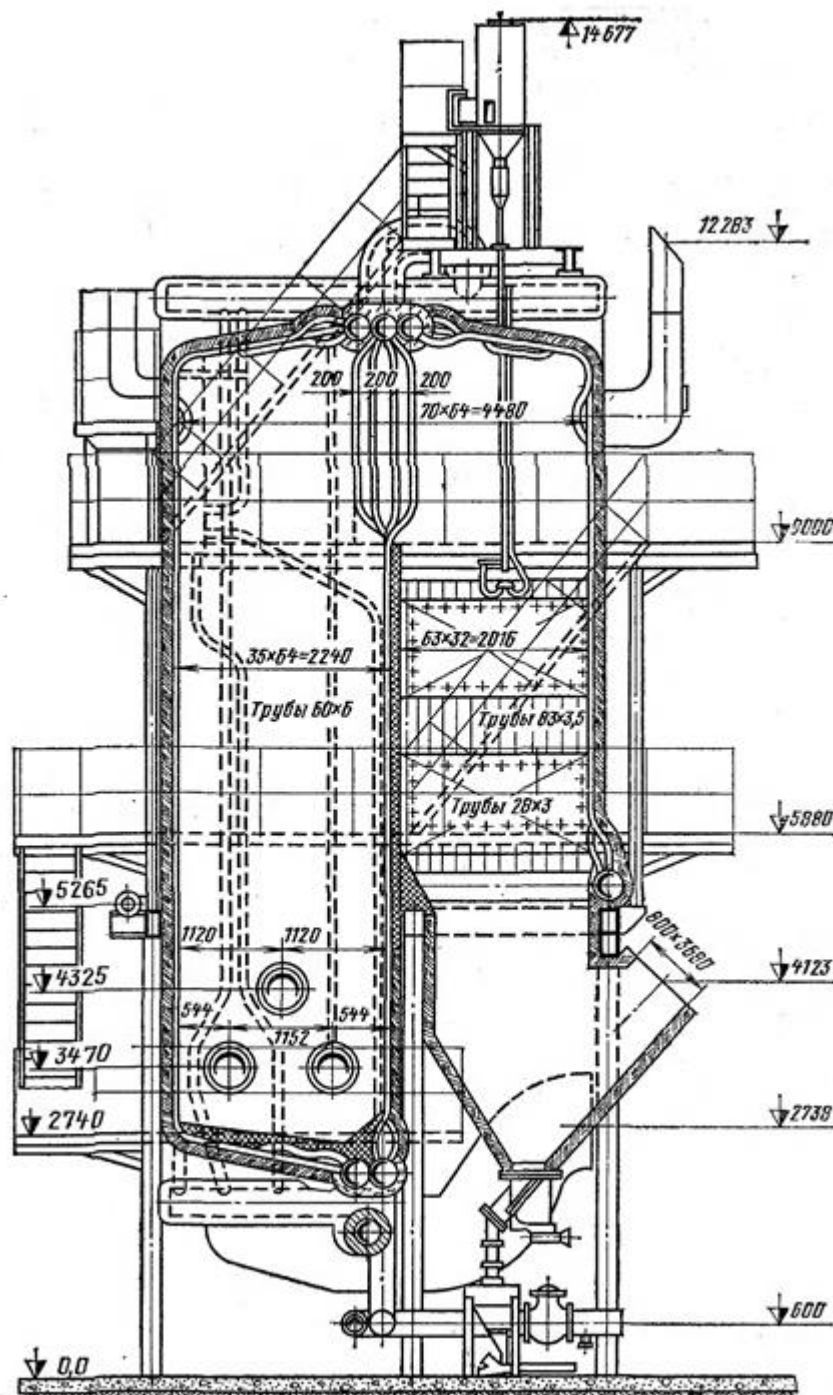


Рис. 4. Конструкция газомазутного котла типа PTVM-30M (KV-GM-35-150M)

Fig. 4. Design of gas-oil boiler type PTVM-30M (KV-GM-35-150M)

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Работа котла в водогрейном режиме сохраняется полностью по схеме серийного котла ПТВМ-30М. Следует отметить, что для работы котла в обоих режимах без каких-либо

переделок используются все унифицированные элементы и трубы серийного котла ПТВМ-30М.

Кроме того, для создания парового контура, состоящего из указанных выше циклонов, уравнильных емкостей требуется установка в пределах котла дополнительных наружных соединительных трубопроводов.

Насосы рециркуляции НКУ-250 можно использовать в качестве циркуляционных насосов для обеспечения множественной принудительной циркуляции и подключения к тепловой сети при работе котла в режиме нагрева воды.

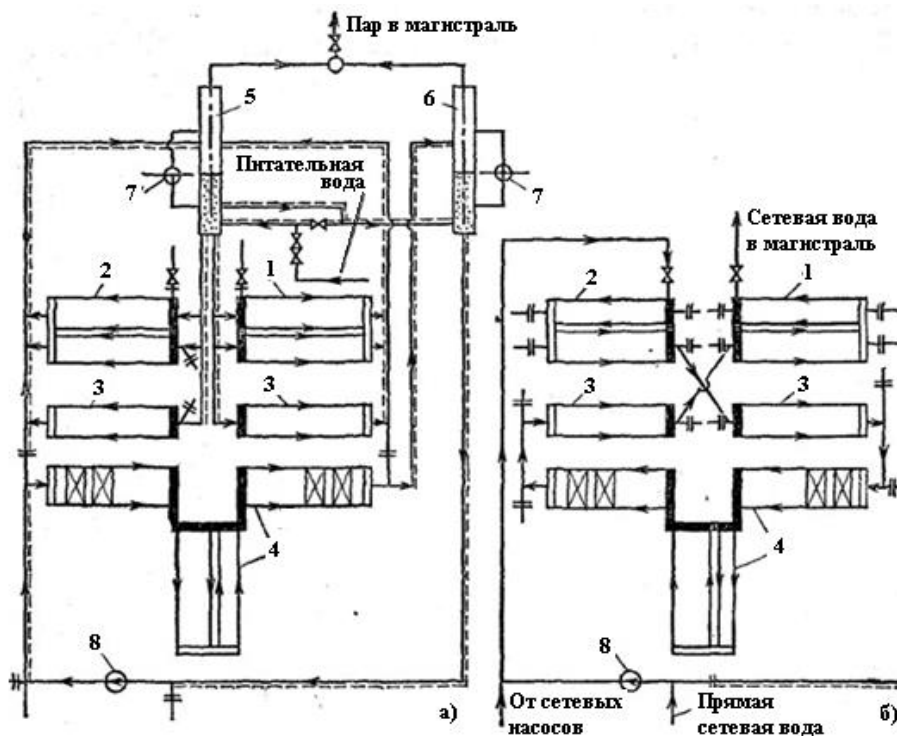


Рис. 5. Принципиальная схема работы котла ПТВМ-30-М: а – в паровом режиме, б – в водогрейном режиме. 1 – фронтальный топочный экран, 2 – задний топочный экран, 3 – боковые топочные экраны, 4 – нагревательные поверхности в конвективном канале, 5 – удаленный циклон топочного канала, 6 – удаленный конвективный циклон, 7 – компенсационные резервуары, 8 – насос для рециркуляции теплоносителя

Fig. 5. Schematic diagram of the operation of the PTVM-30-M boiler in steam and hot water modes: a – steam mode, b – water heating mode. 1 – front combustion screen, 2 – rear combustion screen, 3 – side combustion screens, 4 – heating surfaces in the convection channel, 5 – remote cyclone of the combustion channel, 6 – remote convective cyclone, 7 – compensation tanks, 8 – recycling pump

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Для перехода с парового режима на водогрейный и наоборот необходим кратковременный останов котла, спуск воды и смена заглушек на наружных соединительных трубопроводах.

Работа модернизированных котлов на отпуск пара может покрыть потребность предприятия в летний период. Но суммарная производительность этих котлов 80 т/ч. В предыдущие годы эти котлы работали с периодическим превышением номинальной производительности.

Если в дальнейшем суммарные технологические нужды комбината в летний период не превысят 70 – 72 т/ч, а собственные нужды котельной составят до 8 – 10 т/ч., то возможна работа котлов ПТВМ-30М(р) в пределах номинальной производительности. Но если потребности будут выше, необходимо вводить в работу котел Е-160-2,4-250 ГМ. В связи с этим предлагается вариант реконструкции котельной, предусматривающий расширение здания котельной и установку нового котла Е-160-2,4-250 ГМ. После этого предлагается произвести замену действующих паровых котлов на новые. На рисунке 6 представлена схема котельной с указанным дополнительным паровым котлом Е-160-2,4-250 ГМ, а на рисунке 7 показан процесс монтажа третьего парового котла.

Назовем преимущества такой реконструкции котельной:

- строительство на новой площадке имеет более высокий уровень безопасности, чем работы в действующем цехе Теплогазоводоснабжения;
- ввод резерва на весь период реконструкции;
- снижение эксплуатационных потерь пара;
- наличие дополнительных площадей для оптимизации работы котельной;
- равномерность распределения потоков дымовых газов по дымовой трубе;
- сохранение схемы управления котлов Е-160-2,4-250 ГМ;
- любой ремонт в течение года без потери резерва.

К недостаткам расширения котельной стоит отнести:

- строительство вблизи действующего надземного газопровода потребует дополнительных мер безопасности;
- потребуются изменение трассы наружных газопроводов в районе строительства для прокладки газоходов к дымовой трубе;
- дополнительные экономические затраты по строительству.

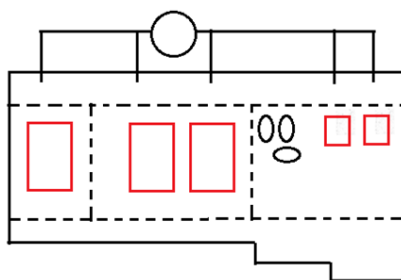


Рис. 6 Схема котельной с третьим котлом

Fig. 6 Diagram of a boiler room with a third boiler

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

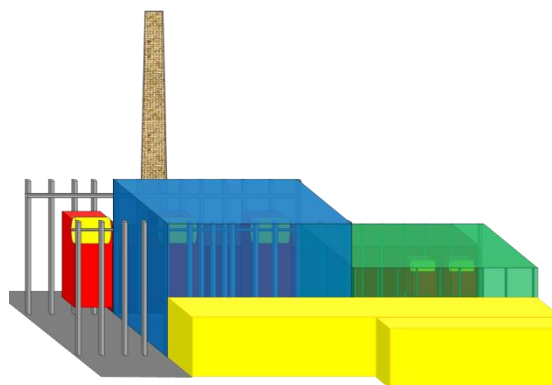


Рис. 7. Монтаж котла Е-160-24-250 ГМ № 3

Fig. 7. Installation of boiler E-160-24-250 GM No.3

* Источник: составлено авторами (Source: compiled by the author).

Результаты (Results)

Выполненные инженерно-технические мероприятия по реконструкции и модернизации котельной в соответствии с принятыми технологическими решениями позволит обеспечить бесперебойную работу картонно-бумажного комбината, не нарушая технологического цикла производства, что будет способствовать высоким экономическим результатам предприятия и получению прибыли.

Заключение (conclusion)

Для надежной и бесперебойной работы промышленных предприятий, снабжаемых технологическим паром от собственной котельной, необходимо модернизировать и реконструировать котельные. Модернизация имеющегося оборудования дает временный резерв по тепловой нагрузке. При этом происходит замена морально и физически устаревшей схемы управления на современную автоматизированную систему управления технологическими процессами. Но в дальнейшем требуется реконструкция этих предприятий путем расширения с установкой современного более технологичного оборудования. В этом случае, имеющееся оборудование может оставаться в котельной в качестве резервного.

Литература

1. Ротач Р.Р., Ваньков Ю.В., Валиев Р.Н. Методика расчета энергетических показателей энергокомплекса, включающего промышленно-отопительную котельную и винтовую расширительную машину // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 2(58). С 3–15.
2. Олимпиев В.В., Мирзоев Б. Г., Попов И.А. и др. Повышение эффективности теплообменных труб энергетических установок / // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92, № 3. – С. 608-618.
3. Гламаздин П.М., Гламаздин Д.П., Ярмольчик Ю.П. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 249-259.
4. Волков А.В., Петриков С.А., Попов В.С. и др. Разработка методов интенсификации теплопередачи в трубных пучках водогрейных котлов и теплообменных аппаратах // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 10. – С. 12-15.
5. Овчинников В.А., Петриков С.А., Крылов А.К. Обобщение опыта эксплуатации водогрейных котлов ОАО "Дорогобужкотломаш" // Теплоэнергетика. – 2011. – № 12. – С. 42.
6. Пуринг С.М., Черепанова Е.Д. Оптимизация работы котельной при сжигании жидкого и газообразного топлива // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей, электронный ресурс / под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пишулева, А. К. Стрелкова. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2018. – С. 383-387.
7. Трифонов А.П., Тарасова Е.В., Савенков Ф.И. Отопление промышленных помещений. Котельное оборудование и его экологичность // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых: в 6 томах, Курск, 19–20 мая 2020 года. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 379-382.
8. Дубровин И., Дубровин Е. Котельные установки XXI века: перспективы развития// ГАЗЕТА: Тепловая энергетика и ЖКХ. 2019. № 01(40) <https://www.eprussia.ru/teploenergetika/40/>
9. Низамутдинов М.И., Низамова А.Ш. Современные водогрейные котлы российских и зарубежных производителей // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сборник научных статей по итогам второй международной научной конференции, Казань, 28–29 февраля 2020 года. Ч. 1. – Казань: ООО "Конверт", 2020. – С. 135-136.
10. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. Энергетическая эффективность модернизации котельной промышленного предприятия // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2016. – Т. 72, № 2. – С. 25-31.
11. Барабаш В.В., Овчинников В.А. Модернизация водогрейных котлов КВ-ГМ и ПТВМ: о внедренных технических решениях и новых разработках // Новости теплоснабжения. 2013. № 4(152). С. 25-28.
12. Прохоров С.Г., Назаров И.С. Повышение энергоэффективности котлов малой мощности // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2018. – № 5. – С. 175-183. – DOI 10.17122/ogbus-2018-5-175-183.
13. Прохоров С.Г. Модернизация водогрейных и паровых котлов малой мощности. Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2015. – 120 с. – ISBN 978-5-9282-1343-5.
14. Kumar K., Kumar S., Gill HS. Role of Surface Modification Techniques to Prevent Failure of Components Subjected to the Fireside of Boilers. J Fail. Anal. and Preven. 23, 1–15 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01556-w>
15. Świątkowski T., Kalisz S., Wnorowska J. An innovative conversion of a district heating water-tube boiler for cogeneration of electricity and heat // Results in Engineering. – 2022. – Vol. 13. – P. 100350. – DOI 10.1016/j.rineng.2022.100350.
16. Mihăescu L., Negreanu G., Pișă I., Berbec V., Lăzăroiu G. and Enache E. "New design of a flame-tube steam generator based on a hot water boiler burning agricultural waste," 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279081.
17. Pișă I., Negreanu G. P., Mihăescu L., Berbec V. and Lăzăroiu G., "New design developments of a steam generator with flame tubes derived from a hot water boiler burning agricultural biomass," 2022 8th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEAE53789.2022.9831268.
18. Bujak J. Energy savings and heat efficiency in the paper industry: A case study of a corrugated board machine, Energy, Vol. 33, Issue 11, 2008, Pages 1597-1608, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208001710>).

Авторы публикации

Низамова Альфия Шарифовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета.

Абасев Юрий Васильевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции (АТЭС) Казанского государственного энергетического университета.

References

1. Rotach RR, Vankov YuV, Valiev RN. Methodology for calculation of energy indicators of the energy complex, including industrial heating boiler and screw expansion machine// Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2023; 15. 2(58):3–15.
2. Olimpiev VV, Mirzoev BG, Popov IA, et al. Raising the Efficiency of Heat-Exchange Tubes of Power Installations // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2019; 92(3): 585-595. – DOI 10.1007/s10891-019-01966-y.
3. Glamazdin PM, Glamazdin DP, Yarmol'chik YuP. Ekologicheskie aspekty modernizatsii vodogreinykh kotlov bol'shoi moshchnosti // Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniii energeticheskikh ob"edinenii SNG. 2016; 59(3):249-259.
4. Petrikov SA. Razrabotka metodov intensivatsii teploperedachi v trubnykh puchkakh vodogreinykh kotlov i teploobmennyykh apparatakh / A. V. Volkov, S. A. Petrikov, V. S. Popov, N. N. Khovanov // Tyazheloe mashinostroenie. 2008; 10:12-15.
5. Ovchinnikov VA, Petrikov SA, Krylov AK. Generalization of experience gained from operation of hot-water boilers produced by OAO Dorogobuzhkotlomash // Thermal Engineering. 2011; Vol. 58,12:1016-1021. – DOI 10.1134/S0040601511120081.
6. Puring SM, Cherepanova ED. Optimizatsiya raboty kotel'noi pri szhiganii zhidkogo i gazoobraznogo topliva // Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nye tekhnologii: sbornik statei, elektronnyi resurs / pod redaktsiei M.V. Shuvalova, A.A. Pishchuleva, A.K. Strelkova. – Samara : Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. pp.383-387.
7. Trifonov AP, Tarasova EV, Savenkov FI. Otoplenie promyshlennykh pomeshchenii. Kotel'noe oborudovanie i ego ekologichnost' // Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany: sbornik nauchnykh statei 5-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh: v 6 tomakh, Kursk, 19–20 maya 2020 goda. Vol 4. – Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2020. pp. 379-382.
8. Dubrovin I, Dubrovin E. Kotel'nye ustanovki XXI veka: perspektivy razvitiya// GAZETA: Teplovaya energetika i ZhKKh. 2019. № 01(40) <https://www.eprussia.ru/teploenergetika/40/>
9. Nizamutdinov MI, Nizamova AS. Sovremennye vodogreinye kotly rossiiskikh i zarubezhnykh proizvoditelei // Prioritetnye napravleniya innovatsionnoi deyatel'nosti v promyshlennosti : sbornik nauchnykh statei po itogam vtoroi mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Kazan, 28–29 fevralya 2020 goda. Ch. 1. Kazan: OOO "Konvert"; 2020. pp.135-136.
10. Gumerova RH, Chernyakhovskiy VA. Energy efficiency of modernization of boiler station of manufacturing plant // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva. 2016; 72(2):25-31.
11. Barabash VV, Ovchinnikov VA. Modernizatsiya vodogreinykh kotlov KV-GM i PTVM: o vnedrennykh tekhnicheskikh resheniyakh i novykh razrabotkakh // Novosti teplosnabzheniya. 2013; 4(152):25-28.
12. Prokhorov SG, Nazarov I.S. Increase of energy efficiency boilers of small power // Network journal «Oil and gas business». 2018; 5: 175-183. DOI:<https://doi.org/10.17122/ogbus-2018-5-175-183>.
13. Prokhorov SG. Modernizatsiya vodogreinykh i parovykh kotlov maloi moshchnosti. Penza : Penzenskii gosudarstvennyi universitet arkhitektury i stroitel'stva, 2015; 120 p.
14. Kumar K, Kumar S, Gill HS. Role of Surface Modification Techniques to Prevent Failure of Components Subjected to the Fireside of Boilers. J Fail. Anal. and Preven. 23, 1–15 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01556-w>
15. Świątkowski T, Kalisz S, Wnorowska J. An innovative conversion of a district heating water-tube boiler for cogeneration of electricity and heat // Results in Engineering. 2022; 13: 100350. – DOI 10.1016/j.rineng.2022.100350.
16. Mihăescu L, Negreanu G, Pișă I, Berbec V, Lăzăroiu G, Enache E. "New design of a flame-tube steam generator based on a hot water boiler burning agricultural waste," 2020 7th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEAE49144.2020.9279081.
17. Pișă I, Negreanu GP, Mihăescu L, Berbec V, Lăzăroiu G. "New design developments of a steam generator with flame tubes derived from a hot water boiler burning agricultural biomass," 2022 8th International

Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), Ruse, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEAE53789.2022.9831268.

18. Bujak J, Energy savings and heat efficiency in the paper industry: A case study of a corrugated board machine, Energy, Vol. 33, Issue 11, 2008, pp. 1597-1608, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.005>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208001710>).

Authors of the publication

Alfiya S. Nizamova – Kazan State Power Engineering University.

Yuri V. Abasev– Kazan State Power Engineering University.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки).

Получено

11.12.2023 г.

Отредактировано

25.12.2023 г.

Принято

09.01.2024 г.



ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИНТЕЗ-ГАЗА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

nova-mara0607@list.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Недостаточно широкая область применения газотурбинных установок (ГТУ) связана с отсутствием повсеместной доступности газовых магистралей, поставляющих основное топливо – природный газ. Интерес к альтернативным видам топлива и поиск наиболее подходящих из них с целью перехода с традиционных источников энергии интенсивно возрастал с течением времени. В настоящее время существуют методы газификации твердого топлива, расширяющие не только возможности использования самого топлива, но и раздвигающие границы применимости ГТУ как в плане производственной специализации, так и географического расположения. Уголь является самым доступным и распространенным в мире традиционным топливом, но его использование на современных энергообъектах ограничено в связи с всемирной политикой декарбонизации энергетики. Газификация угля позволяет повысить энергетические характеристики и уменьшить количество выбросов вредных веществ в атмосферу при применении угля. **ЦЕЛЬ.** Определение эффективности и целесообразности использования генераторного газа, получаемого из угля, в ГТУ, а также рассмотрение возможности ее модернизации. **МЕТОДЫ.** Для достижения поставленной цели, будет использоваться автоматизированная система газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ), которая позволяет производить численные исследования на математической модели газотурбинной установки при изменении характеристик с применением модуля аппроксимации компонентного состава топлива. Исследования проводятся при изменении электрической нагрузки газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ в диапазоне от 15 до 18 МВт. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** По итогам исследования были получены зависимости суммарного часового и удельного расхода топлива, эффективного коэффициента полезного действия (КПД), температуры в камере сгорания и на выходе из силовой турбины от изменения электрической нагрузки газотурбинной установки. Имея более низкую теплотворную способность, ожидаемо синтез-газ снижает электрическую эффективность ГТУ, что выражается в уменьшении КПД на 3–4,5 %. Одновременно с этим, повышается расход топлива примерно в 4–5 раз, что зависит от компонентного состава топлива. При этом значения температур на выходе газовой турбины изменяется на 26 до 37 °С. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Использование синтез-газа как топлива для газотурбинной установки может обеспечивать достаточную эффективность в генерации электрической энергии, однако его применение рационально исключительно в ситуациях отсутствия или недоступности традиционного газообразного топлива. Развитие технологий газификации повысит эффективность при использовании и снизит стоимость производства синтез-газа. Это позволит внедрять технологии газификации на действующих объектах и расширит область применения синтез-газа, что обеспечит повышенный интерес к данному направлению у потенциальных инвесторов.

Ключевые слова: газотурбинная установка; синтез-газ; уголь; генераторный газ, газификация; газодинамические расчеты; математическое моделирование.

Для цитирования: Новоселова М.С., Мингалеева Г.Р., Марьин Г.Е., Титов А.В. Перспективы использования синтез-газа в газотурбинных установках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 131-143. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.

PERSPECTIVES OF USING SYNGAS IN GAS TURBINE PLANTS

Novoselova MS., Mingaleeva GR., Marin GE., Titov AV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

nova-mara0607@list.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The insufficiently wide scope of gas turbine plants (GTP) is associated with the lack of widespread availability of gas pipelines supplying the main fuel – natural gas. Interest in alternative fuels and the search for the most suitable ones in order to switch from traditional energy sources has increased intensively over time. Currently, there are methods of gasification of solid fuels that expand not only the possibilities of using the fuel itself, but also pushing the boundaries of the applicability of GTP both in terms of production specialization and geographical location. Coal is the most affordable energy resource in the world, due to its prevalence, but its limited use in modern energy facilities is due to the worldwide policy of decarbonization of energy. Coal gasification makes it possible to increase energy characteristics and reduce emissions of harmful substances into the atmosphere when using coal. *THE PURPOSE.* Determination of the efficiency and expediency of using generator gas obtained from coal in gas turbine plant, as well as consideration of the possibility of its modernization. *METHODS.* To achieve set goal, an automated system of gas dynamic calculations of energy turbomachines (AS GDCET) will be used, which will calculate a mathematical model of a gas turbine installation and conduct numerical studies when characteristics change, as well as using a module for approximating the component composition of fuel. The research is carried out when the electric load of a gas turbine plant of the NK-16-18 ST type changes in the range from 15 to 18 MW. *RESULTS.* According to the results of the study, the dependences of the total hourly and specific fuel consumption, effective efficiency, temperature in the combustion chamber and at the outlet of the power turbine on changes in the electric load of the gas turbine installation were obtained. Having a lower calorific value, the expected synthesis gas reduces the electrical efficiency of the gas turbine engine, which is expressed in a decrease in efficiency by 3-4.5%. At the same time, fuel consumption increases by about 4-5 times, which depends on the component composition of the fuel. At the same time, the temperature values at the exhaust of the gas turbine change by 26-37 °C. *CONCLUSION.* The use of synthesis gas as fuel for a gas turbine plant can provide sufficient efficiency in generating electric energy, but its use is rational only in situations of absence or unavailability of traditional gaseous fuels. The development of gasification technologies will increase the efficiency of use and reduce the cost of synthesis gas production. This will allow the introduction of gasification technologies at existing facilities and expand the scope of synthesis gas applications, which will ensure increased interest in this area among potential investors.

Keywords: gas turbine plant; synthesis gas; coal; generator gas; gasification; gas dynamic calculations; mathematical modeling.

For citation: Novoselova MS., Mingaleeva GR., Marin GE., Titov AV. Perspectives of using syngas in gas turbine plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 131-143. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-131-143.

Введение (Introduction)

Наращивание производственных мощностей в сфере энергетики требует увеличения потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Учитывая такую тенденцию и факт того, что запасы ископаемых ресурсов конечны, формируется проблема поиска альтернативных ТЭР. При поиске альтернативы традиционным ископаемым энергоресурсам руководствуются некоторыми критериями соответствия:

- экономичность производства топливного ресурса;
- сопоставимость энергетических характеристик с традиционным топливом;
- экологичность использования нетрадиционного топлива, связанного с выбросами вредных веществ, в частности NO_x и CO_2 .

Однако, в данный момент нет ни одной реальной альтернативы природному газу, которая соответствовала бы всем критериям. В основном проблема состоит в высокой стоимости производства энергоресурса и относительно низкой теплотворной способности.

В настоящее время внимание приковано к новым перспективным технологиям, которые с развитием техники в состоянии конкурировать с углеводородным топливом: биотопливо, синтез-газ, водородное топливо [1-3].

Синтез-газ может иметь различный состав, зависящий от метода производства и исходного сырья, которым может быть как природный газ или метан, так и уголь и органические отходы. Но основной набор компонентов, традиционно присутствующих в генераторном газе, состоит из водорода, моно и диоксида углерода, причем содержание последнего кратно меньше остальных компонентов.

Использование биотоплива и получение из него синтез-газа путем пиролиза открывает возможность утилизации сельскохозяйственных, производственных и бытовых отходов, сохраняя состояние окружающей среды и обширные площади, выделяемые для хранения отходов [4, 5].

Уголь, несмотря на всю сложность его использования, до сих пор занимает большую часть в мировом потреблении энергоресурсов, превышающую 27% [6]. Однако значительная часть развитых стран, проводя мероприятия в направлении декарбонизации энергетики, предпринимает попытки к снижению потребления угля. Преимуществами данного вида топлива является низкая стоимость, доступность, транспортабельность и удобство хранения. К недостаткам относится большое количество не утилизируемых отходов в виде шлака, большой концентрации CO_2 в дымовых газах и необходимость тонкой и многоэтапной топливоподготовки для обеспечения эффективного процесса горения.

Так, авторы работы [7] отмечают сильную зависимость энергетического сектора от использования угля и не менее сильное его влияние на экономику Китая. Экономический анализ энергетики страны привел авторов к выводу, что даже при нарастающем интересе к альтернативной энергетике у инвесторов, развитие данной отрасли затруднено ее внутренними рисками, выраженными в взаимосвязи между ценами на нефть и востребованностью альтернативных источников энергии, а также в отсутствии государственной стимуляции инвестирования в альтернативную энергетику. Решение данной проблемы авторы работы видят в стабилизации цен на энергетический уголь, а также в снижении побочных рисков экологически чистой энергетики.

К такому же выводу приходят и авторы статьи [8], связывая продолжение использования угля в энергетике, несмотря на экологический урон окружающей среде, не только с экономическими факторами, но и сложностью вывода из эксплуатации пылеугольных станций в странах с развивающейся экономикой, которые также являются странами, чья доля в эксплуатации таких станций по миру достаточно велика. Проблемы прекращения использования угля в энергетике, выделяемые авторами исследования, разнообразны: увеличение безработицы, снижение стоимости недвижимости в районе вывода станции из эксплуатации и затраты на сам вывод, перебои в работе электросети и другие.

Литературный обзор (Literature review)

В настоящее время газификацию угля во многом воспринимают как способ конвертации низкосортного и дешевого твердого топлива в высококалорийное топливо с высоким содержанием водорода, что избавляет процесс производства энергии от недостатков использования твердого топлива (угля). Процесс газификации заключается в частичном окислении углеродсодержащего топлива с использованием в качестве газифицирующих агентов кислорода, воздуха, водяного пара, паровоздушной или парокислородной смеси.

Можно выделить несколько основных методов газификации угля: в плотном слое с прямоточным и противоточным подводом дутья; в кипящем слое инертного наполнителя с его циркуляцией или без нее; в потоке мелкодисперсного угля с сухим или жидким шлакоудалением. Помимо выделенных, в [9-11] отмечаются следующие современные методы: процесс в шлаковом расплаве; каталитическая газификация; гидрогазификация; газификация в циклонных и многоступенчатых газогенераторах.

Газификация в кипящем слое состоит в следующем: нагретый до высоких температур измельченный уголь проходит через слой кипящего катализатора при подаче горячего воздуха или пара. Такой метод обладает высоким КПД и делает возможным использование низкосортных видов топлива, а также создание агрегатов практически любой требуемой мощности [12, 13].

Процесс газификации угля в потоке включает стадию неполного сжигания угля в присутствии кислорода или смеси кислорода с водяным паром. Важные особенности этого процесса – отсутствие в реакторе поверхностей для генерации пара, размещение горелок в

нижней части газификатора, наличие дожимного участка сверху, восходящий поток угольного порошка и газа [14]. Температура в камере сгорания достигает 2020°C, а на выходе генератора газа – от 1450 до 1650 °C.

В работе [15] анализируются затраты, необходимые для подготовки углей разных марок к поточной газификации. Выводами, сделанными в результате проведенного исследования, стали низкие затраты при пылеприготовлении газового угля с помощью мельниц-вентиляторов, составляющие 33 кВт, однако при использовании иных углеизмельчителей значительно экономичнее происходит подготовка бурого угля к поточной газификации.

Применение генераторного газа в энергетике предполагает в первую очередь использование его в качестве топлива для газотурбинных установок, причем как для отдельных генерирующих агрегатов, так и для ГТУ в составе парогазовых установок [16, 17].

Например, авторы работы [18] утверждают, что применение очищенного синтез-газа позволит практически полностью избавиться от выбросов вредных веществ в атмосферу. При этом с повышением качества топлива для сжигания уменьшается стоимость производства электроэнергии.

В работе [19] проводилось сравнение работы ГТУ на топливе различного состава, в том числе и на синтез-газе. Исследование привело к выводам о невозможности надежной и безопасной эксплуатации газотурбинной установки без внесения изменений в ее конструкцию или параметры работы камеры сгорания. Помимо этого, происходит выброс в атмосферу большого количества NO_x при снижении в 3 раза выбросов CO₂.

Подобное исследование проводилась и в статье [20], где рассматривалась работа газотурбинной установки большой мощности SGT5-8000H, мощностью 450 МВт и с КПД брутто 41%. В результате были выявлены недостатки работы данной ГТУ как на природном газе, так и на синтез-газе, причем авторы связывают неэффективность использования как природного газа, так и синтез-газа с процессом горения топлива в камере сгорания и добавлением избыточного количества воздуха, влияние которого в случае использования синтез-газа как топлива для ГТУ только увеличивается.

Таким образом, вопрос о возможности и целесообразности использования синтез-газа в газотурбинных установках к настоящему моменту не решен, требуются дальнейшие исследования в этой области.

Целью данной работы является оценка возможности использования генераторного газа, полученного в результате поточной газификации угля различных марок.

Рассмотрение эксплуатационных характеристик ГТУ при работе на синтез-газе позволит расширить перечень используемых в установках видов топлива, увеличивая при этом область их применения. При схожих значениях данных характеристик установки, использующей различный топливный газ, можно говорить об оправданности использования газификации угля для энергообеспечения удаленного района, в котором отсутствует доступ к магистральному природному газу.

Материалы и методы (Materials and methods)

На рис. 1 показана схема работы газотурбинной установки с внутрицикловой газификацией угля, основанная на подобных схемах, представленных в патентах [21, 22].

Воздух, забираемый из окружающей среды, после сжатия в осевом компрессоре разделяется на два потока, один из которых продолжает работать в установке, а другой поступает в установку разделения воздуха для получения кислорода, который отправляется в газогенератор, где служит окислителем для процесса поточной газификации угля. После выработки генераторный газ охлаждается, далее он направляется для сжигания в камеру сгорания.

При этом идея изобретения [21] состоит в использовании всех компонентов, участвующих в процессе газификации, в технологическом процессе производства электроэнергии для снижения экологического вреда, причиняемого процессом газификации. В то же время, в полезной модели [22] предлагается совместное использование топливных элементов, работающих на синтез-газе, и газотурбинных установок. Однако предлагаемые схемы достаточно сложны, и требуется технико-экономическое обоснование для подтверждения целесообразности их использования. В данной работе рассматривается достаточно простая принципиальная схема получения генераторного газа и использования его в ГТУ.

Для сравнительного анализа составов топлива (табл. 1) используется природный газ и осушенный синтез-газ [23], полученный при кислородной газификации в потоке следующих

углей различных марок: Бейский Д, Ирша-Бородинский Б, Соколовский ДГ, Олонь-Шибирский Д, Ургальский Г.

Исследование проводилось на математической модели газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ при помощи автоматизированной системы газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ) [24, 25].

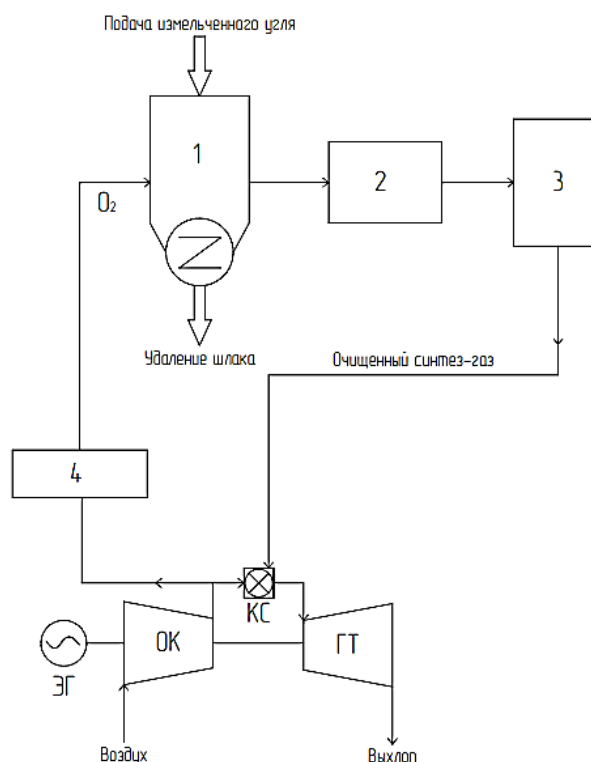


Рис. 1. Схема работы ГТУ с газификатором: 1 – газогенератор; 2 – охладитель газогенератора; 3 – фильтр; 4 – установка расщепления воздуха; ОК – осевой компрессор; КС – камера сгорания; ГТ – газовая турбина; ЭГ – электрогенератор.

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Таблица 1
Table 1

Компонентный состав топливного газа
The component composition of the fuel gas

Вид топлива	Компоненты, % об.							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	CO	H ₂
Природный газ	98,6	0,12	0,02	0,1	0,1	1,01	–	–
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	–	–	–	–	–	3,82	54,6	41,6
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	–	–	–	–	–	2	48,2	49,8
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	–	–	–	–	–	2,69	53,6	43,8
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	–	–	–	–	–	3,39	62,1	34,5
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	–	–	–	–	–	3,9	54,5	41,6

*Источник: составлено автором

*Source: compiled by the author

Исследуемая ГТУ типа НК-16-18 СТ состоит из компрессоров низкого и высокого давления, камеры сгорания и трех турбин: высокого и низкого давления, а также свободной силовой турбины. Производителем были указаны следующие технические характеристики, которые послужат входными данными для получения адекватной математической модели:

- частота вращения: 3950 об/мин;
- расход воздуха на ходе в установку: 102 кг/с;
- электрическая мощность при номинальном режиме: 18 МВт;

- температура в камере сгорания при номинальном режиме: 1147 К;
- степень сжатия в компрессорах низкого и высокого давления: 10,3.

Принятые составы газов пересчитываются в условные формулы для дальнейшего их использования в модуле аппроксимации компонентного состава в АС ГРЭТ посредством следующей методики, результаты расчета по которой сводятся в таблицу 2.

1. При задании компонентного состава в объемном эквиваленте необходимо перевести его в состав по массе смеси.

2. Определяется число атомов i -го элемента в условной молекуле:

$$b_m = 100 \cdot \frac{g_i}{\mu_i}, \quad (1)$$

где g_i – массовая доля i -го химического вещества в компоненте; μ_i – молярная масса i -го элемента.

3. Далее рассчитывается количество атомов i -го вещества в условной молекуле при помощи формулы:

$$b_{ik} = \sum_{n=1}^r b_m n_n, \quad (2)$$

где n_n – количество молей n -го химического вещества в условном моле компонента.

4. Находится энтальпия топливного газа, соответствующая компонентному составу топлива, после чего полученные условные формулы и энтальпия топлива сводятся в таблицу 2.

Таблица 2

Table 2

Условные формулы топлива

Conditional fuel formulas

Вид топлива	Компоненты				Энтальпия, кДж/кг
	С	Н	Н	О	
Природный газ	6,1227	24,1619	0,0146	0,1358	-3253,94
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	3,2805	4,6736	–	3,4951	-5186,36
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	3,2639	6,4759	–	3,394	-4488,884
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	3,1592	4,9162	–	3,3103	-5028,981
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	3,3455	3,5243	–	3,5187	-5857,01
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	3,2788	4,6769	–	3,4979	-5219,445

*Источник: составлено автором

*Source: compiled by the author

После аппроксимации состава топлива в модуле подготовки входных данных в автоматизированной системе ГРЭТ были найдены основные энергетические характеристики газов, такие как низшая теплота сгорания и стехиометрический коэффициент, иллюстрирующий потребное количество воздуха для сжигания 1 кг топлива, которые необходимы для дальнейших расчетов математической модели газотурбинной установки (таблица 3).

Таблица 3

Table 3

Полученные энергетические характеристики топлива

The obtained fuel energy characteristics

Вид топлива	Низшая теплота сгорания H_u , кДж/кг	Стехиометрическое соотношение L_0
Природный газ	49873,2	16,6801
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	13354,8	3,7342
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	16164,2	4,4041
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	14126,9	3,9424
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	11551,7	3,4106
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	13314,1	3,7301

*Источник: составлено автором

*Source: compiled by the author

Исследование математической модели выполнено в АС ГРЭТ, расчет в которой производится посредством системы трансцендентных уравнений [24, 25]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_1, \\ f_2(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_2, , \\ \\ f_n(x_1, x_2, x_3, ..., x_n) = y_n. \end{array} \right. \quad (3)$$

где f_j ($j = 1, 2, \dots, n$) – некоторые функции отличные от нуля на величину невязки y_j ($j = 1, 2, \dots, n$) вследствие приближенного задания значений независимых переменных (варьируемых параметров) x_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Эксплуатационные характеристики в программе рассчитываются по следующим формулам:

1. Удельный расход топлива:

$$q_m' = \frac{H_{e2}^* - H_1^*}{Hu \cdot \eta_{\text{iso}} - H_{\text{iso}}^* + H_0}, \quad (4)$$

где $H_{вг}^*$, H_1^* – энтальпии воздуха на входе и выходе из камеры сгорания соответственно, кДж/кг; H_u – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_{кс}$ – коэффициент полноты сгорания; H_{unc}^* – энтальпия чистых продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания, кДж/кг; $H_0 = 646,944$ кДж/кг – поправочная величина.

2. Суммарный часовой расход топлива:

$$G'_T = 3600 \cdot G_1 \cdot q'_T, \quad (5)$$

где G_1 – расход воздуха на входе в камеру сгорания, кг/с.

3. Эффективный КПД установки:

$$\eta_{\phi\phi} = \frac{3600 \cdot N_e}{G_T \cdot Hu}, \quad (6)$$

где N_e – электрическая мощность, вырабатываемая установкой, кВт.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

В результате численных исследований математической модели газотурбинной установки типа НК-16-18 СТ получены значения суммарного часового расхода топлива, эффективного КПД и удельного расхода топлива на 1 МВт вырабатываемой мощности. Численные исследования проводились при снижении электрической нагрузки на 17% до 15 МВт.

Наиболее близким по расходу топлива к природному газу является синтез-газ, произведенный из угля марки Ирша-Бородинский Б, наиболее удаленным же по этим характеристикам оказался синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д (рис. 2). Разница между этими синтез-газами составляет (в зависимости от электрической нагрузки) 5000-6000 кг/ч. Экономичность рассматривается с точки зрения затрат топлива и получаемого коэффициента полезного действия.

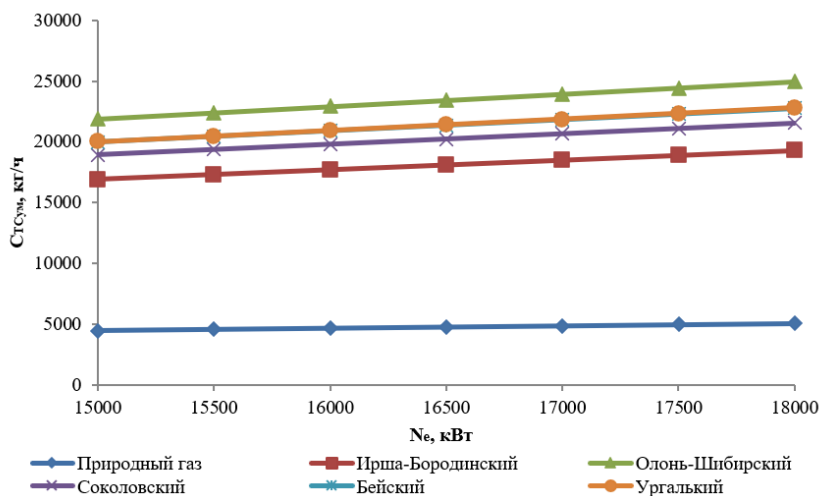


Рис. 2. Изменение суммарного часового расхода топлива в зависимости от электрической нагрузки

*Источники: составлено автором

Fig. 2. Change in the total hourly fuel consumption depending on the electrical workload

**Source: compiled by the author*

Эффективный КПД зависит от количества вырабатываемой электрической энергии, низшей теплоты сгорания и расхода топлива. Результаты исследования, показанные на рисунке 3, указывают на снижение КПД газотурбинной установки при переходе к использованию синтез-газа из углей разных марок: наименьшее падение наблюдается для марки Олонь-Шибирский Д (в среднем около 3%), наибольшее – для марки Ирша-Бородинский Б (усредненно 4,6%), остальные марки показывают примерно одинаковое среднее снижение КПД, равное 4,14%.

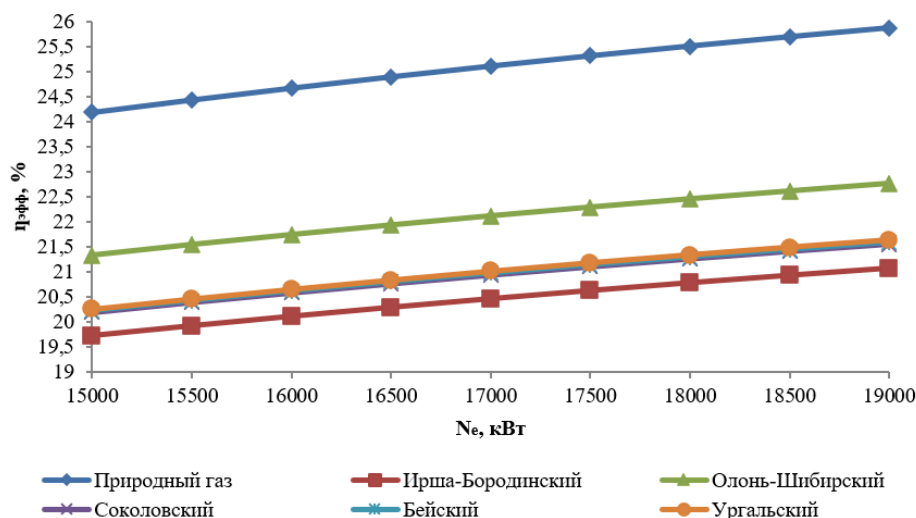


Рис. 3. Изменение эффективного КПД в зависимости от электрической нагрузки

*Источник: составлено автором

Fig. 3. Change in effective efficiency factor depending on the electrical workload

*Source: compiled by the author

Также отмечается большая экономичность работы ГТУ на синтез-газе, произведенном из марки Ирша-Бородинский Б, при расчете удельного расхода топлива, учитывающий эффективность его использования через отношения затрат топлива к производимой электроэнергии (рис. 4). Так, для марки Ирша-Бородинский Б увеличение расхода составило 380% от расхода природного газа, при этом для марок Бейский Д, Соколовский ДГ и Ургальский Г это значение равняется 447%, 424% и 448% соответственно, а для марки Олонь-Шибирский Д – 490%.

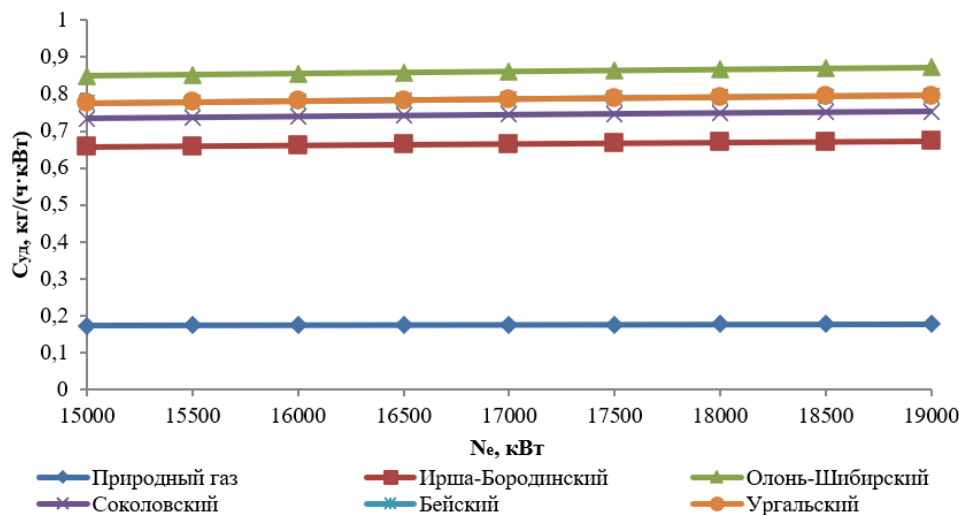


Рис. 4. Изменение удельного расхода топлива в зависимости от электрической нагрузки

*Источник: составлено автором

Fig. 4. Change in specific fuel consumption depending on the electrical workload

*Source: compiled by the author

Снижение температуры сгорания топлива при эксплуатации синтез-газа достаточно незначительно (26-37 °С) в зависимости от электрической нагрузки ГТУ и используемой марки угля (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Изменение температуры горения топлива T_f^* (°С) в камере сгорания в зависимости от электрической нагрузки

The change in the combustion temperature of the fuel T_c^ (°C) in the combustion chamber depending on the electrical workload*

Вид топлива	Электрическая мощность N_e , кВт						
	18000	17500	17000	16500	16000	15500	15000
Природный газ	910,6	900,4	890,1	879,8	869,5	859,2	848,8
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	874,3	865,0	855,7	846,4	837,0	827,6	818,3
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	877,4	868,1	858,7	849,3	839,8	830,4	820,9
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	875,9	866,6	857,2	847,8	838,5	829,0	819,6
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	874,0	864,8	855,5	846,2	836,8	827,5	818,1
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	874,1	864,9	855,6	846,3	836,9	827,5	818,2

*Источник: составлено автором

*Source: compiled by the author

Еще менее значимым оказалось в результате исследование падение температуры выхлопных газов, составляющее 13-18 °С (таблица 5). С одной стороны, это означает, что избежать охлаждения уходящих газов не получится, но другой стороны это показывает, что при переходе к работе установки на синтез-газе возможно повышение эффективности за счет использования регенерации.

Таблица 5

Table 5

Изменение температуры выхлопных газов T_4 (°С) на выходе из установки в зависимости от электрической нагрузки

The change in exhaust gas temperature T_4 (°C) at the outlet of the plant depending on the electrical workload

Вид топлива	Электрическая мощность N_e , кВт						
	18000	17500	17000	16500	16000	15500	15000
Природный газ	471,9	464,8	457,7	450,5	443,4	436,3	429,2
Синтез-газ из угля марки Бейский Д	453,8	447,2	440,6	434,0	427,4	420,8	414,2
Синтез-газ из угля марки Ирша-Бородинский Б	454,5	447,9	441,3	434,7	428,1	421,4	414,8
Синтез-газ из угля марки Соколовский ДГ	454,4	447,8	441,2	434,6	428,0	421,3	414,7
Синтез-газ из угля марки Олонь-Шибирский Д	454,4	447,9	441,2	434,6	428,0	421,4	414,7
Синтез-газ из угля марки Ургальский Г	453,7	447,2	440,5	434,0	427,3	420,7	414,1

*Источник: составлено автором

*Source: compiled by the author

Заключение (Conclusions)

В сравнении с природным газом, синтез-газ как топливо для газотурбинных установок показывает негативное влияние на рабочие параметры установки. Наиболее близкие к природному газу рабочие характеристики показал синтез-газ, полученный из угля Ирша-Бородинский Б, при этом, сравнивая с синтез-газами, полученным из оставшихся углей, прослеживается негативное влияние на КПД установки. При иллюстрации эксплуатационных характеристик ГТУ, работающей на синтез-газе, полученном из угля Олонь-Шибирский Д, его выбор кажется нерациональным, однако его положительное влияние на КПД делает данные выводы менее однозначными.

Дальнейшее развитие технологий газификации угля и методов его очистки могут повысить энергетические характеристики получаемого синтез-газа, уменьшая потребность в постоянной настройке системы регулирования установок или их конструктивной модернизации. Эксплуатация ГТУ на синтез-газе оказывается целесообразной только в ситуации недоступности магистрального природного газа по экономическим или логистическим причинам.

Литература

1. Хайруллина, А. М. Применение альтернативных видов топлива в энергетике / А. М. Хайруллина, И. Н. Маслов // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 139-141.
2. Некрасов, С. А. Снижение издержек на интеграцию возобновляемых источников электроэнергии в энергосистему – путь повышения доступности возобновляемой энергетики / С. А. Некрасов // Теплоэнергетика. – 2021. – № 8. – С. 5-16. – doi: 10.1134/S0040363621070031.
3. Худокормов, Г. А. Экономический рост и альтернативная энергетика: взаимосвязь и противоречия / Г. А. Худокормов // Бизнес. Образование. Право. – 2023. – № 2(63). – С. 30-35. – doi: 10.25683/VOLBI.2023.63.592.
4. Зайченко, В. М. Использование биомассы для получения синтез-газа / В. М. Зайченко, В. В. Кувшинов, Е. Г. Какушина // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 43-47.
5. Макоев, С. О. Разработка когенерационных энергетических систем с применением технологии газификации твердых коммунальных отходов / С. О. Макоев, И. Г. Ахметова, А. М. Фонов // Вестник КГЭУ. – 2022. – Т. 14, № 4(56). – С. 178-194.
6. Filippov, S.P., Keiko, A.V. Coal Gasification: At the Crossroad. Technological Factors. Therm. Eng. 68, pp. 209–220. 2021. doi:10.1134/S0040601521030046
7. Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? Evidence from China. Resources Policy, 69, 101788; 2020. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.1017
8. Chattopadhyay, D., Bazilian, M. D., Handler, B., & Govindarajulu, C. Accelerating the coal transition. The Electricity Journal, 34(2), 106906; 2021. doi: 10.1016/j.tej.2020.106906
9. Савина, М. В. Разработка схемы использования генераторного газа из низкосортного угля в ПГУ / М. В. Савина, С. С. Тимофеева // Вестник КГЭУ. 2021. №2 (50).
10. Козлов, А. Н. Обзор современных тенденций развития технологий газификации твердых топлив / А. Н. Козлов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2021. – № 1. – С. 130-148. – DOI 10.31857/S0002331021010088.
11. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., Dincer, I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. International Journal of Hydrogen Energy, 46(50), pp. 25385–25412. 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.08
12. Алексеев, К. Ю. Состояние и перспективы создания в России производства СЖТ из твердых горючих ископаемых (уголь, горючие сланцы, торф) / К. Ю. Алексеев, Е. Г. Горлов, А. В. Шумовский // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2013. – С. 15-24.
13. Беляев, А. А. Автотермическая газификация низкосортных топлив в кипящем слое / А. А. Беляев // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 9-13.
14. Watanabe, H., Kurose, R. Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier, Advanced Powder Technology, Volume 31, Issue 7. 2020. Pp. 2733-2741. ISSN 0921-8831. doi: 10.1016/j.appt.2020.05.002.
15. Валиуллин, Б. Р. Режимные параметры системы пылеприготовления для газогенераторов поточного типа / Б. Р. Валиуллин, Г. Р. Мингалеева // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1(57). – С. 48-57.
16. Лазебный, И. П. Анализ работы термодинамической модели газотурбинной установки на искусственном газе / И. П. Лазебный, А. Ф. Рыжков, В. В. Назарова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика : материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. – С. 818-821.
17. Исследование паровоздушной двухступенчатой поточной газификации механоактивированного угля / Н. А. Абаимов, А. П. Бурдуков, Е. Б. Бутаков, А. Ф. Рыжков // Физика. Технологии. Инновации : сборник материалов V Международной молодежной научной конференции, посвященной памяти Почетного профессора УрФУ В.С. Кортova, Екатеринбург, 14–18 мая 2018 года. – Екатеринбург: УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2019. – С. 131-146.
18. Батенин, В. М. Комплексное энерготехнологическое использование угля / В. М. Батенин, В. М. Масленников, Ю. А. Выскубенко // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2011. – № 5. – С. 11-17.
19. Марьин, Г.Е. Влияние состава топлива на энергетические параметры газотурбинной установки / Г.Е. Марьин, Б.М. Осипов, П. Зунино, Д.И. Менделеев // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2020. №5.

20. Sorgenfrei, M., & Tsatsaronis, G. Detailed exergetic evaluation of heavy-duty gas turbine systems running on natural gas and syngas. *Energy Conversion and Management*, 107, pp. 43–51; 2016. doi:10.1016/j.enconman.2015.03.11

21. Патент № 2757404 С1 Российская Федерация, МПК F02С 1/08. Кислородно-топливная энергоустановка с газификацией угля : № 2021114047 : заявл. 18.05.2021 : опубл. 15.10.2021 / И. И. Комаров, Н. Д. Рогалев, В. П. Соколов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ".

22. Патент на полезную модель № 123581 U1 Российская Федерация, МПК H01М 8/00. Гибридная углеиспользующая электрохимическая энергоустановка с выводом из цикла диоксида углерода : № 2012131683/07 : заявл. 25.07.2012 : опубл. 27.12.2012 / Д. Г. Григорук, Е. В. Касилова, А. В. Туркин ; заявитель Открытое акционерное общество "Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт".

23. Галькеева, А. А. Анализ применения углей различных марок для производства энергии и химических продуктов / А. А. Галькеева, Г. Р. Мингалеева, С. Ю. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11-12. – С. 69-79.

24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683683 Российская Федерация. Оптимизация термодинамических параметров ГТУ : № 2023683160 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 09.11.2023 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683685 Российская Федерация. Решение системы трансцендентных уравнений: № 2023683155 : заявл. 03.11.2023 : опубл. 09.11.2023 / А. В. Титов, Г. Е. Марьин, А. Р. Ахметшин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Авторы публикации

Новоселова Марина Сергеевна – магистр, Казанского государственного энергетического университета

Мингалеева Гузель Рашидовна – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

Марьин Георгий Евгеньевич – канд. техн. наук., старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

Титов Александр Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение», Казанский государственный энергетический университет

References

1. Khairullina, A.M. The use of alternative fuels in energy / A.M. Khairullina, I. N. Maslov // International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov, Belgorod, May 16-17, 2023. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU, 2023. – pp. 139-141.

2. Nekrasov, S. A. Reducing the cost of integrating renewable energy sources into the energy system – a way to increase the availability of renewable energy / S. A. Nekrasov // Thermal power engineering. – 2021. – No. 8. – pp. 5-16. – doi: 10.1134/S0040363621070031.

3. Khudokormov, G. A. Economic growth and alternative energy: interrelation and contradictions / G. A. Khudokormov // Business. Education. The right. 2023. № 2(63). Pp. 30-35. doi: 10.25683/VOLBI.2023.63.592.

4. Zaichenko, V. M. Using biomass to produce synthesis gas / V. M. Zaichenko, V. V. Kuvshinov, E. G. Kakushina // Power plants and technologies. 2019. Vol. 5, No. 3. pp. 43-47.

5. Makoev, S. O. Development of cogeneration energy systems using solid municipal waste gasification technology / S. O. Makoev, I. G. Akhmetova, A.M. Fonov // Bulletin of the KSPEU. 2022. Vol. 14, No. 4(56). pp. 178-194.

6. Filippov, S.P., Keiko, A.V. Coal Gasification: At the Crossroads. Technological Factors. Therm. Eng. 68, pp. 209–220. 2021. doi:10.1134/S0040601521030046

7. Gu, F., Wang, J., Guo, J., & Fan, Y. How the supply and demand of steam coal affect the investment in clean energy industry? Evidence from China. *ResourcesPolicy*, 69, 101788; 2020. doi: 10.1016/j.resourpol.2020.1017
8. Chattopadhyay, D., Bazilian, M. D., Handler, B., & Govindarajalu, C. Accelerating the coal transition. *TheElectricityJournal*, 34(2), 106906; 2021. doi: 10.1016/j.tej.2020.106906
9. Savina, M. V. Development of a scheme for using generator gas from low-grade coal in a PSU / M. V. Savina, S. S. Timofeeva // *Bulletin of the KSPEU*. 2021. №2 (50).
10. Kozlov, A. N. Review of modern trends in the development of solid fuel gasification technologies / A. N. Kozlov // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2021. No. 1. pp. 130-148. doi: 10.31857/S0002331021010088.
11. Midilli, A., Kucuk, H., Topal, M. E., Akbulut, U., Dincer, I. A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities. *InternationalJournalofHydrogenEnergy*, 46(50), pp. 25385–25412. 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.08
12. Alekseev, K. Yu. The state and prospects of creating in Russia the production of LPG from solid combustible minerals (coal, oil shale, peat) / K. Yu. Alekseev, E. G. Gorlov, A.V. Shumovsky // *Modern science: research, ideas, results, technologies*. - 2013. – pp. 15-24.
13. Belyaev, A. A. Autothermal gasification of low-grade fuels in a fluidized bed / A. A. Belyaev // *Thermal power engineering*. 2009. No. 1. pp. 9-13.
14. Watanabe, H., Kurose, R. Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier, *Advanced Powder Technology*, Volume 31, Issue 7. 2020. Pp. 2733-2741. ISSN 0921-8831. doi: 10.1016/j.appt.2020.05.002.
15. Valiullin, B. R. Operating parameters of the dust preparation system for in-line gas generators / B. R. Valiullin, G. R. Mingaleeva // *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2023. vol. 15, No. 1(57). pp. 48-57.
16. Lazebny, I. P. Analysis of the thermodynamic model of a gas turbine installation on artificial gas / I. P. Lazebny, A. F. Ryzhkov, V. V. Nazarova // *Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources. Nuclear Power engineering : materials of the International Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists – Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*, 2019. pp. 818-821.
17. Investigation of steam-air two-stage in-line gasification of mechanoactivated coal / N. A. Abaimov, A. P. Burdukov, E. B. Butakov, A. F. Ryzhkov // *Physics. Technologies. Innovations : collection of materials of the V International Youth Scientific Conference dedicated to the memory of Honorary Professor of UrFU V.S. Kortov, Yekaterinburg, May 14-18, 2018. Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin*, 2019. pp. 131-146.
18. Batenin, V. M. Complex energy technological use of coal / V. M. Batenin, V. M. Maslennikov, Yu. A. Vyskubenko // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2011. No. 5. pp. 11-17.
19. Maryin, G.E. The influence of fuel composition on the energy parameters of a gas turbine installation / G.E. Maryin, B.M. Osipov, P. Zunino, D.I. Mendelev // *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2020. №5.
20. Sorgenfrei, M., & Tsatsaronis, G. Detailed exergetic evaluation of heavy-duty gas turbine systems running on natural gas and syngas. *Energy Conversion and Management*, 107, pp. 43–51; 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.11
21. Patent No. 2757404 C1 Russian Federation, IPC F02C 1/08. Oxygen-fuel power plant with coal gasification : No. 2021114047 : application. 05/18/2021 : publ. 10/15/2021 / I. I. Komarov, N. D. Rogalev, V. P. Sokolov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University MEI University.
22. Utility Model Patent No. 123581 U1 Russian Federation, IPC H01M 8/00. Hybrid carbon-using electrochemical power plant with the withdrawal of carbon dioxide from the cycle : No. 2012131683/07 : application. 07/25/2012 : publ. 12/27/2012 / D. G. Grigoruk, E. V. Kasilova, A.V. Turkin ; applicant Open Joint Stock Company "All-Russian Twice Order of the Red Banner of Labor Thermal Engineering Research Institute".
23. Galkeeva A.A., Mingaleeva G.R., Gorbunov S.U. Analysis of coal different brands to production energy and chemicals. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(11-12):69-79. (In Russ.)
24. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683683 Russian Federation. Optimization of thermodynamic parameters of GTU : No. 2023683160 : application 03.11.2023 : publ. 09.11.2023 / A.V. Titov, G. E. Maryin, A. R. Akhmetshin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".
25. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683685 Russian Federation. Solution of the system of transcendental equations : No. 2023683155 : application 03.11.2023 : publ. 09.11.2023 / A.V. Titov, G. E. Maryin, A. R. Akhmetshin ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

Authors of the publication

Marina S. Novoselova– Kazan State Power Engineering University. Email: nova-mara0607@list.ru

Guzel R. Mingaleeva– Kazan State Power Engineering University. Email: mingaleeva-gr@mail.ru

George E. Marin– Kazan State Power Engineering University. Email: george64199@mail.ru

Alexander V. Titov – Kazan State Power Engineering University. Email: al.v.titov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **16.01.2024 г.**

Отредактировано **02.02.2024 г.**

Принято **07.02.2024 г.**



SYSTEM OF AUTOMATED MONITORING AND FORECASTING OF THE REMAINING RESOURCE OF PIPELINE TRANSPORT

Gaponenko SO., Kondratiev AE., Kalinina MV., Akhmetova RV.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: This article presents a system of automated monitoring and forecasting of the residual resource of pipeline transport, consisting of a developed and manufactured information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipeline transport and software. Informative frequency ranges for monitoring the technical condition of pipeline transport are determined. Experimental studies have been conducted to confirm the effectiveness of the developed technical solution. The paper considers the problems of reliability of pipeline transport. The analysis of existing methods for assessing the technical condition of pipelines is carried out. A system of automated monitoring and forecasting of the residual resource of pipeline transport has been developed. Experimental studies have been conducted. The methods of circuit and simulation modeling, the theory of automatic control, experimental planning, decision-making, probabilistic and statistical methods of mathematical processing and the method of finite element analysis were used in the performance of the work. Based on the results of the study, a new methodology for assessing the technical condition of pipeline transport has been developed.

Keywords: Automated monitoring system; forecasting of residual resource; pipeline transport; monitoring; residual resource; automation; maintenance; diagnostics; safety; efficiency.

For citation: Gaponenko SO., Kondratiev AE., Kalinina MV., Akhmetova RV. System of automated monitoring and forecasting of the remaining resource of pipeline transport. Power engineering: research, equipment, technology. 2024; 26 (1): 144-150. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Ахметова Р.В.

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

Резюме: В статье представлена система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта, состоящая из разработанного и изготовленного информационно-диагностического комплекса для мониторинга технического состояния трубопроводного транспорта и программного обеспечения. Определены информативные диапазоны частот для мониторинга технического состояния трубопроводного транспорта. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность разработанного технического решения. Рассмотрены проблемы надежности трубопроводного транспорта. Проведен анализ существующих методов оценки технического состояния трубопроводов. Разработана система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта. Проведены экспериментальные исследования. При выполнении работы использовались методы схемного и имитационного моделирования, теории автоматического управления, планирования эксперимента, принятия решений, вероятностные и статистические методы математической обработки и метод конечно-элементного анализа. На основе результатов исследования разработана новая методика оценки технического состояния трубопроводного транспорта.

Ключевые слова: Система автоматизированного мониторинга; прогнозирование

остаточного ресурса; трубопроводный транспорт; мониторинг; остаточный ресурс; автоматизация; техническое обслуживание; диагностика; безопасность; эффективность.

Для цитирования: Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Калинина М.В., Ахметова Р.В. Система автоматизированного мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса трубопроводного транспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 144-150. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-144-150.

Introduction

To ensure the efficiency of pipeline transport operation, it is necessary to pay special attention to improving the reliability and quality of their diagnostics [1-2].

A complex method is known for monitoring the location of a buried pipeline transport (RF patent for invention RU No. 2482515, IPC G01V 1/00 (2006.01), G01N 29/00 (2006.01), 20.05.2013), which consists in generating sound vibrations with a resonant frequency in the pipeline by means of a dynamic emitter installed directly in the pipeline in place of the shut-off and control valves, and registering the signal of the dynamic emitter by means of a sensitive element [3-7].

This invention is intended for monitoring the location of pipeline transport laid in the ground, while this method does not allow determining the presence of a defect in the pipeline, its localization and dimensions [8].

The task of the proposed technical solution is to create a system for automated monitoring and forecasting of the residual resource of pipeline transport based on entropy parameterization of vibration diagnostic signals, in which the shortcomings of the prototype are eliminated [8].

The scientific and technical result is a new approach to assessing the technical condition of conducting engineering communications, which allows determining not only the presence of a defect, but also the dimensions and localization (positioning) not only in pipelines, but also in any conducting engineering communications for the transportation of liquid and gaseous media (pneumatic and hydraulic pipelines) [8].

Methods

For today, there are two methods of inspection of pipeline transport: from the inside (with the help of in-line inspection shells) and from the outside (with underground laying – by excavating the pipeline). Each of these methods has its advantages and disadvantages. The absolute advantage of an in-line inspection is the possibility of 100% control of the pipeline along its entire length. The disadvantages of this method include the need for special preparation of the pipeline for the passage of in-line inspection shells (VIS), namely, the construction of VIS start-up and reception chambers, cleaning the internal cavity from deposits, eliminating unacceptable narrowing of the passage section and sharp turns that prevent the passage of VIS. In addition, the number of non-destructive testing (NDT) methods used in the in-line inspection method is very limited (ultrasonic and magnetic methods are used on liquid pipelines, and only magnetic methods are used on gas pipelines), their sensitivity and accuracy are lower compared to similar parameters in stationary conditions, and the results of control in some cases (in the presence of welded joints on lining rings and non-metallic liners) are ambiguous. In addition, the cost of an in-line inspection is quite high (several VIS runs are necessary to clarify the coordinates and dimensions of defects), and the degree of danger of detected defects is determined on the basis of complex calculations that require a large amount of data [9-15].

When conducting an inspection of main pipelines from the outside, the range of NC methods used is much wider and, in addition to ultrasonic and magnetic, radiation, capillary, eddy current and a number of other methods can be used. The advantages of this method of inspection of main pipelines include the use of external NC tools with higher sensitivity and accuracy than that of VIS, as well as the possibility of using more methods, which can significantly increase the reliability of control. However, the external method of inspection has serious drawbacks: most of the NC methods used require a significant amount of preparatory work (excavation, insulation removal, cleaning of the controlled surface), have low productivity, and the results of control are strongly influenced by the properties of the pipeline material, the surface condition, orientation and location of the detected defects. At the same time, the key indicator of the danger of a defect is its area or volume, without taking into account the dynamics of further development[9-15].

System of automated monitoring and forecasting of the remaining resource of pipeline

transport

System of automated monitoring and forecasting of the residual resource of pipeline transport consists of a developed and manufactured information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipelines and software based on entropy parameterization of vibration diagnostic signals [16].

The block diagram of the proposed technical solution and a photo of the installation are shown in Fig. 1-2, respectively.

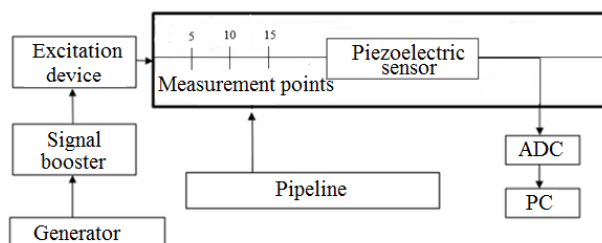


Fig. 1. Flow diagram

Рис. 1. Поточная диаграмма

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

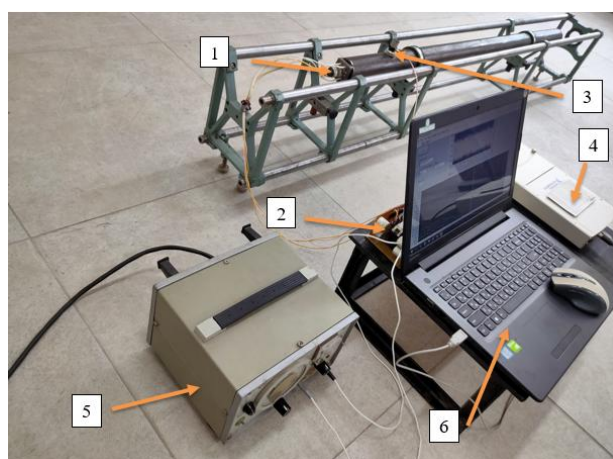


Fig. 2. Installation photo: 1 – excitation device; 2 – amplifier; 3 – sensitive element, 4 – analog-to-digital converter(ADC); 5 – low-frequency signal generator; 6 – personal computer (PC)

Рис. 2. Фотография установки: 1 - возбуждающее устройство; 2 - усилитель; 3 - чувствительный элемент, 4 - аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 5 - генератор низкочастотного сигнала; 6 - персональный компьютер (ПК)

*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

The principle of operation of the system of automated monitoring and forecasting of the residual resource of pipeline transport is as follows.

A sensitive element (piezoelectric sensor) 3 registers sound resonant vibrations that are excited in the pipeline under study using a low-frequency signal generator 5, a signal amplifier 2 and an excitation device 1 [16].

At the same time, the pipeline under study is installed on supports with clamps, with the help of which the ground pressure is created [16].

With the help of a low-frequency signal generator 5 and a signal amplifier 2, a signal is applied to the excitation device 1, which excites resonant vibrations in the pipeline under study. The signal from the sensor element through the ADC 4 is sent to the personal computer 6 for further analysis [16].

The software "Condition monitoring system" (Certificate of state registration of a computer program No. 2019618374) was created in the graphical application development environment "LabVIEW" [17].

The "Condition monitoring system" program is designed to determine the technical condition of pipeline transport in real time with the ability to predict the remaining resource. The data analysis is based on the method of entropy parametrization of vibrodiagnostic signals. By increasing the entropy indicators, it is possible to judge not only the presence of a defect in the object under study, but also to determine its size and localization (positioning) [17].

Figure 3 shows the appearance of the "Condition monitoring system" program panel.

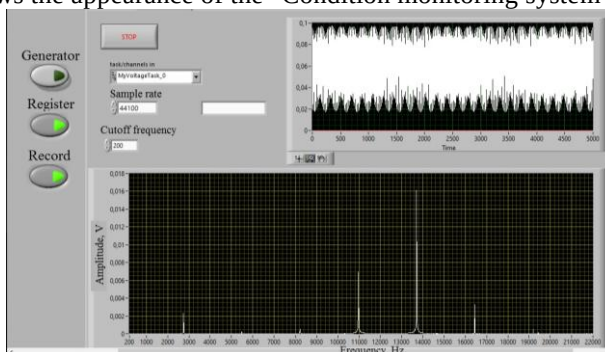


Fig. 3. Program panel

Рис. 3. Панель программы

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

A steel pipeline with a diameter of $d = 60$ mm, a wall thickness of $\delta = 5$ mm, a length of $L = 1200$ mm was chosen as the object of research.

The following defects in the pipeline were analyzed: a defect of 2 mm (the defect was made in the center of the pipeline under study), a defect of 3 mm, a defect of 5 mm, a defect of 6 mm, a defect of 7 mm, a defect of 8 mm, a defect of 10 mm, defects with a transverse and longitudinal section. The photo of the pipeline with the defect is shown in Fig. 4.



Fig. 4. Photo of a pipeline with a defect of 8 mm

Рис. 4. Фотография трубопровода с дефектом 8 мм

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

Figure 5 shows the results of a study of a defect-free pipeline and pipelines with defects of 2 and 8 mm. The analysis of the results shows an unambiguous definition of defective pipelines.

Based on the obtained research results, it can be concluded that the sensitivity of the information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipelines allows tracking defects in the frequency range of 1000-11000 Hz. The most informative frequencies for detecting even minor defects are the range of 200-4000 Hz and 6000-8000 Hz. In addition to identifying the defect, the system allows you to assess the remaining resource of pipeline transport and build a forecast of its trouble-free operation.

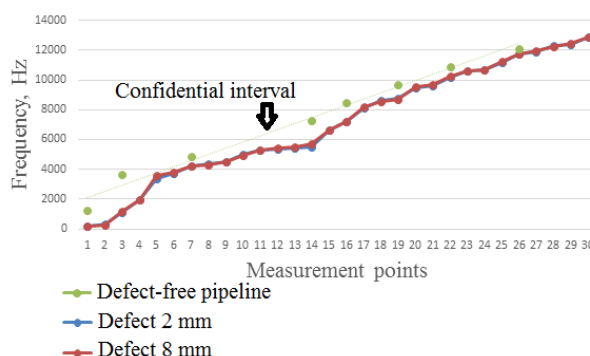


Fig. 5. Results of the study of pipelines with and without defects

Рис. 5. Результаты исследования трубопроводов с дефектами и без них

**Источник: составлено автором. Source: compiled by the author*

Results carried out with the help of the proposed installation and software showed the efficiency and high reliability of the results obtained. Experimental studies were carried out without taking into account the soil.

Conclusion

System of information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipelines has been developed and manufactured. A method of automated monitoring of heat and power equipment and forecasting of the residual resource of pipeline transport based on entropy parameterization of vibration diagnostic signals is developed and described.

To conduct experimental studies, the "Condition monitoring system" software was developed and created, the purpose of which is to determine the technical condition of pipelines. Experimental studies were conducted. An informative frequency range is defined for monitoring the technical condition of pipeline transport with the possibility of predicting the remaining resource.

References

1. De, Y., Zhao, Y., Zhong, R., Yao, L., Xu, Y. Study on the Thermodynamic Calculation Model and Solution Method Along the Steady Operation of Long Transport Pipeline, (2021), Mechanisms and Machine Science, 99, pp. 457-466.
2. Shcherbinin, V.E., Kostin, V.N., Smorodinskii, Ya.G., Nichipuruk A.P., Rinkevich, A.B., Shleenkov, A.S., Paramanskii, B.V., Loskutovb, V.E. On the measures that are necessary for providing the safe operation of pipeline transport with nondestructive testing facilities, (2011), Russian Journal of Nondestructive Testing, 47 (12), pp. 842-851.
3. Gaponenko, S.O., Shakurova, R.Z., Kondratiev, A.E., Dimova, R. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes, (2019), E3S Web of Conferences, 124, art. no. 01021.
4. Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Zagretidinov, A.R. Low-frequency Vibro-acoustic Method of Determination of the Location of the Hidden Canals and Pipelines, (2016), Procedia Engineering, 150, pp. 2321-2326.
5. Nazarychev, S.A., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Shakurova, R.Z. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects, (2019), Journal of Physics: Conference Series, 1328 (1), art. no. 012054.
6. Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Shakurova, R.Z. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage, (2019), E3S Web of Conferences, 124, art. no. 05029.
7. Shakurova, R.Z., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. On the issue of inertial excitation of diagnostic low-frequency vibrations in pipelines of housing and communal services, (2020), E3S Web of Conferences, 216, art. no. 01079.
8. Patent No. 2734724 C1 Russian Federation, IPC G01N 29/00. Vibroacoustic method for assessing the technical condition of conducting engineering communications: No. 2020114188: application 20.04.2020: publ. 22.10.2020 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".
9. Ziganshin, Sh.G., Izmailova, E.V., Maryashev, A.V. Technique for search of pipeline leakage according to acoustic signals analysis, (2017), 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings, art. no. 8076416.
10. Vankov, Yu.V., Ziganshin, Sh.G., Izmailova, E.V., Serov, V.V. Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines, (2015), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 86 (1), art. no. 012035.
11. Stein, Y., Zonova, N., Kubrak, I., Andreeva, L. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions, (2017), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 90 (1), art. no. 012139.
12. Saifullin, E.R., Ziganshin, S.G., Vankov, Y.V., Zagretidinov, A.R. Assessment of technical condition of polyurethane foam thermal insulation pipelines of heating networks using neural network technologies, (2018), International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7 (4.7 Special Issue 7), pp. 241-244.
13. Shvetsov, I.V., Ziganshin, S.G., Zagretidinov, A.R., Zhelnov, D.V. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation, (2020), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 939 (1), art. no. 012074.
14. Vankov Y., Rumyantsev A., Ziganshin S., Politova T., Minyazev R., Zagretidinov A. Assessment of the condition of pipelines using convolutional neural networks, (2020), Energies, 13 (3),

art. no. 618.

15. Doklad O Sostoyanii Sfery Teploenergetiki I Teplosnabzheniya V Rossijskoj Federacii [Report on the State of Heat Power and Heat Supply in the Russian Federation], Available online: accessed on 20 January 2020, <https://minenergo.gov.ru/viewpdf/10850/80685>.

16. Patent No. 2713563 C1 Russian Federation, IPC G01N 29/04. Information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipelines: No. 2019114353: application 07.05.2019: publ. 05.02.2020 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova, R. R. Tazetdinov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University" (FSBEI HE "KSPEU").

17. Certificate of state registration of the computer program No. 2019618374 Russian Federation. Condition monitoring system: No. 2019615446: application 16.05.2019: publ. 01.07.2019 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova, R. R. Tazetdinov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

Authors of the publication

Sergey O. Gaponenko - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Aleksandr E. Kondratiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marina V. Kalinina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Литература

1. De, Y., Zhao, Y., Zhong, R., Yao, L., Xu, Y. Study on the Thermodynamic Calculation Model and Solution Method Along the Steady Operation of Long Transport Pipeline, (2021), Mechanisms and Machine Science, 99, pp. 457-466.

2. Shcherbinin, V.E., Kostin, V.N., Smorodinskii, Ya.G., Nichipuruk A.P., Rinkevich, A.B., Shleenkov, A.S., Patramanskii, B.V., Loskutov, V.E. On the measures that are necessary for providing the safe operation of pipeline transport with nondestructive testing facilities, (2011), Russian Journal of Nondestructive Testing, 47 (12), pp. 842-851.

3. Gaponenko, S.O., Shakurova, R.Z., Kondratiev, A.E., Dimova, R. Improving the methodology for assessing the technical condition of equipment during the transportation of energy carrier in energy systems and complexes, (2019), E3S Web of Conferences, 124, art. no. 01021.

4. Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Zagretidinov, A.R. Low-frequency Vibro-acoustic Method of Determination of the Location of the Hidden Canals and Pipelines, (2016), Procedia Engineering, 150, pp. 2321-2326.

5. Nazarychev, S.A., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Shakurova, R.Z. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects, (2019), Journal of Physics: Conference Series, 1328 (1), art. no. 012054.

6. Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E., Shakurova, R.Z. Improving the efficiency of energy complexes and heat supply systems using mathematical modeling methods at the operational stage, (2019), E3S Web of Conferences, 124, art. no. 05029.

7. Shakurova, R.Z., Gaponenko, S.O., Kondratiev, A.E. On the issue of inertial excitation of diagnostic low-frequency vibrations in pipelines of housing and communal services, (2020), E3S Web of Conferences, 216, art. no. 01079.

8. Patent No. 2734724 C1 Russian Federation, IPC G01N 29/00. Vibroacoustic method for assessing the technical condition of conducting engineering communications: No. 2020114188: application 20.04.2020: publ. 22.10.2020 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

9. Ziganshin, Sh.G., Izmailova, E.V., Maryashev, A.V. Technique for search of pipeline leakage according to acoustic signals analysis, (2017), 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings, art. no. 8076416.

10. Vankov, Yu.V., Ziganshin, Sh.G., Izmailova, E.V., Serov, V.V. Determination of the oscillation frequencies of corrosion defects finite element methods in order to develop methods of acoustic monitoring of pipelines, (2015), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 86 (1), art. no. 012035.

11. Stein, Y., Zonova, N., Kubrak, I., Andreeva, L. Development and improvement of methods of diagnostics of heating systems in modern conditions, (2017), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 90 (1), art. no. 012139.
12. Saifullin, E.R., Ziganshin, S.G., Vankov, Y.V., Zagretdinov, A.R. Assessment of technical condition of polyurethane foam thermal insulation pipelines of heating networks using neural network technologies, (2018), International Journal of Engineering and Technology(UAE), 7 (4.7 Special Issue 7), pp. 241-244.
13. Shvetsov, I.V., Ziganshin, S.G., Zagretdinov, A.R., Zhelnov, D.V. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation, (2020), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 939 (1), art. no. 012074.
14. Vankov Y., Rumyantsev A., Ziganshin S., Politova T., Minyazev R., Zagretdinov A. Assessment of the condition of pipelines using convolutional neural networks, (2020), Energies, 13 (3), art. no. 618.
15. Doklad O Sostoyanii Sfery Teploenergetiki I Teplosnabzheniya V Rossijskoj Federacii [Report on the State of Heat Power and Heat Supply in the Russian Federation], Available online: accessed on 20 January 2020, <https://minenergo.gov.ru/viewpdf/10850/80685>.
16. Patent No. 2713563 C1 Russian Federation, IPC G01N 29/04. Information and diagnostic complex for monitoring the technical condition of pipelines: No. 2019114353: application 07.05.2019: publ. 05.02.2020 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova, R. R. Tazetdinov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education " Kazan State Energy University "(FSBEI HE "KSPEU").
17. Certificate of state registration of the computer program No. 2019618374 Russian Federation. Condition monitoring system: No. 2019615446: application 16.05.2019: publ. 01.07.2019 / S. O. Gaponenko, A. E. Kondratiev, R. Z. Shakurova, R. R. Tazitdinov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Energy University".

Авторы публикации:

Гапоненко Сергей Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Калинина Марина Владимировна – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета.

Ахметова Римма Валентиновна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К.Шибанова», Казанский государственный энергетический университет.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено **15.01.2024 г.**

Отредактировано **01.02.2024 г.**

Принято **09.02.2024 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 62-665

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-151-164

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ НИЗКОСОРТНОГО УГЛЯ С ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТЬЮ

Слюсарский К.В.^{1,2}, Асильбеков А.К.¹

¹Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

²Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва, г.
Кемерово, Россия

konstantinsv@tpu.ru¹

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в необходимости использования пиролизной жидкости переработки древесины для сжигания в котлах средней и малой мощности в составе смесей с углем. Непредсказуемость свойств зажигания и горения подобных смесей, а также отсутствие расчетных методик предопределила преимущественно экспериментальный подход к исследованию данных процессов. При этом для широкого внедрения подобных технологических решений на практике необходимо наличие относительно простых методик оценки характеристик зажигания и горения данных компонент. ЦЕЛЬ. Синтезировать образцы пиролизной жидкости из древесины двух видов, провести их характеризацию. Разработать экспериментальную методику определения характеристик зажигания и горения полученной пиролизной жидкости в составе смеси с низкорекреационным углем. Провести исследования времен задержки зажигания и состава выделяющихся газофазных продуктов. Определить основные механизмы действия компонент смеси низкосортного угля с пиролизной жидкостью при зажигании и горении. МЕТОДЫ. Исследование проводилось с использованием экспериментальной методики на основании высокотемпературной муфельной печи, оснащенной высокоскоростной видеокамерой и проточным газоанализатором. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлены зависимости времен задержки зажигания и концентрационные кривые выделения газофазных продуктов реакции горения смесей низкосортного угля и пиролизной жидкости двух видов в диапазоне температур греющей среды 600-800 °С и концентраций добавок от 0 до 20 масс.%. Получены аппроксимационные зависимости времен задержки зажигания от концентрации добавки, сформулирован механизм действия добавки при горении. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Установлено, что с линейным увеличением содержания пиролизной жидкости в смеси наблюдалось относительно постоянное снижение значений характерных времен задержки зажигания, в то время как количество формируемых газофазных продуктов менялось аддитивно относительно состава смеси. Вид концентрационных кривых выделения СО и NO_x свидетельствует о независимом действии компонент смеси. Предложен механизм действия добавок, основанный на значительном вкладе процесса испарения пиролизной жидкости с последующим горением в газовой фазе, инициирующим зажигание угля.

Ключевые слова: уголь; пиролизная жидкость; зажигание; горение; газофазные продукты; смесь топлив; механизм зажигания

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FZES-2024-0001.

Для цитирования: Слюсарский К.В., Асильбеков А.К. Закономерности зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 151-164. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-151-164.

FEATURES OF IGNITION AND COMBUSTION OF LOW-GRADE COAL MIXED WITH PYROLYSIS LIQUID

Slyusarskiy KV^{1,2}, Asilbekov AK.¹

¹Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia

²T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia
konstantinsv@tpu.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study lies in the need to use pyrolysis liquid from wood processing for combustion in boilers of medium and low power as part of mixtures with coal. The unpredictability of the ignition and combustion properties of such mixtures, as well as the lack of calculation methods, predetermined a predominantly experimental approach to the study of these processes. At the same time, for the widespread implementation of such technological solutions in practice, it is necessary to have relatively simple methods for assessing the ignition and combustion characteristics of these components. THE PURPOSE. Synthesize samples of pyrolysis liquid from two different sorts of wood and perform their characterization. Develop an experimental method for studying ignition and combustion characteristics of pyrolysis liquid mixed with low-reactivity coal. Perform research on ignition delay times and the composition of released gas-phase products. Determine the main mechanisms of action of the components in the mixture of low-grade coal with pyrolysis liquid they're during ignition and combustion. METHODS. The study was carried out using an experimental technique based on a high-temperature muffle furnace equipped with a high-speed video camera and a once-through gas analyzer. RESULTS. The article presents the dependences of the ignition delay times and the concentration curves of gas-phase products released during combustion of mixtures of low-grade coal and two types of pyrolysis liquid in the temperature range of the heating medium 600-800 °C and additive concentrations from 0 to 20 wt.%. Linear approximation dependences of ignition delay times on additive concentrations were obtained, and the mechanism of action of the additive during combustion was formulated. CONCLUSION. It was found that an increase in the concentration of the additive in the mixture leads to a stable decrease in the ignition delay times, while the amount of gas-phase products formed varied additively with respect to the composition of the mixture. The shape of the concentration curves for the release of CO and NO_x indicates the independent action of the components of the mixture. The mechanism of action of additives was proposed. It was based on significant contribution of their evaporation process followed by combustion in the gas phase, which, in turn, initiates the ignition of coal.

Keywords: coal; pyrolysis liquid; ignition; combustion; gas-phase products; fuel mixture; ignition mechanism.

Acknowledgments: The work was realized with financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of project No. FZES-2024-0001.

For citation: Slyusarskiy KV., Asilbekov AK. Features of ignition and combustion of low-grade coal mixed with pyrolysis liquid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (1): 151-164. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-151-164.

Введение (Introduction)

Пиролиз является перспективной технологией переработки различных органических отходов [1] и биомассы [2] с возможностью получения высокомаржинальных продуктов, таких как древесный уголь [3] или пиролизная жидкость [4]. В зависимости от способа реализации процесса, пиролизные технологии разделяют на несколько видов. В зависимости от ряда факторов, в первую очередь – скорости нагрева [5], выход продукта в определенной фазе можно максимизировать. При быстром нагреве наибольший выход наблюдается для конденсируемых веществ в жидкой фазе – до 73 % [4]. Именно поэтому большинство технологических решений для производства жидкофазных продуктов основаны на технологиях быстрого пиролиза [6]. Несмотря на большое количество потенциальных применений данных продуктов, включающее получение широкого спектра химических компонент [7], энергетическое

применение в настоящее время является наиболее технически проработанным решением [8,9], для которого даже была разработана нормативная документация, например, ГОСТ 70708-2023. В то же время в случае медленного пиролиза наблюдается большой выход продуктов в твердой фазе (до 40-45 % [10]), являющихся основным товарным результатом соответствующих предприятий. Образующиеся в таком случае вещества в жидкой и газовой являются побочными [1] и требуют утилизации. Ввиду высокого содержания органических компонент в получаемой жидкости – кислот, эфиров, фенолов [4] – их утилизация представляет собой комплексную задачу. Особенно актуальна данная проблема для установок малой и средней мощности, для которых организация подобной утилизации на месте нецелесообразна ввиду высокой стоимости соответствующего оборудования. Сжигание данных компонент с целью получения теплоты для поддержания энергетического баланса установки пиролиза и обеспечения её собственных нужд [3] является эффективным и безопасным решением в случае корректной организации данного процесса. При этом данная жидкость существенно отличается от жидких продуктов быстрого пиролиза, что делает её прямое сжигание крайне проблематичным, в первую очередь – ввиду низкой теплоты сгорания и высокой температуры зажигания [4], а также нестабильности свойств ввиду вариативности характеристик сырья. Сжигание данных компонент совместно с более традиционными твердыми топливами позволяет нивелировать данные недостатки, а в случае использования низкорекреационных видов топлив – даже получить ряд синергетических эффектов [11]. Однако возникающие в данном случае эффекты крайне сложны, что определяет необходимость проведения соответствующих экспериментальных исследований с выявлением эмпирических закономерностей характеристик зажигания и горения указанных составов. В настоящее время в литературе подобные результаты не представлены, а возникающие эффекты не описаны, что затрудняет внедрение данных технологических решений на практике.

Цель данного исследования заключается в исследовании закономерностей зажигания и горения смесей угля с пиролизной жидкостью древесины различного происхождения для формирования эмпирических зависимостей характеристик их зажигания в зависимости от состава и условий окружающей среды, а также выявления механизма их действия. Научная значимость состоит в выявлении базовых механизмов действия жидких добавок в смеси с твердым топливом для формирования теоретического подхода к предсказанию свойств подобных смесей на основании анализа внешнего вида кинетических кривых выделения газофазных продуктов горения и эффективных значений энергии активации брутто-реакций тепловыделения, протекающих при зажигании. Практическая значимость исследования состоит в получении эмпирических зависимостей характеристик зажигания и горения смесей различных пиролизных жидкостей с низкорекреационным углем в различной концентрации, что позволит управлять данными свойствами для эффективной утилизации данных компонент путем сжигания с получением тепловой энергии, тем самым повышая энергетическую эффективность и экологическую безопасность соответствующих производств, за счет утилизации образующейся при пиролизе жидкости и частичном замещении потребления основного топлива.

Литературный обзор (Literature review)

Теплотворная способность пиролизной жидкости переработки отходов и биомассы варьируется в достаточно широком диапазоне значений от 20 до 45 МДж/кг [11-13], что делает её пригодной для прямого сжигания. Несмотря на некоторые отличия пиролизной жидкости от традиционных жидких топлив [4], их сжигание обычно осуществляется с применением технологических решений, аналогичных стандартным мазутным горелкам. Так в [13] указано, что пиролизная жидкость может сжигаться в распылительных горелках, при этом отмечаются проблемы с низкой теплотворной способностью и нестабильностью свойств. Особенно это актуально в отношении пиролизной жидкости медленного пиролиза, являющейся побочным продуктом производства древесного угля, отличающейся особо высокой вязкостью и влажностью [14]. При этом некорректное сжигание подобных веществ приводит к повышенному выделению различных веществ [15]: как относительно безопасных оксидов углерода и азота, так и ряда более токсичных органических соединений. Ключевой характеристикой является совместное влияние температуры в ядре горения и времени его пребывания в области высоких температур, являющейся производной от теплоты сгорания и температуры дутьевого воздуха. При этом отмечается, что снижение концентрации оксидов углерода в продуктах сгорания коррелировало с ростом концентрации оксидов азот и снижением выбросов органических веществ. Аналогичные выводы сделаны и в [13].

Горение смесевых топлив является крайне комплексной задачей, включающей большое число последовательно-параллельных реакций и процессов, и на данный момент не имеет общепринятого решения. Известно, что изменение характеристик выхода летучих для смесевых топлив, во многих случаях определяющие реакционную способность твердого топлива при зажигании и горении [16], в реальных условиях носят неаддитивный характер относительно концентрации компонент. Данные выводы сделаны в отношении смесей двух углей различных марок в [16], в [17] аналогичные выводы сделаны в отношении смесей угля с биомассой, в [18] – в отношении смесей различных отходов. Это во многом предопределило широкое распространение экспериментальных методов для исследования данных процессов [19]. Поэтому математические модели зажигания и горения подобных композиций [20] используют большое число характеристик, определяемых по результатам экспериментов и не поддающихся экстраполяции, что существенно ограничивает их практическое применение, особенно в области малой энергетики. В первую очередь, это связано с возникающими при зажигании и горении подобных составов синергетическими эффектами, приводящими к нелинейному характеру изменения их характеристик при изменении условий окружающей среды. Так, в [21] отмечается, что добавление отработанного турбинного масла в диапазоне 0-15 % приводит к нелинейному снижению времен задержки зажигания при температуре 570 °С, причем при увеличении концентрации от 0 до 5 % снижение времени задержки зажигания составляло ~1 °С (~6 %), а дальнейшее увеличение концентрации от 5 до 10 % и от 10 до 15 % приводило к более существенному снижению в среднем на 2,5-3 °С (~15-18 %). Аналогичные зависимости были представлены в схожих работах по зажиганию и горению смесей угля с органическими жидкостями различного происхождения, как в составе водоугольного топлива [19], так и в виде механических смесей [22]. Так, в [19] отмечается нелинейное снижение времен задержки зажигания в зависимости от концентрации добавки, её свойств и доли воды в составе водоугольного топлива в широком диапазоне температур. В [22] также не было выявлено однозначных закономерностей изменения характеристик зажигания, горения и выделения газофазных продуктов реакции для смесей угля различных марок с органическими жидкостями в диапазоне 5-23 масс.%. При этом использование последних согласно предложенной в [22] технологии позволяет применять полученное топливо в стандартном котельном оборудовании. Ранее нами в [11] было установлено, что при температурах греющей среды 700 °С и более зависимость характеристик зажигания и горения смесей низкорекреационного угля с пиролизным маслом от состава и теплотворной способности имеет линейный характер. Полученные закономерности упрощают выполнение прогностической оценки характеристик данных составов. При этом для пиролизной жидкости переработки древесины с низкой теплотворной способностью точность полученных закономерностей была наименьшей. При этом предприятия пиролизной переработки древесины являются наиболее распространенными в России [8], а также представлены преимущественно установками малой производительности, что делает проведение детальных исследований характеристик зажигания и горения получаемой жидкости нецелесообразным. Это обуславливает потребность в относительно простых закономерностях изменения параметров горения подобных смесей.

Материалы и методы (Materials and methods)

Образцы пиролизной жидкости получались путем медленного пиролиза образцов опилок хвойных (преимущественно, сосна) и лиственных (береза) пород древесины. Для этого применялась экспериментальная установка непрямого нагрева топлива в замкнутом объеме, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1. Образец перерабатываемой древесины в виде опилок загружался во внутреннюю камеру установки 3 и закрывался крышкой 2, после чего продувался азотом для вытеснения остаточного воздуха из пиролизной камеры помощью патрубка 10 в течение 5 минут. Нагрев образца осуществлялся за счет горячего воздуха, подаваемого в кольцевой зазор между внутренним 3 и внешним 4 корпусами установки при помощи тепловой пушки 1. Выделяющиеся в результате пиролиза газофазные продукты охлаждались до 50 °С в конденсаторе 7, при этом конденсированные продукты – пиролизная жидкость – и неконденсируемые газы отводились отдельно. Неконденсируемые продукты направлялись на проточный газоанализатор для анализа.

Эксперименты проводились при загрузке образцов массой 0,5 кг, температуре внутри реактора равной 500 °С и временем выдержки образца при данной температуре равной 30 мин. Скорость нагрева составляла в среднем 20 °С/мин до температуры 300 °С, а далее увеличивалась с фиксированной скоростью 10 °С/мин до достижения 500 °С.

Нагрев осуществлялся в условиях минимальной (порядка 5 мл/мин) продувки азотом. По окончании времени выдержки, нагрев отключался и реактор продувался с помощью тепловой пушки атмосферным воздухом с целью его охлаждения. После достижения 50 °С, внутренняя камера установки разбиралась и твердый остаток пиролиза извлекался. По результатам показаний газоанализатора было установлено, что к моменту окончания охлаждения установки выделение газофазных продуктов пиролиза было полностью завершено.

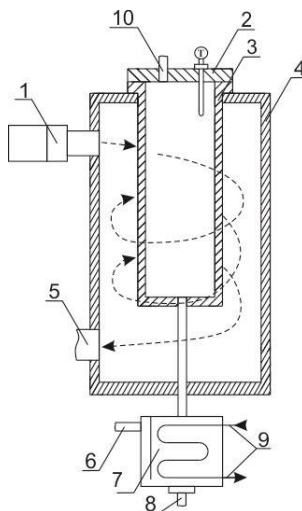


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки медленного пиролиза: 1 – высокотемпературная тепловая пушка, 2 – крышка внутренней камеры, 3 – корпус внутренней камеры, 4 – внешний корпус камеры, 5 – отвод греющего воздуха, 6 – отвод неконденсирующихся газов, 7 – охладитель-конденсатор парогазовой смеси, 8 – отвод жидких конденсированных продуктов пиролиза, 9 – линия охлаждающей воды, 10 – патрубок продувки

Fig. 1. Scheme of slow pyrolysis experimental setup: 1 – high-temperature jet heater, 2 – tremovable casing of inner chamber, 3 – wall of inner chamber, 4 – external wall of setup, 5 – outlet vent of heated air, 6 – outlet of non-condensing gases, 7 – steam-gas mixture cooler, 8 – outlet of condensed pyrolysis products, 9 – cooling water line, 10 – blowdown pipeline

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

Кинематическая вязкость и плотность образцов определялась с помощью вискозиметра Stanbinger SVM3000, зольность – с помощью муфельной печи TSMP Ltd R14-U, теплотворная способность – с помощью калориметрической бомбы АБК-1. Элементный состав и жидкостей, и угля определялись с использованием анализатора элементного состава Euro EA 3000. Свойства пиролизных жидкостей, также как и свойства использованного низкосортного угля, определенные согласно стандартным методикам ГОСТ, приведенных в [11], приведены в таблице 1. Полученные свойства жидкости являются достаточно типичными [11]. Элементный состав пиролизной жидкости древесины хвойных пород свидетельствует о меньшем содержании в ней кислородсодержащих компонент, в то время как содержание горючих углеводородов – судя по содержанию углерода и водорода – было больше, что и определяет различия в динамической вязкости и теплотворной способности

Таблица 1

Table 1

Свойства образцов низкосортного угля и пиролизных жидкостей древесины различного происхождения

Properties of samples of low-grade charcoal and wood pyrolysis liquids of different origins

Показатель	Пиролизная жидкость хвойных пород древесины	Пиролизная жидкость лиственных пород древесины	Низкосортный уголь
Влажность, масс. %	–	–	2,1
Зольность, масс. %	0,5	0,9	17,7
Теплотворная способность, МДж/кг	37,6	31,6	24,8

Продолжение таблицы 1. *Continuation of Table 1*

Динамическая вязкость при 40 °С, мПа·с		40	65	-
Плотность при 40 °С, кг/м ³		960	980	-
Элементный состав, масс.%	С	63,2	58,8	84,9
	Н	7,5	6,7	1,7
	О	0,5	1,5	1,5
	О	28,8	33,0	11,7

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

Для снижения влияния неравномерности прогрева частиц топлива, перед использованием уголь измельчался и просеивался для получения фракции 80-100 мкм. Полученная с использованием опилок хвойных и лиственных пород древесины пиролизная жидкость использовалась в качестве добавки к образцу низкосортного угля с концентрацией 5, 10 и 20 масс.%. Перед внесением, жидкость перемешивалась до гомогенного состояния. Внесение добавки осуществлялось путем помещения необходимой массы низкосортного угля и пиролизной жидкости в ступку для получения смеси заданного состава, а после вымешивалась до получения гомогенного состава. После смешения и удаления образца из ступки, она взвешивалась для определения массы пиролизной жидкости, оставшейся на стенках. Для всех проведенных экспериментов масса оставшейся на стенках жидкости не превышала 2 % от внесенной массы добавки. Для каждого эксперимента образец готовился отдельно, а ступка очищалась.

Для выявления вклада процессов испарения, все измерения в аналогичном формате также были проведены для образцов с идентичной концентрацией водопроводной воды. Детальные характеристики использованного образца низкосортного угля, а также методы их определения, представлены в [11].

Исследование характеристик зажигания и горения производилось при температурах 600-800 °С в среде воздуха. Исследования производилось с применением экспериментального стенда, схема которого приведена на рисунке 2.

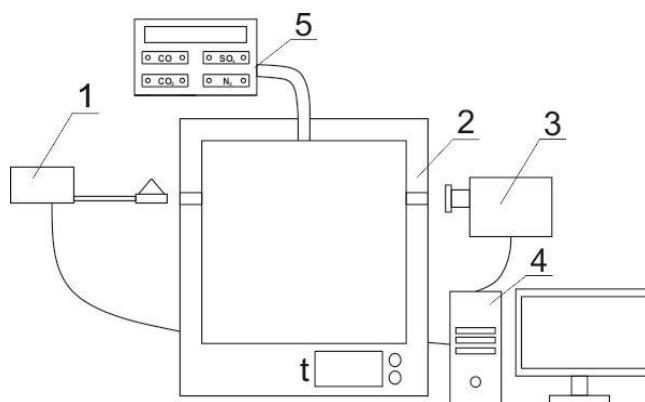


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального стенда зажигания и горения твердого топлива: 1 – координатный механизм, 2 – муфельная печь, 3 – высокоскоростная камера, 4 – компьютер, 5 – проточный газоанализатор

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

Установка включает в себя координатный механизм для подачи образца топлива, термостатированную муфельную печь TSMP Ltd R14-U, высокоскоростную камеру Photron FASTCAM SA4 и проточный газоанализатор БОНЭР, а также персональный компьютер для управления и снятия показаний. Исследования производилось следующим образом. Сначала подложка координатного механизма охлаждалась до комнатной температуры, после чего на неё помещался исследуемый образец твердого топлива или топливной смеси. Далее активировался привод и образец вводился в печь. Время задержки зажигания фиксировалось по появлению свечения на поверхности образца или вблизи его поверхности с помощью видеокамеры, состав выделяющихся газов определялся с помощью газоанализатора. После окончания регистрации продуктов сгорания в составе исследуемых газов, держатель координатного механизма выводился из

камеры, охлаждался до комнатной температуры, с него удалялась зола. Исследования производились в температурном диапазоне 600-800 °С. Нижняя граница диапазона определялась условиями стабильного зажигания образцов, а верхняя – удовлетворительной точностью определения времени задержки зажигания.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Были получены характеристики зажигания и горения исследованных смесей пиролизной жидкости с низкосортным углем при различных температурах греющей среды в диапазоне значений от 600 до 800 °С. Зависимости значений времен задержки зажигания от температуры в печи приведены на рисунке 3.

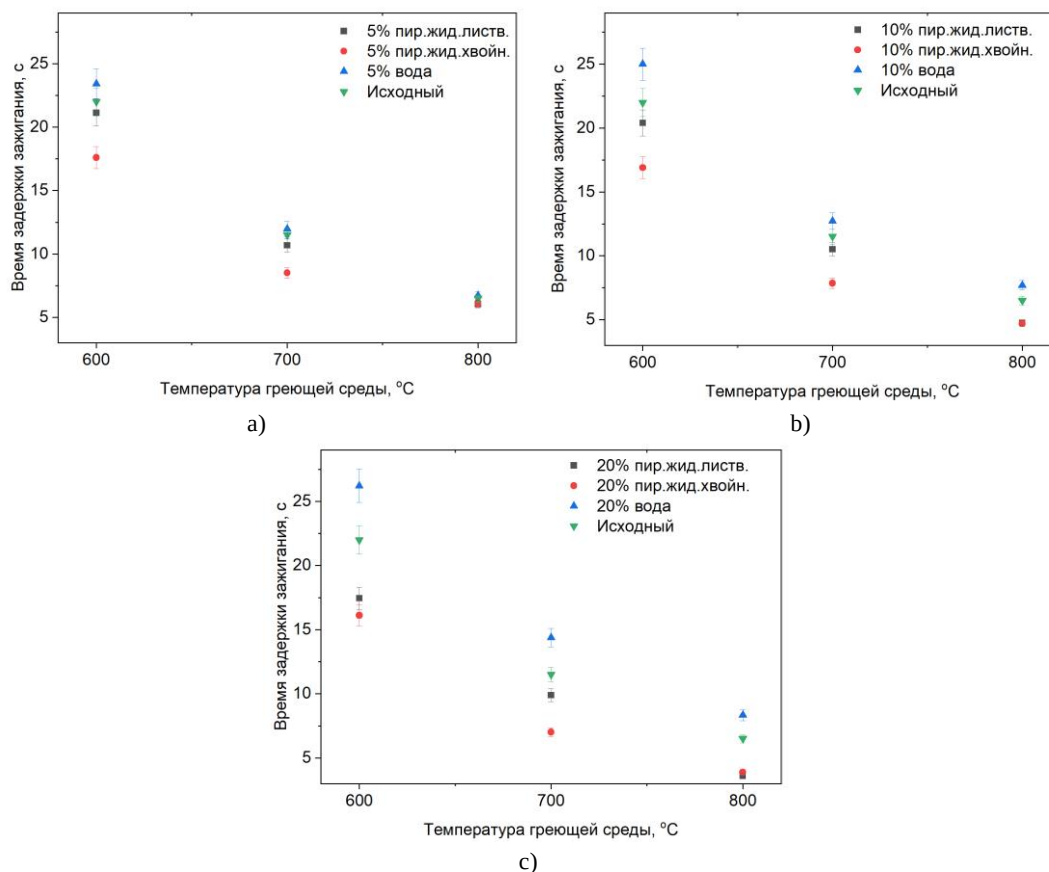


Рис. 3. Времена задержки зажигания смесей угля с водой и пиролизной жидкостью древесины хвойных и лиственных пород при различных температурах греющей среды: а – 5 масс.%, б – 10 масс.%, в – 20 масс.%.
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 3. Ignition delay times of mixtures of low-grade coal with water and pyrolysis liquid of soft and hardwood at different temperatures of heating medium: a – 5 mass.%, b – 10 mass.%, c – 20 mass.%.
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Времена задержки зажигания для всех исследованных образцов со всеми добавками в рассмотренном диапазоне изменения концентраций нелинейно снижались с увеличением температуры греющей среды. Характер данного снижения имел вид, близкий к экспоненциальному, что может свидетельствовать об активационной природе определяющих его процессов. Следует отметить, что образцы с добавкой пиролизной жидкости имели времена задержки зажигания ниже, чем исходные образцы низкосортного угля во всем диапазоне температур и концентраций добавок. Причем для образцов с пиролизной жидкостью хвойных пород, имеющей большую реакционную и теплотворную способность, данные значения были меньше, чем для образцов с пиролизной жидкостью лиственных пород. В то же время для образцов сравнения с водой времена задержки зажигания всегда были больше, чем для образцов без добавок. Следует отметить, что при снижении температуры греющей среды расхождение между характерными временами задержки зажигания увеличивалось для всех исследованных добавок – как для воды, так и для пиролизных жидкостей.

Значения времен задержки зажигания при различных концентрациях добавок воды и пиролизной жидкости древесины хвойных и лиственных пород при различных температурах греющей среды приведены на рис. 4. Отметим, что для референсных

образцов (с водой), закономерность увеличения значений времен задержки зажигания носила линейный характер при соответствующем росте доли добавки. Аналогичные зависимости могут быть построены и для времен задержки зажигания смесей с пиролизным маслом. Однако для них данная зависимость при 600 и 700 °C будет иметь удовлетворительную точность аппроксимации только при исключении исходного образца без добавок. Это свидетельствует о промотирующем характере действия данных добавок, приводящем к инициации зажигания основного низкосортного топлива, при этом наибольший относительный прирост наблюдался для 5 масс.% добавки. В тоже время при 800 °C вид данных зависимостей был более линейным, причем при 5 масс.% добавки относительное снижение времени задержки зажигания было минимальным. Это объясняется большей скоростью горения пиролизной жидкости вблизи поверхности образца твердого топлива и вкладом данного процесса в повышение температуры низкосортного угля. Полученное аддитивное поведение свидетельствует о преимущественно независимом действии компонент смеси в ходе зажигания и горения во всем исследованном диапазоне концентраций добавок и температур греющей среды, что отличается от полученных ранее данных для пиролизной жидкости нефтешлама и резины [11]. Это может быть вызвано существенно отличающимся составом данных пиролизных жидкостей.

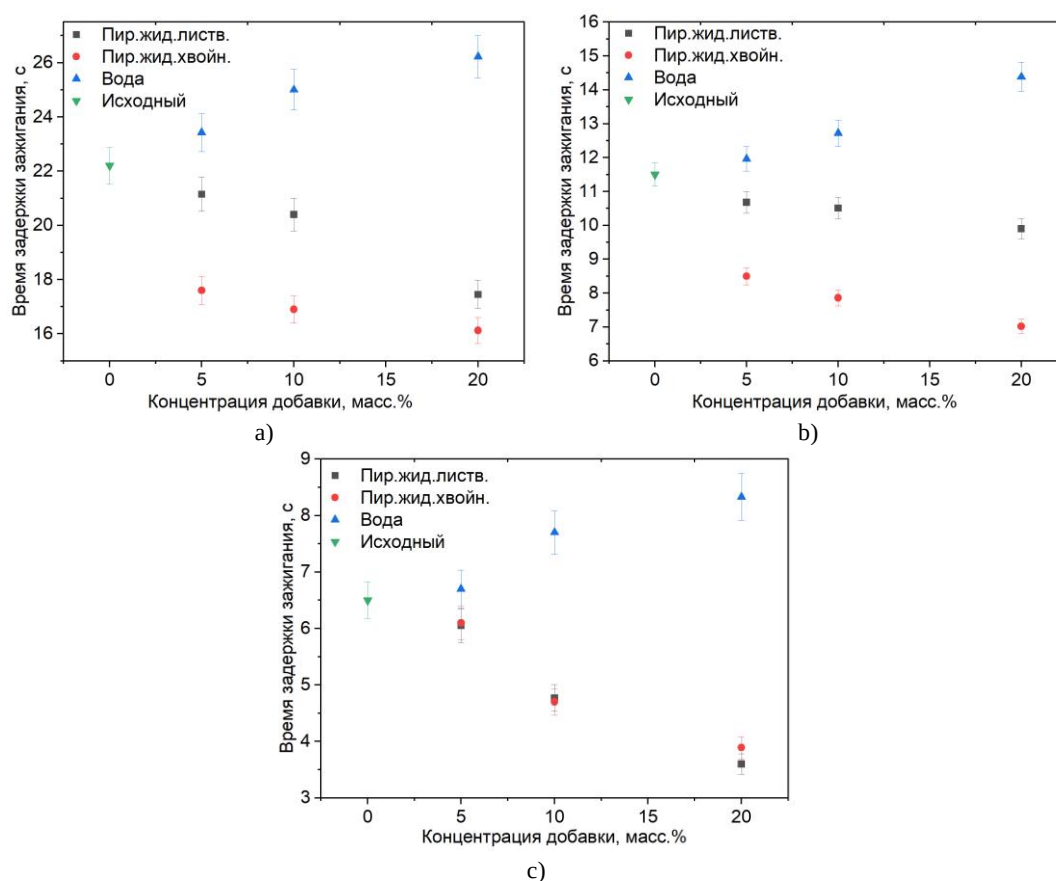


Рис. 4. Времена задержки зажигания смеси низкосортного угля с водой, пиролизной жидкостью древесины хвойных и лиственных пород при различной концентрации добавки: а – 600 °C, б – 700 °C, с – 800 °C

Fig. 4. Ignition delay times for mixtures of low-grade coal with water and pyrolysis liquid of soft and hardwood at different concentrations of additive: а – 600 °C, б – 700 °C, с – 800 °C

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

Характерные концентрационные кривые выделения газофазных продуктов сгорания для смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью древесины хвойных и лиственных пород на примере NO_x и CO приведены на рис. 5. Результаты для остальных температур греющей среды были аналогичными.

Концентрационные кривые выделения монооксида углерода и оксидов азота продемонстрировали отсутствие существенных изменений величин выброса указанных веществ. В целом, значения концентрационных пиков выделения NO_x для образцов с добавкой пиролизной жидкостью хвойных пород древесины, имеющей большую теплоту

сгорания, были несколько выше (на 15-20 %), чем для образцов с пиролизной жидкостью лиственных пород. При этом выделение оксидов азота практически не зависело от содержания добавки, что свидетельствует о высокой скорости протекающих процессов зажигания добавок пиролизной жидкости. Концентрационные кривые выделения монооксида углерода при сжигании пиролизной жидкости переработки древесины хвойных и лиственных пород также отличались незначительно. Несколько более высокие значения концентраций были получены для пиролизной жидкости лиственных пород. Также для данной добавки влияние концентрации на сдвиг температуры достижения второго пика было менее значительным, а общая величина выброса монооксида углерода незначительно выше. Это, опять же, может быть связано с меньшей теплотворной способностью данного образца пиролизной жидкости по сравнению с образцом из древесины хвойных пород. Данные результаты удовлетворительно коррелируют с данными по горению смесей угля с пиролизной жидкостью переработки резины [23].

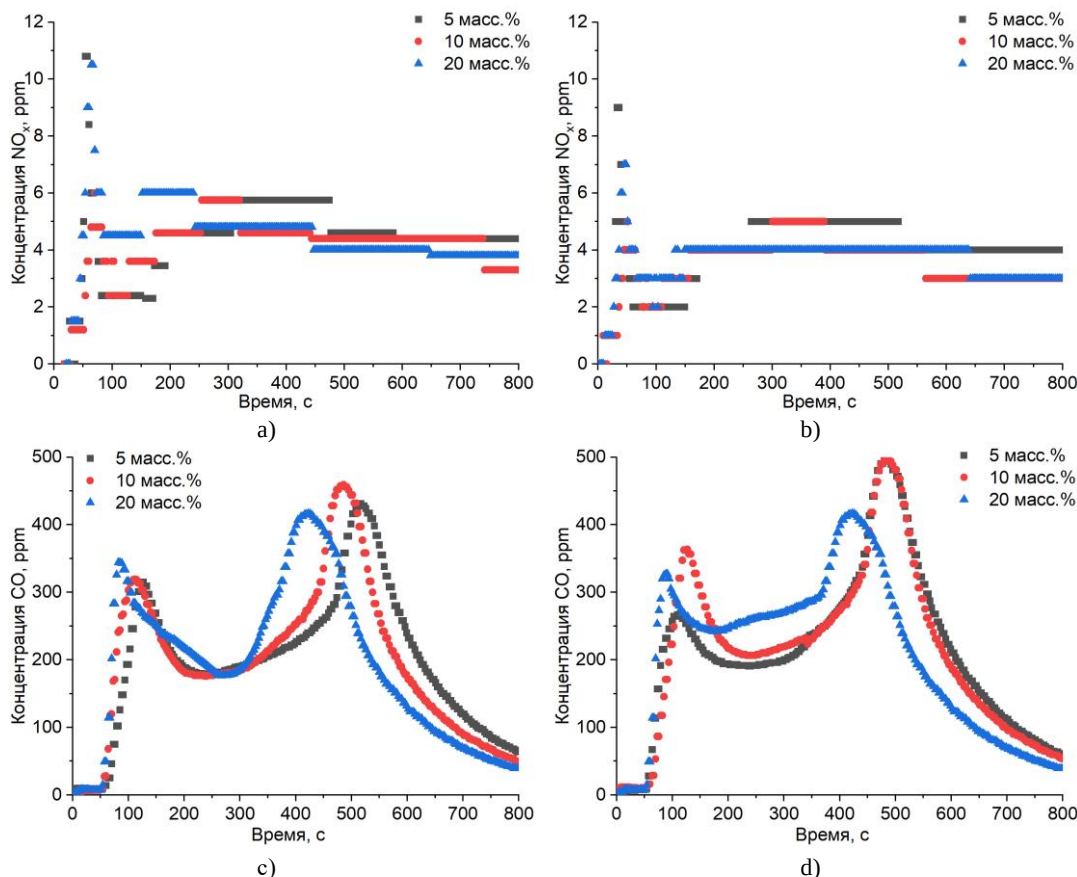


Рис. 5. Концентрационные кривые выделения NO_x (a) и CO (c) при горении низкосортного угля в смеси с пиролизной жидкостью древесины хвойных (a, c) и лиственных (b, d) пород при 800 °C

Fig. 5. Concentration curves of NO_x (a, b) and CO (c, d) release during combustion of low-grade coal with pyrolysis liquid of soft (a, c) and hardwood at 800 °C

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

Внешний вид концентрационных кривых выделения CO и NO_x подтверждают сделанную ранее гипотезу о независимом действии низкорекционного угля и пиролизной жидкости в смеси, что выражается в ярко выделенной стадийности процессов выделения оксидов азота и углерода. Учитывая крайне низкое содержания азота в угле и пиролизной жидкости, выделение оксидов азота связано с повышением температуры в области реакции, связанное с горением соответствующего компонента. Более высокие значения для пиков, соответствующих горению пиролизной жидкости, связаны с их более высокой реакционной способностью. Аналогичные результаты были получены и для концентрационных кривых выделения монооксида углерода, которые имеют аналогичную бимодальную форму.

Полученные экспериментальные зависимости времен задержки зажигания от концентрации были аппроксимированы линейным уравнением вида:

$$t = a \cdot C + b \quad (1)$$

где t – время задержки зажигания, с; C – массовая концентрация добавки, масс.%; a, b – аппроксимационные константы.

Значения полученных аппроксимационных констант для всех полученных образцов в каждом из полученных температурных режимов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Table 2

Значения аппроксимационных констант и коэффициента детерминации уравнения зависимости массовой доли добавки к низкосортному углю
Values of approximation constants and coefficient of determination of the equation of dependence of mass fraction of additive to low-grade coal

Добавка	600 °C			700 °C			800 °C		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Пиролизная жидкость хвойных пород древесины	- 0,2561	20,40	0,69	- 0,1998	10,47	0,77	- 0,1377	6,50	0,94
Пиролизная жидкость лиственных пород древесины	- 0,2286	22,25	0,97	- 0,1513	11,29	0,92	- 0,0739	6,55	0,97
Вода	0,2098	22,33	0,95	0,1472	11,35	0,99	0,0975	6,45	0,94

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

Полученные зависимости демонстрируют хорошую точность для всех составов, за исключением смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью хвойных пород древесины при 600 и 700 °C. Полученные результаты находятся в хорошей корреляции с аналогичными данными, полученными ранее для горения аналогичного топлива с пиролизной жидкостью переработки резины и нефтешламов [11]. Это свидетельствует о возникновении дополнительных комплексных синергетических эффектов при использовании пиролизной жидкости в условиях низких температур греющей среды. Подобными эффектами могут являться частичное взаимодействие (растворение, окисление) между компонентами твердого топлива и пиролизной жидкостью или агрегация высокорективных мелкодисперсных частиц на внешней поверхности более крупных, термически инертных частиц, что приводит к инициации зажигания последних [23]. Тем не менее, температуры 800 °C и выше являются достаточно типичными для большого числа котлов средней и малой мощности, что позволяет использовать линейную зависимость времен задержки зажигания от концентрации добавки. Более высокие значения коэффициентов a для смеси низкосортного угля с пиролизной жидкостью переработки древесины хвойных пород древесины могут быть вызваны более высокой теплотой сгорания данного компонента. Следует отметить, что относительная стабильность значений коэффициента b при заданной температуре греющей среды свидетельствует о независимости действия добавок (слагаемого $a \cdot C$) и зажигания низкосортного угля (слагаемое a).

Если принять значения эмпирического коэффициента a уравнения 1 выражающими скорость тепловыделения (или поглощения теплоты, для образца с добавками воды) за счет действия той или иной добавки при конкретной температуре греющей среды. В таком случае, используя аррениусовскую зависимость скорости реакции от температуры (уравнение 2), возможно определение значений энергии активации брутто реакции тепловыделения за счет действия добавки пиролизной жидкости и воды.

$$w = a = A \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (1)$$

где w – скорость тепловыделения, Вт; A – предэкспоненциальный множитель, Вт; E – энергия активации реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль К); T – температура, К.

Логарифмируя левую и правую часть уравнения, получим зависимость для определения величины энергии активации в следующей форме:

$$\ln(a) = \ln(A) - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (2)$$

Полученная в результате зависимость $\ln(a)$ от $1/T$ для образцов с добавками пиролизной жидкости переработки хвойных и лиственных пород древесины приведена на рисунке 6.

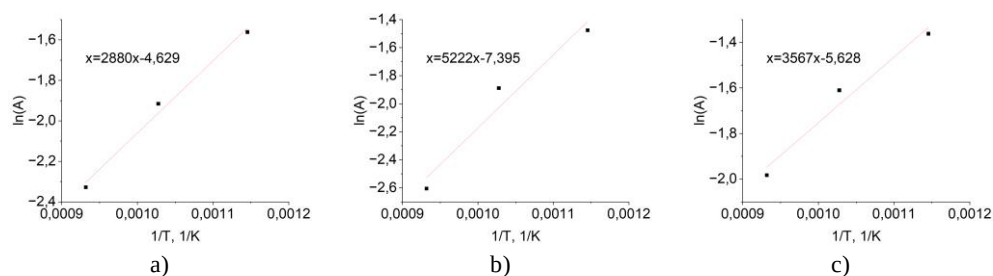


Рис. 6. Кривые определения энергии активации тепловыделения добавки при зажигании: а – пиролизной жидкости древесины хвойных пород, б – пиролизной жидкости древесины лиственных пород, в – воды

Fig. 6. Kinetic curves for determining activation energy of heat release during ignition of: a – pyrolysis liquid of softwood; b – pyrolysis liquid of hardwood; c – water

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

Значения коэффициента детерминации R^2 для полученных кривых были достаточно высокими (не менее 0,93). Рассчитанные в результате полученных зависимостей значения брутто-энергии активации составляли 23,94 кДж/моль для пиролизной жидкости переработки древесины хвойных пород, 43,4 кДж/моль – для пиролизной жидкости переработки древесины лиственных пород, 29,7 кДж/моль – для воды. Низкие значения энергии активации, невозможные для химических реакций, свидетельствуют о физическом характере процессов, определяющих скорость тепловыделения добавок в составе смесевых топлив, таких как, например, испарение или диффузия. Данный факт косвенно подтверждается аналогичными значениями для зажигания смеси угля с водой, для которой механизм испарения является бесспорным. Это позволяет сделать предположение о следующем механизме зажигания подобных смесей: после возгонки жидких продуктов пиролиза, преимущественно за счет испарения, они горят в газовой фазе, а выделяющееся тепло разогревает основную массу низкосортного угля, что и приводит к зажиганию. Для подтверждения данной гипотезы были сделаны кадры образцов в момент зажигания – рисунок 7. Наибольшая светимость области вблизи поверхности образца в момент зажигания свидетельствует о корректности сделанного предположения.



Рис. 7. Кадры образцов смеси низкосортного угля с пиролизной жидкостью переработки древесины: а – хвойных пород, б – лиственных пород

Fig. 7. Images of ignition of mixture of low-grade coal with pyrolysis liquid of: a – softwood; b – hardwood

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

Заклучение (Conclusions)

Исследован процесс зажигания и горения смесей низкосортного угля с пиролизной жидкостью переработки древесины хвойных и лиственных пород в диапазоне температур 600-800 °С и концентраций последних от 0 до 20 масс.%. В качестве образцов сравнения также были использованы образцы угля с добавками водопроводной воды. Были синтезированы образцы пиролизной жидкости, определены их основные свойства. Пиролизная жидкость хвойных пород древесины имела большую теплоту сгорания и реакционную способность.

Времена задержки зажигания смесей низкосортного угля с полученными пиролизными жидкостями монотонно снижались с ростом концентрации добавок, причем соответствующие значения для образцов с жидкостью переработки древесины хвойных

пород были ниже, чем образцов с идентичной концентрацией жидкости переработки лиственных пород древесины. При этом разница между полученными результатами снижалась с ростом температуры греющей среды. Концентрационные кривые выделяющихся при сжигании газофазных продуктов свидетельствовали о независимом и стадийном характере действия компонент смеси – низкосортного угля и пиролизной жидкости. Изменение общего количества выделяющихся газов было незначительным и носило аддитивный характер. Следует отметить, что, несмотря на относительно линейное изменение времен задержки зажигания в зависимости от величины добавки пиролизной жидкости, оно носило нелинейный эффект относительно исходного низкосортного угля.

Были получены линейные зависимости времен задержки зажигания от концентрации добавки в смеси в исследованном диапазоне температур. Установлено, что при 800 °С точность получаемых зависимостей была высокой для всех исследованных образцов, а при 600 и 700 °С – только для образцов с добавками пиролизной жидкости переработки лиственных пород древесины. Углубленный анализ энергии активации брутто-реакции тепловыделения пиролизной жидкости позволил сделать предположение о существенном вкладе процесса испарения на скорость данного процесса, за которым следует её газофазное горение с прогревом основной массы образца. Данная гипотеза частично подтверждается кадрами видеосъемки момента зажигания образца.

Литература

1. Исаков, Т.Д., Башкиров, В.Н., Грачев, А.Н., и др. Энерго- и ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал методом пиролиза // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2008. Т. 11. № 12. С. 155–158.
2. Таймаров, М.А., Чикляев, Е.Г. Разработка прямоточной пиролизной установки для пирогазетического разложения древесины // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 68–78.
3. Таймаров, М.А., Долгова, А.Н., Садурдинов, А.Р. Энергосберегающая установка для получения пиролизного газа и древесного угля // Вестник КГЭУ. 2018. Т. 39. № 3. С. 56–64.
4. Грачев, А.Н., Сафин, Р., Таймаров, М.А., и др. Исследование свойств жидкого продукта быстрого пиролиза отходов деревообработки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2009. Т. 11. № 12. С. 80–83.
5. Кузнецов, И.С., Тищенко, Н.М., Ребиков, Е.В. и др. Обзор современных технологий применения пиролиза // Естественные и технические науки. 2022. Т. 164. № 1. С. 216–218.
6. Бикбулатова, Г.М., Валеева, А.Р., Сабирзянова, А.И. Получение химических продуктов из суммарных жидких продуктов быстрого пиролиза древесины // Материалы XI Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век»; 18-19 февраля 2021 г., Курск. Курск.: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 324-326.
7. Файзрахманова, Г.М., Забелкин, С.А., Грачев, А.Н., и др. Использование древесной пиролизной жидкости для получения химических продуктов // Вестник казанского технологического университета. 2012. № 15 (15). С. 101–103.
8. Слюсарский, К.В., Ларионов, К.Б., Ивашкина, Е.Н., и др. Технологические решения по утилизации жидких продуктов медленного пиролиза древесной биомассы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов 2021. Т. 332. № 12. С. 173–188.
9. Манигомба, Ж.А., Чичирова, Н.Д., Груздев, В.Б. Перспективы использования продуктов пиролиза в дизель-генераторах промышленной группы «Regideso» в республике Бурунди // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 33–40.
10. Тимербаев, Н.Ф., Сафин, Р.Г., Зиятдинова, Д.Ф., и др. Теоретические и экспериментальные исследования тепло- и массообмена при термохимической переработке органических отходов в активированный уголь // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. № 4 (44). С. 76-86.
11. Слюсарский, К.В., Ларионов, К.Б., Асильбеков, А., и др. Исследование закономерностей окисления и зажигания смесей пиролизной жидкости с низкорективным углем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 140–150.
12. Грачев, А.Н., Башкиров, В.Н., Забелкин, С.А., и др. Исследование процесса быстрого пиролиза торфа и определение свойств получаемых продуктов // Деревообрабатывающая промышленность. 2018. №4. С. 75-84.
13. Забелкин, С.А., Грачев, А.Н., Башкиров, В.Н. и др. Энергетическое использование пиролизной жидкости // Вестник Казанского технологического университета. 2010. №10. С. 369-374.

14. Xiong, Z., Wang, Y., Syed-Hassan, S.S.A., et al. Effects of heating rate on the evolution of bio-oil during its pyrolysis // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 163, pp. 420–427.
15. Cohen-Sacal D., Khan M.S., Broumand M., et al. Combustion and emission characterization of upgraded biomass fast pyrolysis oil in a swirl burner // *Applications in Energy and Combustion Science*. 2023. Vol. 13. pp. 100118.1–12.
16. Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., и др. Особенности горения твердотопливной смеси на основе углей разной степени метаморфизма регионов енисейской Сибири // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т. 24. № 5. С. 136–146.
17. Jones, J.M., Kubacki, M., Kubica, et al. Devolatilisation characteristics of coal and biomass blends // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2005. Vol. 74, pp. 502–511.
18. Hroncová, E., Ladomerský, J., Musil, J. Problematic issues of air protection during thermal processes related to the energetic uses of sewage sludge and other waste. Case study: Co-combustion in peaking power plant // *Waste Management*. 2018. Vol. 73. pp. 574–580.
19. Глушков, Д.О., Стрижак, П.А., Чернецкий, М.Ю. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2016. № 10. С. 31–41.
20. Антонов, Д.В., Вершинина, К.Ю., Кузнецов, Г.В., и др. Математическое моделирование зажигания капли органоводоугольного топлива // *ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ*. 2021. Т. 94. № 4. С. 974–986.
21. Вершинина, К.Ю., Лырчиков, С.Ю., Стрижак, П.А. Зажигание топливных суспензий, приготовленных на основе отходов обогащения угля и нефтепродуктов // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54. № 3. С. 137–146.
22. Feoktistov, D.V., Glushkov, D.O., Nurpeiis, et al. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 236. pp. 107422.
23. Larionov, K.B., Slyusarskiy, K.V., Tsiulskiy, et al. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires // *ACS Omega*. 2021. Vol. 30. N6. pp. 19731–19739.

Авторы публикации

Слюсарский Константин Витальевич – канд. физ.-мат. наук, доцент Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета. Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачёва. *ORCID**: 0000-0002-9732-9093. *Email*: konstantinsv@tpu.ru.

Асильбеков Аскар Кумисбекович – младший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов энергетической отрасли Томского политехнического университета. *ORCID**: 0000-0002-3100-4261. *Email*: aka2@tpu.ru.

References

1. Iskhakov TD, Bashkirov VN, Grachev AN, et al. Energy and resource-saving at utilization of wooden cross ties by the method of pyrolysis. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2008; 11(12):155–158. (In Russ).
2. Taimarov MA, Chiklyayev EG. Development of a direct flow pyrolysis plant for pyrogenetic decomposition of wood. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2020; 22(6):68–78. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-68-78
3. Taimarov M, Dolgova A, Sadrtidinov A. Energy-saving installation for pyrolysis gas and tree coal. *Proceedings of the Kazan State Energy University*. 2018; 39(3):56–64. (In Russ).
4. Grachev AN, Safin RG, Taymarov MA, et al.. Study in the characteristics of the liquid product of fast pyrolysis of wood processing waste. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2009; 11-12:80–83. (In Russ).
5. Kuznetsov IS, Tishchenkov NM, Rebikov EV, et al. Overview of modern pyrolysis application technologies. *Natural and technical sciences*. 2022; 164(1):216–218. (In Russ).
6. Bikbulatova GM, Valeeva AR, Sabrizyanova AI. Poluchenie khimicheskikh produktov iz summarnikh zidkikh produktov bistrogo piroliza drevesini. In: Razumov MS *mezhdunaodnaya molodeznaya konferencia “Molodezh I XXI vek”; 18-19 Feb 2021; Kursk, Russia*. Kursk: Yugo-Zapandyi gosudarstvennyi universitet Publ., 2021. Pp.324–326. (In Russ).
7. Faizrahmanova GM, Zabelkin SA, Grachev AN, et al. Ispolzovanie drevesnoi piroliznoi zhidkosti dlia polucheniya khimicheskikh produktov. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012;

15(15):101–103. (In Russ).

8.Slyusarsky KV, Larionov KB, Ivashkina EN, et al. Technological solutions for utilization of liquid products of slow wood biomass pyrolysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021; 332(12):173–188. (In Russ). doi: 10.18799/24131830/2021/12/3439

9. Manigomba ZhA, Chichirova N, Gruzdey V. Prospects for the use of the products of pyrolysis in diesel generators of a company "Regideso" in the Republic of Burundi. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2018; 20(1-2):33–40. (In Russ).

10.Timerbaev NF, Safin RG, Ziatdinova DF, et al. Theoretical and experimental studies of heat and mass exchange during thermochemical processing of organic waste in activated coal. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2019; 44(4):76–86. (In Russ).

11.Slyusarskiy KV, Larionov KB, Asilbekov A, et al. Study on oxidation and ignition of mixtures of pyrolysis liquids with low-reactivity coal. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022; 333(12):140–150. (In Russ). doi: 10.18799/24131830/2022/12/3913

12.Grachev AN, Bashkorov VN, Zabelkin SA, et al. Issledovanie processa bistrogo piroliza torfa I opredelenie svoystv poluchaemikh produktov. *Drevoobrabatavushchaya promishlennost*. 2018; 4:75–84. (In Russ).

13.Zabelkin SA, Grachev AN, Bashkirov VN, et al. Energeticheskoe ispolzovanie piroliznoy zhidkosti. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2010; (10):369–374. (In Russ).

14.Kuznetsov IS, Tishchenkov NM, Rebikov EV, et al. Overview of modern pyrolysis application technologies. *Natural and technical sciences*. 2022; 164(1):216–218. (In Russ).

15.Cohen-Sacal D, Khan MS, Broumand M, et al. Combustion and emission characterization of upgraded biomass fast pyrolysis oil in a swirl burner. *Applications in Energy and Combustion Science*. 2023; 13:100118.1–12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2023.100118>

16.Zhuikov AV, Matyushenko AI, Kulagin VA, et al. Research of combustion of solid fuel mixture based on coals of different degrees of metamorphism in the regions of yenisei Siberi. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2022; 24(5):136–146. (In Russ). doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146

17.Jones J.M., Kubacki M., Kubica K., et al. Devolatilisation characteristics of coal and biomass blends. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2005; 74:502–511. doi:10.1016/j.jaap.2004.11.018

18. Hroncová E, Ladomerský J, Musil J. Problematic issues of air protection during thermal processes related to the energetic uses of sewage sludge and other waste. Case study: Co-combustion in peaking power plant. *Waste Management*. 2018; 73:574–580. doi:10.1016/j.wasman.2017.08.025

19. Glushkov DO, Strizhak PA, Chernetskii MY. Organic coal-water fuel: problems and advances (review). *Thermal engineering*. 2016; 63(10):701–717. (In Russ). doi: 10.1134/S0040601516100037

20. Antonov DV, Vershinina KY, Kuznetsov GV, et al. Mathematical simulation of ignition of an organic coal–water fuel droplet. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021; 94(4):949–962. (In Russ). doi: 10.1007/s10891-021-02372-z

21. Vershinina KY, Lyrshchikov SY, Strizhak PA. Ignition of fuel slurries based on waste products of coal processing and oil refining. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018; 54(3):376–384. (In Russ). doi:10.15372/FGV20180316.

22. Feoktistov DV, Glushkov DO, Nurpeis AE, et al. Impregnation of different coals and biomass with rapeseed oil for intensifying their ignition in a heated air stream during oil-free boiler start-up. *Fuel Processing Technology*. 2022; 236:107422. doi:10.1016/j.fuproc.2022.107422

23.Larionov KB, Slyusarskiy KV, Tsibulskiy SA, et al. Activation of Anthracite Combustion Using Pyrolysis Oil from Thermal Conversion of Waste Car Tires. *ACS Omega*. 2021; 6:19731–19739. doi:10.1021/acsomega.1c02404

Authors of the publication

Konstantin V. Slyusarskiy - Tomsk Polytechnic university, Tomsk, Russia., T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Askar K. Asilbekov - Tomsk Polytechnic university, Tomsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 25.10.2023 г.

Отредактировано 24.01.2024 г.

Принято 01.02.2024 г.



ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Соловьев С.А. *, Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>, solovev.sa@kgeu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Провести обзор современных высокопористых ячеистых теплообменников. *МЕТОДЫ.* Проведен широкий обзор литературы, посвященной высокопористым ячеистым структурам, применяемым в качестве теплообменников. Исследовалась как отечественная, так и зарубежная литература. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проведен анализ высокопористых теплообменников различной структуры: стохастической (пены с открытыми и закрытыми ячейками) и упорядоченной (соты и решетки). Исследованы методы производства пен с открытыми/закрытыми ячейками, аддитивные технологии для производства сотовых и решетчатых структур. Описаны основные свойства высокопористых структур. Проанализированы факторы, влияющие на теплообмен и гидродинамику в высокопористых ячеистых теплообменниках. Проведен обзор областей применения высокопористых металлических теплообменников. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Теплообмен и гидродинамика в высокопористых материалах зависит от структурных параметров, таких как: пористость, размер и геометрия ячейки, диаметр и геометрия стоек. Повышение пористости и размера ячейки ведет к уменьшению коэффициента теплопередачи и перепада давления. Изменение геометрии ячейки влияет на удельную площадь поверхности теплообменника и перепад давления. Ячейки со сложной геометрией, например, октет, имеют большую площадь поверхности и обеспечивают высокий коэффициент теплопередачи, но также и оказывают высокое сопротивление потоку теплоносителя. Ячейки с простой геометрией, например, куб, напротив обеспечивают низкое сопротивление потоку и низкий коэффициент теплопередачи. В целом любое изменение структурных параметров влияет как на теплообмен, так и на гидродинамику.

Ключевые слова: теплообмен; высокопористый ячеистый материал; теплообменник; гидродинамика; обзор.

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

Для цитирования: Соловьев С.А., Соловьева О.В., Шакурова Р.З., Голубев Я.П. Обзор применения высокопористых ячеистых теплообменников // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.

OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS

Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP.

Kazan State Power Engineering University

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-8428-3367>, solovev.sa@kgeu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Review modern highly porous cellular heat exchangers. *METHODS.* We conducted a broad literature review on highly porous cellular structures used as heat exchangers. We studied both domestic and foreign literature. *RESULTS.* We analyzed highly porous heat exchangers of various structures: stochastic (foam with open and closed cells) and ordered (honeycombs and lattices). Methods for producing open/closed cell foams and additive technologies for producing honeycomb and lattice structures have been studied. The basic

properties of highly porous structures are described. The factors influencing heat transfer and hydrodynamics in highly porous cellular heat exchangers are analyzed. A review of the application areas of highly porous metal heat exchangers is carried out. **CONCLUSION.** Heat transfer and hydrodynamics in highly porous materials depend on structural parameters, such as porosity, cell size and geometry, diameter, and geometry of the strands. Increasing porosity and cell size leads to a decrease in heat transfer coefficient and pressure drop. Changing the cell geometry affects the specific surface area of the heat exchanger and the pressure drop. Cells with complex geometries, such as octet, have a large surface area and provide a high heat transfer coefficient but high resistance to coolant flow. Cells with simple geometries, such as a cube, on the other hand, provide low flow resistance and low heat transfer coefficient. In general, any structural parameter change affects heat transfer and hydrodynamics.

Keywords: heat transfer; highly porous cellular material; heat exchanger; hydrodynamics; review.

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: Solovev SA., Soloveva OV., Shakurova RZ., Golubev YaP. OVERVIEW OF THE APPLICATION OF OPEN CELL FOAM HEAT EXCHANGERS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (1): 165-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-165-194.

Введение (Introduction)

Высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) – класс материалов с пористой структурой, обладающих низкой плотностью в сочетании с высокой удельной площадью поверхности (до $10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$) и высокой прочностью на сжатие (до 120 МПа). Ячеистые материалы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве теплообменников [1], тепло- и звукоизоляции [2, 3], фильтров [4], катализаторов [5] и т.д. В настоящей статье приведен обзор научной литературы, посвященной анализу применения ВПЯМов в качестве теплообменников.

Теплообменники являются неотъемлемой частью многих отраслей промышленности, таких как энергетика, химическая промышленность, пищевая промышленность, металлургия, нефтепереработка и т.д. Снабжение жилых, общественных и административных зданий теплом и горячей водой также осуществляется при помощи теплообменных аппаратов. От эффективности работы теплообменников зависит количество и качество производимых сырья и товаров, количество производимой тепловой и электрической энергии, качество жизни человека в целом. Одной из причин, почему специалисты в области энергетики находятся в постоянном поиске и разработке методов повышения эффективности работы теплообменников, является высокий расход топливных ресурсов на производство тепловой и электрической энергии, при этом покупка топлива является основной статьей расходов на каждом энергетическом предприятии [6]. Высокое потребление топливных ресурсов влечет за собой также и большое количество выбросов вредных веществ в атмосферу, таких как оксиды углерода, азота и серы [7]. Повышение эффективности теплообменников способствует снижению потребления топливных ресурсов, уменьшению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Турбулизация потока и повышение площади поверхности теплообмена являются основными способами повышения эффективности теплообменника [8]. Традиционные пластинчатые и трубчатые теплообменники обладают относительно небольшой площадью поверхности, а для турбулизации потока в таких теплообменниках необходимо применять оребрение или завихрители [9-11]. В этом отношении ВПЯМы имеют явное преимущество: благодаря пористой структуре, ВПЯМы обладают высокой удельной площадью поверхности и обеспечивают интенсивную турбулизацию (перемешивание) потока. Путем контроля структурных параметров ВПЯМа можно значительно увеличить удельную площадь поверхности, сохранив при этом неизменными размеры теплообменника. Таким образом, высокопористые ячеистые материалы имеют большие перспективы для замены традиционных пластинчатых и трубчатых теплообменников.

Свойства ВПЯМов определяются природой материала и его структурой. По природе материала различают полимерные, керамические, металлические и т.д. ВПЯМы, при этом полимерные ВПЯМы применяют для тепло- и звукоизоляции, а керамические и

металлические ВПЯМы – в качестве теплообменников. Существуют четыре основных вида структур высокопористых ячеистых материалов (рис. 1). Стохастические структуры называются пенами и имеют ячейки открытого или закрытого типа. Открытоячеистые пены характеризуются тем, что поры являются сообщающимися. Пены с закрытыми ячейками имеют изолированные друг от друга поры и характеризуются более высокой прочностью на сжатие и плотностью, чем открытоячеистые пены. При этом необходимо подменить, что плотность высокопористого материала зависит от его пористости, и может изменяться в широком диапазоне. Периодические ячеистые структуры имеют вид двухмерных (соты) или трехмерных решеток. Соты имеют систему продольных параллельных каналов, каждый из которого изолирован от других. Решетки, подобно пенам с открытыми ячейками, имеют сообщающиеся поры. Для теплообмена применяют ВПЯМы в виде открытоячеистой пены, соты и решетки, в то время как ВПЯМы в виде закрытоячеистой пены применяют, в основном, для теплоизоляции.

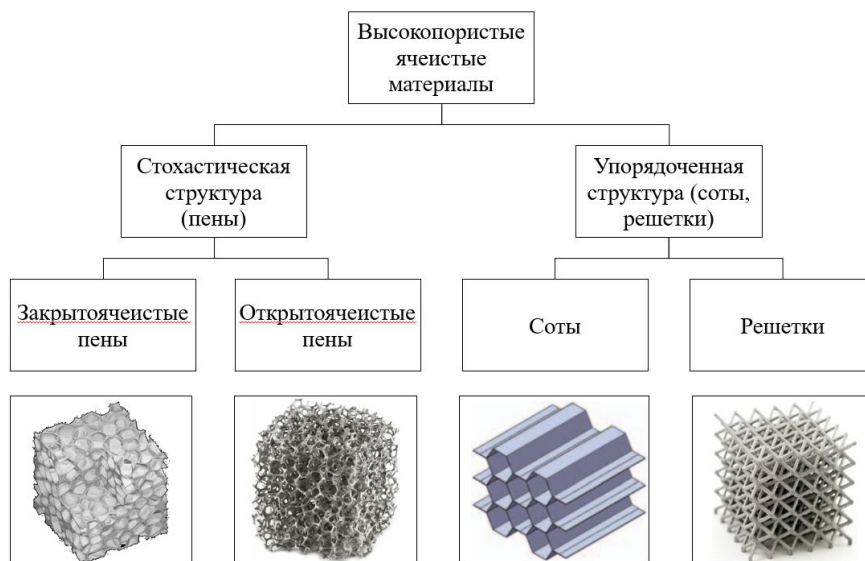


Рис. 1. Структуры высокопористых ячеистых материалов [12]

Fig. 1. Structures of highly porous cellular materials [12]

Итак, в данной статье представлен широкий обзор литературы, посвященной применению высокопористых ячеистых материалов в качестве теплообменников. Настоящая статья имеет следующую структуру:

- в первом разделе представлен обзор методов производства ВПЯМов, а именно: методы производства металлических пен с закрытыми или открытыми ячейками, аддитивные технологии для производства сотовых и решетчатых структур;
- во втором разделе представлен обзор литературы, посвященной непосредственно применению ВПЯМов как теплообменников для воздуха или воды; в данном разделе рассмотрены основные факторы, влияющие на теплообмен и гидродинамику в ВПЯМах;
- в третьем разделе представлен обзор основных направлений применения теплообменников из ВПЯМов.

Методы производства ВПЯМов (Methods for producing HPCM)

Несмотря на то, что металлические пены считаются довольно новым материалом, первое упоминание о них датируется 1925-м годом, когда французский изобретатель Де Меллер запатентовал способ получения металлической пены. Идея Де Меллера заключалась в инъекции инертного газа в расплавленный алюминий либо в добавлении вспенивающего агента, например, карбоната, к расплавленному металлу. Однако металлическая пена, получаемая вышеописанным методом, оставалась очень нестабильной. В дальнейшие годы не было зарегистрировано попыток Де Меллера развить свою идею. К задаче создания металлических пен вернулись лишь в начале 1950-х годов, но уже в США. Джон Эллиот усовершенствовал метод, описанный Де Меллером, предложив использовать в качестве пенообразователя гидриды титана или циркония. Начиная со второй половины XX века начинаются активные исследования по созданию металлических пен. Ученые из исследовательских лабораторий Бьоркстена запатентовали метод создания металлической пены, заключающийся в нагреве и непрерывном вспенивании гранулированного металла и вспенивающего агента. Карри Б. Берри из Ethyl

Corporation предложил сгущать металлический расплав перед вспениванием. Для этого через сплав пропускали кислород, воздух или двуокись углерода. Металлические пены, получаемые таким способом, отличались хорошей стабильностью [13]. В 1985-м году инженеры из компании Shinko Wire Co. Ltd. (Япония) запатентовали способ производства металлической пены путем добавления в расплавленный алюминий частиц металлического кальция. Далее расплав перемешивался и в него добавляли пенообразователь (TiH_2). Добавление частиц кальция позволило повысить вязкость расплава и стабилизировать пену, благодаря чему ученым удалось получить металлическую пену с равномерной структурой. Таким образом, первые зарегистрированные методы создания металлических пен позволяли получать структуры с закрытыми ячейками. Следует выделить пять основных методов получения металлических пен с закрытыми ячейками (рис. 2):

- вспенивание металлических расплавов при помощи пенообразователя;
- вспенивание расплавов путем инъекции газа;
- вспенивание металлических порошков;
- вспенивание армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах;
- эвтектическое затвердевание металл-газ.



Рис. 2. Методы производства металлических пен с закрытой ячейкой [14]

Fig. 2. Methods for the production of metal foams with a closed-cell structure [14]

Идея вспенивания металлических расплавов при помощи пенообразователя принадлежит компании Shinko Wire, о которой упоминалось ранее. Процесс вспенивания проиллюстрирован на рисунке 3. На первом этапе в расплав алюминия при температуре 680 °C добавляют 1,5 мас.% металлического кальция и перемешивают в течение нескольких минут. Металлический кальций позволяет за короткое время увеличить вязкость расплава в несколько раз. Это необходимо для того, чтобы в процессе вспенивания пузырьки газа оставались стабильными, не схлопывались и не сливались друг с другом. По достижении требуемой вязкости, в расплав добавляют пенообразователь (гидрид титана) в количестве 1,6 мас.%. Под действием высокой температуры в 680 °C происходит разложение пенообразователя с выделением водорода. Расплав начинает расширяться и образуется жидкая металлическая пена. Далее сосуд с расплавом охлаждают до температуры ниже точки плавления сплава, жидкая пена затвердевает [15-17]. На рисунке 4 представлена фотография металлической пены (Alporas), полученной методом вспенивания расплава с добавлением пенообразователя.

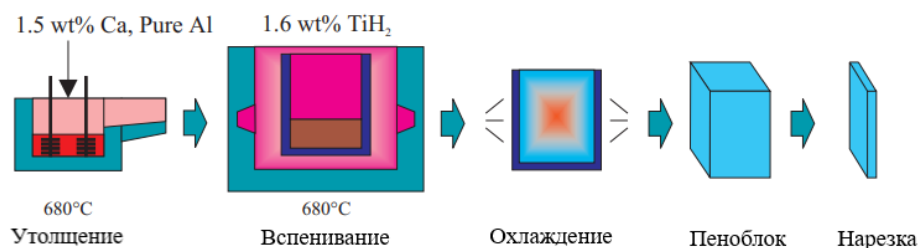


Рис. 3. Вспенивание металлического расплава при помощи пенообразователя [18]

Fig. 3. Foaming of a metal melt using a foaming agent [18]

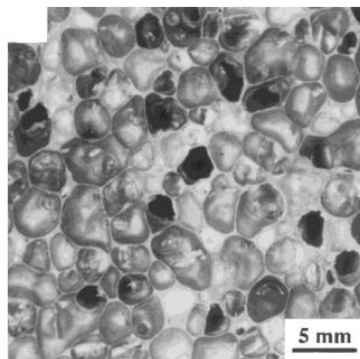


Рис. 4. Фотография металлической пены Alporas [18]

Fig. 4. Photo of Alporas metal foam [18]

Метод вспенивания расплавов путем инъекции газа был разработан инженерам компаний Sumat Corp. (Канада) и Norsk Hydro (Норвегия) примерно в одно время, независимо друг от друга. Схема реализации метода представлена на рисунке 5. Метод заключается в том, что в расплав алюминия добавляют частицы оксида магния, карбида кремния или оксида алюминия. Добавление одного из этих веществ приводит к формированию металломатричного композита. Далее в композитный расплав впрыскивается газ (воздух, азот или аргон), что приводит к образованию мелких пузырьков газа в расплаве. Смесь расплава и пузырьков газа всплывает на поверхность расплава, далее эту смесь снимают с помощью конвейера, она застывает, превращаясь в металлическую пену [19-21].

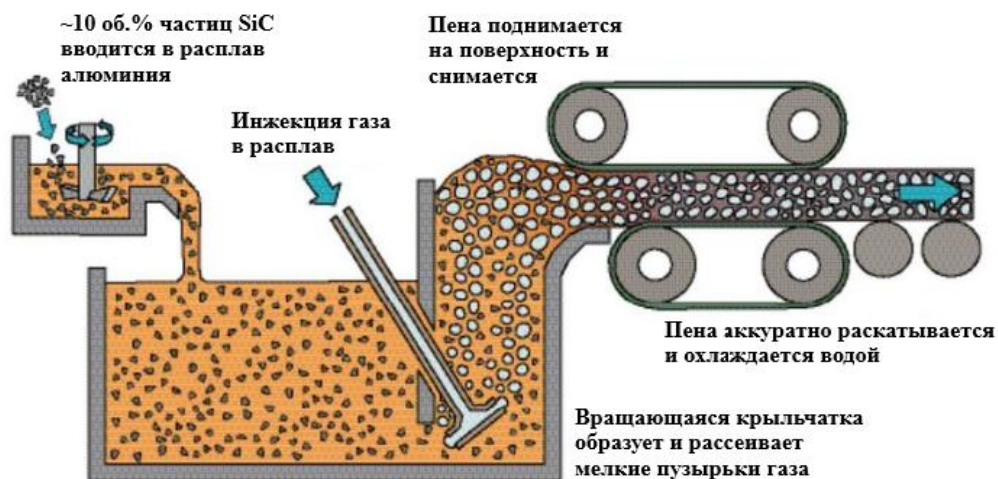


Рис. 5. Схема реализации метода вспенивания металлического расплава путем инъекции газа [22]

Fig. 5. Scheme of implementation of the method of foaming a metal melt by gas injection [22]

Третий метод производства металлической пены заключается в смешивании порошков металлов и металлических сплавов с небольшим количеством пенообразователя [23, 24]. Далее смесь уплотняют с помощью прессования или экструзии. После уплотнения смеси придают форму путем, например, прокатки или штамповки. Далее полученный полуфабрикат нагревают до температур, близких к температуре плавления металла. Пенообразователь начинает разлагаться, выделяя при этом газ. В результате смесь начинает расширяться и приобретает высокопористую структуру [25]. Схема получения металлической пены путем вспенивания металлического порошка представлена на рисунке 6. Описанный метод позволяет получать металлические

пены не только из алюминия, но также из цинка, олова, латуни и свинца.

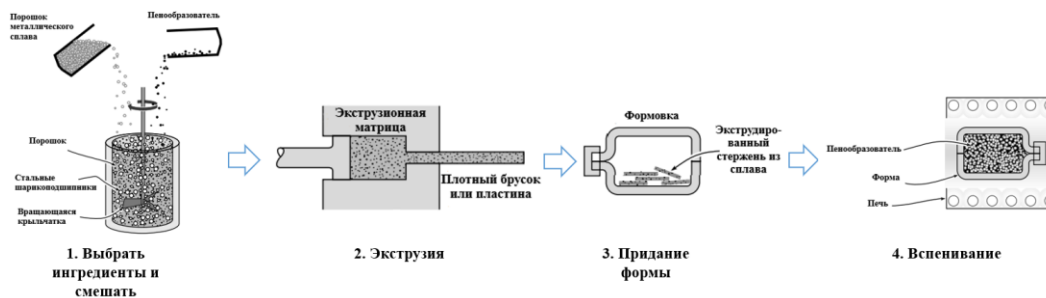


Рис. 6. Схема получения металлической пены путем вспенивания металлических порошков [26]

Метод вспенивания металлического порошка был модифицирован путем добавления частиц пенообразователя (TiH_2) в расплав алюминия с последующим отверждением расплава. Такой способ получил название «вспенивание армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах». На первом этапе порошок гидрида титана проходит обработку термическим окислением для создания оксидного барьерного слоя на поверхности частиц TiH_2 для замедления их разложения. Далее обработанный порошок гидрида титана диспергируют в постепенно охлаждаемый расплав алюминия с добавлением частиц кремния. Частицы кремния позволяют повысить стабильность пены. Далее металлический слиток, содержащий пенообразователь, нагревают до температуры плавления, при котором происходит разложение пенообразователя с выделением водорода, благодаря чему металл приобретает пористую структуру. Схема реализации процесса представлена на рисунке 7.

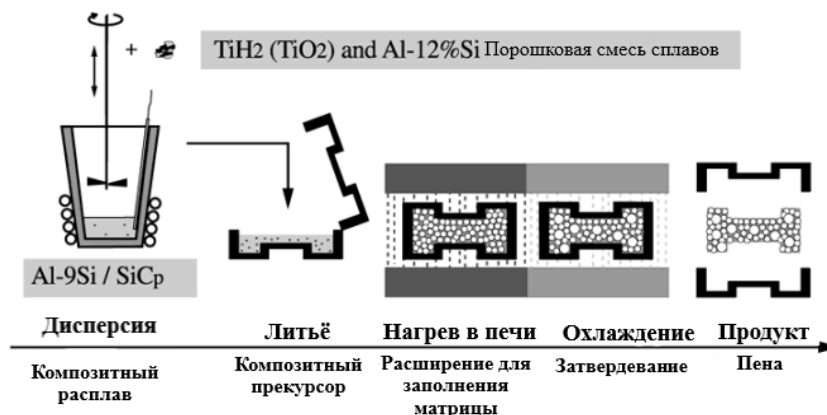


Рис. 7. Схема реализации метода вспенивания армированных металлов путем выделения газа в прекурсорах [27]

Относительно новым методом производства металлических пен является эвтектическое затвердевание металл-газ. Метод основывается на том, что некоторые жидкие металлы, такие как алюминий, медь, железо, никель и т.д., образуют эвтектическую бинарную систему с газообразным водородом. В процессе эвтектического затвердевания расплав образует упорядоченную структуру с двумя фазами: металл и газ. Реализация этого метода требует использования специального оборудования (рис. 8). Аппарат представляет собой сосуд, находящийся под высоким давлением (до 50 атмосфер), который содержит тигель, нагревательный змеевик и цилиндр с водоохлаждаемой медной пластиной. В тигле происходит плавление металла с последующим затвердеванием при определенном давлении газа (1-50 атмосфер). Плавление происходит в атмосфере водорода, содержание которого контролируют путем изменения парциального давления. При последующем снижении температуры расплав претерпевает эвтектический переход в двухфазную высокопористую систему металл-газ. Отличительной особенностью этого метода является то, что поры имеют форму, удлиненную в направлении затвердевания (рис. 9).

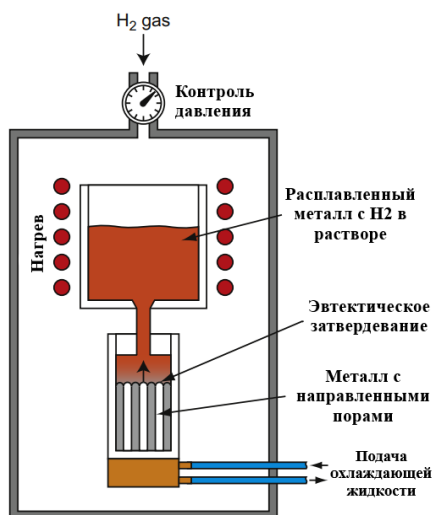


Рис. 8. Аппарат для создания металлической пены путем эвтектического затвердевания [28]

Fig. 8. An apparatus for creating metal foam by eutectic solidification [28]

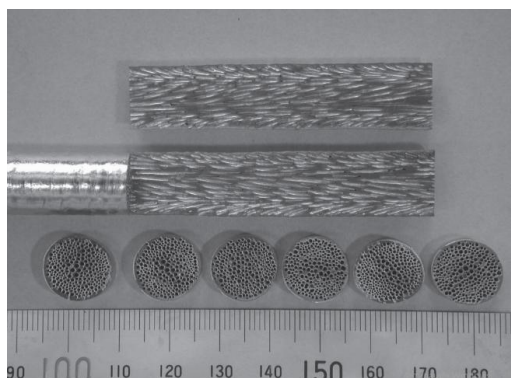


Рис. 9. Фотография металлической пены, полученной путем эвтектического затвердевания [29]

Fig. 9. Picture of metal foam obtained by eutectic solidification [29]

Пены с открытыми ячейками сочетают легкий вес, низкую плотность, высокую удельную площадь поверхности и прочность. Такие пены нашли применение во многих отраслях промышленности для интенсификации теплообмена, фильтрации газов, разделения эмульсий, звукопоглощения, поглощения энергии и т.д. Для производства металлических пен с открытыми ячейками применяют следующие методы:

- литье по выплавляемым моделям
- осаждение металла;
- инфильтрация металла;
- порошковая металлургия.

В методе литья по выплавляемой модели за основу берут полимерную губку с открытоячеистой структурой [30, 31]. Схема реализации метода представлена на рисунке 10. На первом этапе губку покрывают огнеупорным шламом, например, суспензией из гипса. После отверждения суспензии полимерную губку выжигают, получая заготовку для металлической пены. В эту заготовку вливают расплав металла, процесс происходит под давлением, чтобы расплав заполнил каждый канал в заготовке. Далее полученную форму охлаждают, после чего удаляют заготовку. В результате получается металлическая пена, имеющая практически ту же структуру, что и полимерная губка. Таким образом, структура металлической пены, изготовленной методом литья по выплавляемой модели, зависит от структуры полимерной губки. Контролируя структуру полимерной губки, можно изготавливать металлические пены с требуемыми морфологией и свойствами. Однако, у данного метода имеются ограничения: изготовить металлическую пену с мелкими порами будет очень затруднительно.

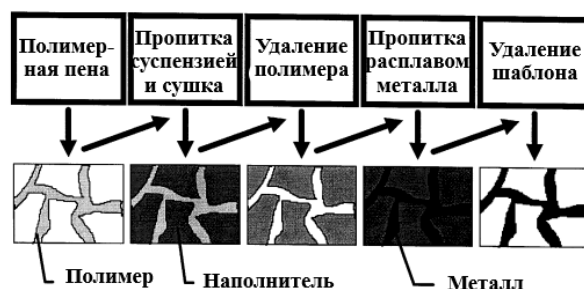


Рис. 10. Схема реализации метода литья на выплавляемой основе [32]

Fig. 10. Scheme of implementation of the lost wax casting method [32]

Метод осаждения металла также предполагает использование полимерной губки в качестве шаблона. Металл осаждается на полимерной губке гальваническим способом (электроосаждение) [33] или же путем химического осаждения [34]. При электроосаждении на полимерную губку наносится электропроводящий материал, например, графит или сажа. Металл наносится гальваническим способом. После нанесения слоя металла полимерная основа удаляется путем термообработки. В результате получается металлическая пена с открытыми порами и структурой, повторяющей структуру полимерной губки. Схема реализации способа электроосаждения приведена на рисунке 11.

При химическом осаждении получают пары металла, используя вакуумную камеру. Далее пары металла конденсируются на полимерной губке, толщина слоя металла зависит от плотности паров. После охлаждения полимерная основа также удаляется путем термической или химической обработки. Так же, как и электроосаждение, химическое осаждение позволяет производить металлические пены с полыми стержнями.

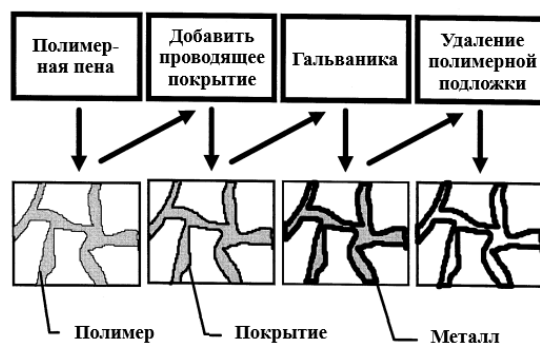


Рис. 11. Схема реализации метода электроосаждения металла на полимерной губке [32]

Fig. 11. Scheme of implementation of the method of electrodeposition of metal on a polymer sponge [32]

Метод инфильтрации металла является одним из первых методов производства открытоячеистых металлических пен. Метод инфильтрации основан на применении так называемых «держателей пространства», которые представляют собой гранулированный материал малой плотности. В качестве держателей пространства используют растворимые соли, например, NaCl [35], гранулы вермикулита [36], керамзита [37], песчаные гранулы [38] и т.д. Гранулы заливают расплавом металла под давлением для заполнения всех полостей между гранулами. После охлаждения гранулы удаляются выщелачиванием или термообработкой. Метод инфильтрации получил широкое распространение благодаря простоте и возможности создавать пены требуемой геометрии. Для этого заранее изготавливают пресс-форму из гранул [39]. На рисунке 12 представлена схема реализации метода инфильтрации металла.

Метод порошковой металлургии также подразумевает использование держателей пространства, которые смешивают с металлическим порошком, уплотняют и спекают. Металлический порошок спекают или плавят при температуре ниже температуры плавления держателей пространства. Далее держатели удаляются путем растворения или выщелачивания. В качестве держателей пространства часто применяют неорганические соли, например, NaCl или CaCl_2 , которые удаляются путем растворения, такой процесс получил название спекания-растворения [40].

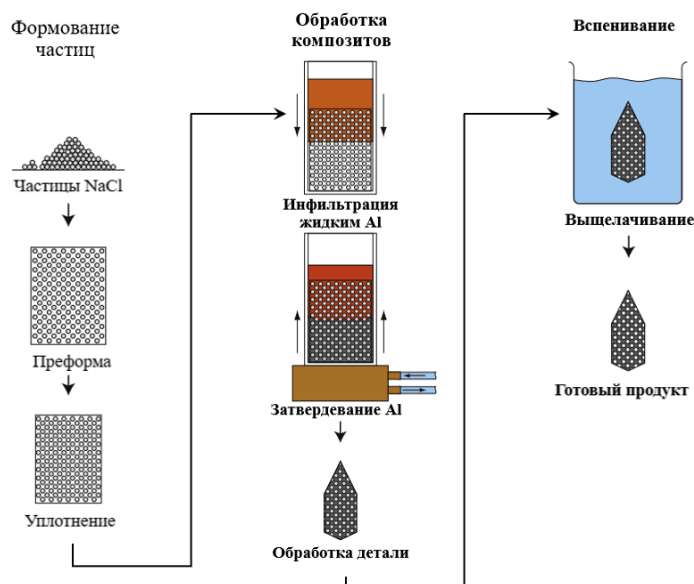


Рис. 12. Схема реализации метода инфильтрации металла [28]

Fig. 12. Scheme of implementation of the metal infiltration method [28]

Реже в качестве держателей пространства применяют сахарозу или легкоплавкую мочевины, однако в этом случае удаление держателя осуществляется путем выщелачивания перед процессом спекания [41]. Такой процесс получил название растворения-спекания. Металлическая пена, полученная методом порошковой металлургии, имеет открытую пористую структуру, размер и форма ячеек при этом контролируется размером, формой и количеством держателя. На рисунке 13 (а) изображена схема метода спекания-растворения, на рисунке 13 (б) – схема метода растворения-спекания.

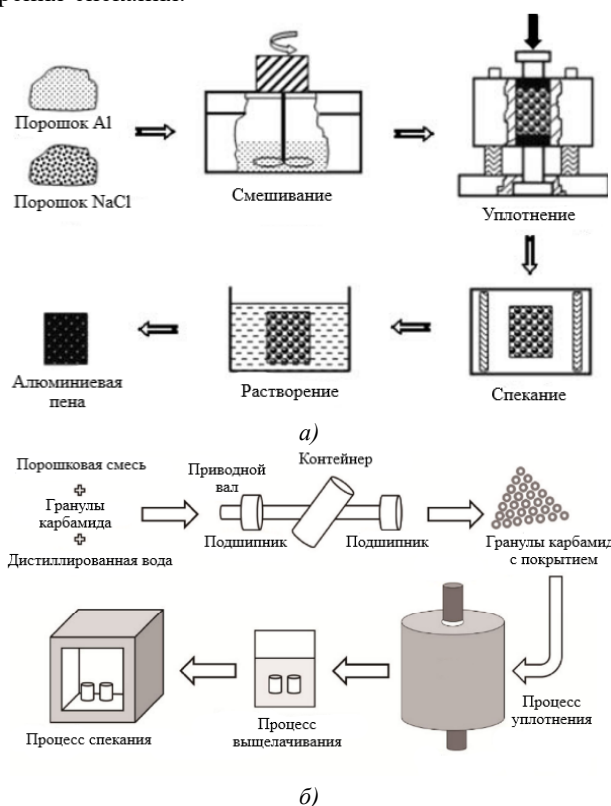


Рис. 13. Схемы реализации: (а) метода спекания-растворения [42]; (б) метода растворения-спекания [41].

Fig. 13. Implementation schemes: (a) sintering-dissolution method [42]; (b) the dissolution-sintering method [41]

Для производства пористых металлов сложной геометрии зачастую применяют аддитивные технологии, которые позволяют самостоятельно задавать форму ячеек, их

размер, толщину перегородок и т.д. Получаемые в результате структуры называют решетками или сотами. Аддитивные методы предполагают построение 3D-модели решетчатой структуры, используя современные САПР, затем структуры печатаются на 3D-принтере методами: селективного лазерного плавления [43, 44] и селективного лазерного спекания [45]. Аддитивные технологии подходят для производства решетчатых структур из титана, меди или нержавеющей стали. Алюминий обладает высокой отражательной способностью, поэтому его производство аддитивными методами нецелесообразно.

Применение 3D-печати, с одной стороны, позволяет получать металлические пористые конструкции требуемых геометрии и свойств. Однако, размер печатаемых структур ограничен размерами принтера, а сами структуры нуждаются в последующей обработке. Качество структур зависит от мощности лазера, скорости печати и параметров обработки. В связи с этим производство металлических решеток методами аддитивных технологий является дорогостоящим и не применяется в крупных масштабах.

Металлические ВПЯМы как теплообменники (*Metal HPCM as heat exchangers*)

Пористые металлы активно применяют для интенсификации теплообмена в тепловых приложениях. Металлические ВПЯМы изменяют поле течения теплоносителя и уменьшают толщину пограничного слоя. Благодаря пористой структуре теплоноситель интенсивно перемешивается, что улучшает теплообмен. При одинаковых габаритных размерах, металлические пористые теплообменники имеют в несколько раз большую площадь поверхности, чем пластинчатые теплообменники. Другим достоинством металлических ВПЯМов является низкая плотность и, следовательно, лёгкий вес, при этом сохраняются высокими прочностью и твердостью. ВПЯМы хорошо противостоят износу, влаге и термоциклированию, высокой температуре (в зависимости от материала до 500-100 °С) выдерживают тепловые удары. Все эти факторы делают металлические ВПЯМы крайне подходящими для применения в качестве теплообменников [46, 47].

Ряд исследований посвящен сравнению эффективности традиционных ребристых теплообменников с эффективностью пенометаллических теплообменников. Исследования, как правило, проводят на пучках труб, имеющих ребра или же обернутых слоем металлической пены [48-50]. Huisseune и др. [51] заявляют о повышении скорости теплоотдачи в шесть раз от труб, обернутых металлической пеной, в сравнении с трубами без металлической пены. T'Joep и др. [52] предложили новую конструкцию теплообменника, которая представляла собой ряд алюминиевых трубок 12 мм, обернутых тонким слоем металлической пены (4-8 мм). Авторы исследовали влияние толщины слоя пены и расстояния между трубками на теплогидравлические свойства теплообменника. В результате исследований авторы выяснили, что увеличение толщины слоя металлической пены способствует лишь небольшому повышению коэффициента теплоотдачи, при этом резко возрастают потери давления. В связи с этим наибольшую эффективность показали трубы, обернутые металлической пеной толщиной 4 мм. Уменьшение расстояния между трубами приводит к повышению эффективности теплообменника. Для сравнения, авторы провели аналогичные исследования на теплообменнике с трубами, имеющими спиральное оребрение. Сравнительный анализ показал, что теплообменник с пеноалюминием толщиной 4 мм показал наибольшие значения критерия оценки эффективности (РЕС). При низких скоростях потока воздуха теплообменник с металлической пеной толщиной 6-8 мм показал значения РЕС на уровне ребристого теплообменника, при высоких скоростях потока воздуха (2-7 м/с) теплообменник с металлической пеной работает намного эффективнее, чем ребристый. Увеличение толщины слоя пены приводит к росту перепада давления, в то время как скорость теплопередачи в теплообменнике с металлическим ВПЯМом преимущественно зависит от пористости, размеров ячейки и теплопроводности металла. Это означает, что существует оптимальное значение толщины слоя ВПЯМа, превышение которого сопровождается большим ростом перепада давления при незначительном увеличении скорости теплопередачи [53]. К подобному выводу пришли Odabaee и др. [54]. Авторы отметили, что при оптимальной толщине слоя металлической пены обеспечивается высокая теплопередача, а перепад давления остается на уровне ребристой трубы. Поскольку слой металлической пены увеличивает не только скорость теплопередачи, но и в значительной степени перепад давления, Alvandifar и др. [55] предложили покрывать трубы пеной не полностью, а частично. Согласно результатам исследований, частичное покрытие труб позволяет достичь примерно той же скорости теплопередачи, что и в случае полностью покрытых труб, но перепад давления при этом снижается на 60%, а количество используемой пены уменьшается на 50%, что особенно важно, учитывая высокую стоимость пенометалла. Например, стоимость медной пены

размерами 10х100х100 мм составляет от 4,5 до 5 тыс. рублей.

Среди основных характеристик пористых теплообменников выделяют пористость, проницаемость, извилистость, удельную площадь поверхности, эффективную теплопроводность и морфологические параметры.

Пористость ε – отношение объема пор к общему объему пористой среды. Высокопористые ячеистые материалы с открытыми ячейками, как правило, имеют пористость более 0.90 [56]. Другим близким по существу параметром является относительная плотность материала, которая определяется как $\rho^*=1-\varepsilon$. Способ определения относительной плотности и пористости ВПЯМа состоит в том, чтобы измерить фактический объем ВПЯМа и его массу и сравнить с массой, которую имел бы твердотельный материал ВПЯМа при данном объеме.

Проницаемость – площадь поверхности ВПЯМа, которая открыта для потока жидкости. Проницаемость зависит как от структурных параметров материала, так и от свойств жидкости [57].

Извилистость определяется как отношение фактической длины пути через пористый материал к линейной длине пути. Извилистость ВПЯМа сильно влияет на турбулентность потока и теплообмен [58].

Удельная площадь поверхности s – это площадь поверхности ВПЯМа в пределах заданного объема. Удельная площадь поверхности напрямую определяет скорость теплопередачи в ВПЯМе и является одной из ключевых характеристик пористого теплообменника [59].

Эффективная теплопроводность λ_{eff} пористого материала определяется как сумма теплопроводности твердотельной матрицы, теплопроводности газа или жидкости, занимающих пространство пор, передачи тепла конвекцией и излучением (1) [60, 61]:

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_c + \lambda_r, \quad (1)$$

где λ_{eff} – эффективная теплопроводность пористого материала, λ_g – теплопроводность газа или жидкости внутри пор, λ_s – теплопроводность твердотельной матрицы, λ_c характеризует перенос тепла путем конвекции внутри пор, λ_r определяет лучистый теплообмен.

Морфологические параметры, такие как размер и форма ячейки, размер и форма поры, диаметр и форма стоек, размер и форма узлов также оказывают влияние на свойства ВПЯМа. Для наглядности на рисунке 14 показаны ячейка (cell), пора (pore), стойки (strut) и узлы (node) металлической пены с открытыми ячейками. Каждая ячейка состоит из нескольких стоек, которые соединяются в узлах. Стойки и узлы составляют твердую матрицу металлической пены.

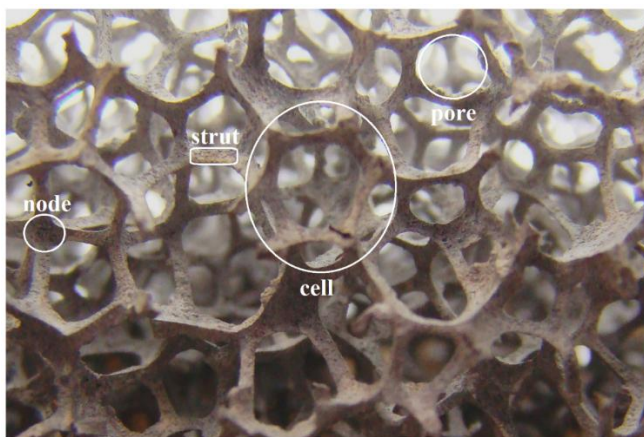


Рис. 14. Структурные параметры металлической пены [62] Fig. 14. Structural parameters of metal foam [62]

Металлические ВПЯМы активно применяют в качестве воздушных теплообменников в системах кондиционирования, для охлаждения микроэлектроники и в различных промышленных системах. Основными параметрами, по которым оценивают эффективность теплообменника, это скорость теплопередачи и перепад давления, которые зависят от природы материала, скорости воздушного потока и структурных параметров ВПЯМа (пористость, размер и форма ячеек, размер и форма стоек). Рассмотрим более подробно влияние этих характеристик на теплогидравлические

свойства теплообменника.

Одним из основных параметров, влияющих на тепловые и гидравлические свойства теплообменников, является пористость ВПЯМа [63-65]. При заданном размере ячейки увеличение пористости сопровождается уменьшением диаметра стоек, т.е., объемная доля матрицы пены снижается. Это приводит к уменьшению эффективной теплопроводности металлической пены, соответственно теплообмен между пеной и теплоносителем ухудшается. Это подтверждается результатами исследований, полученными Lu и др. [66] и представленными на рисунке 15. Yun и др. [67] экспериментально исследовали теплопередачу в решетчатых структурах с ячейками гранецентрированный куб с вертикальными стойками (FCCZ). Путем изменения толщины стоек авторы меняли пористость решетки от 0.5 до 0.9. Согласно результатам исследований, увеличение пористости ведет к снижению как коэффициента теплопередачи, так и перепада давления. Стоит отметить, что пористость в большей степени влияет на перепад давления, чем на теплопередачу: увеличение пористости с 0.5 до 0.9 способствовало снижению перепада давления более чем на 90%, коэффициент теплопередачи при этом уменьшился на 70%. Son и др. [68] провели исследования влияния пористости на эффективность теплообмена в решетчатых структурах. Согласно результатам исследований, повышение пористости с 0.75 до 0.98 способствует снижению коэффициента трения с 2.2 до 0.6, число Нуссельта при этом также снижается: с 80 до 50. Таким образом, пористость оказывает большее влияние на гидравлические характеристики решетчатой структуры, чем на тепловые.

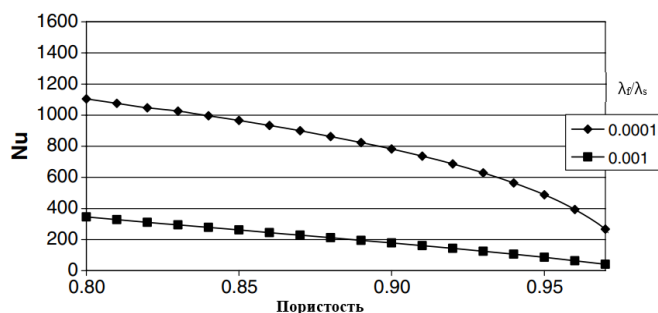


Рис. 15. Влияние пористости металлической пены на число Нуссельта, λ_f/λ_s – отношение коэффициентов теплопроводности твердого тела и жидкости [66]

Fig.15. Influence of metal foam porosity on the Nusselt number, λ_f/λ_s – fluid-solid thermal conductivity ratio [66]

Nu и др. [69] провели численные исследования зависимости коэффициента теплопередачи и значения перепада давления от пористости пенометаллического теплообменника. Исследования проводились для высоких скоростей потока газа: от 4 до 90 м/с. Пористость образцов пены составляла 0,9 и 0,95. Теплообменник с более высокой пористостью (0,95) показал более низкие значения перепада давления и коэффициента теплопередачи (рис. 16). На рисунке 15: S – sample, 10-32 – количество пор в 1 дюйме, 90-95 – пористость в процентах.

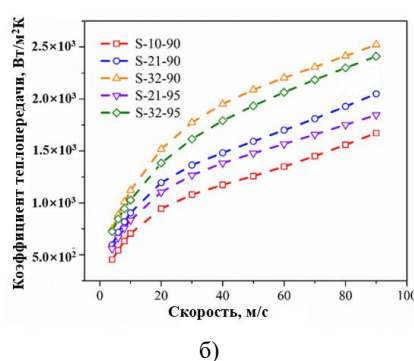
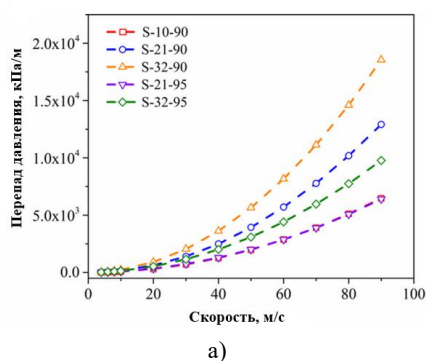


Рис. 16. Зависимость перепада давления (а) и коэффициента теплопередачи (б) от пористости образца и размера ячеек [69]

Fig. 16. Dependence of pressure drop (a) and heat transfer coefficient (b) on sample porosity and cell size [69]

Размер ячеек также является одним из ключевых параметров, влияющих на теплообмен и на гидравлику в ВПЯМах [70-73]. При фиксированной пористости

изменение размера ячейки ведет к изменению удельной площади поверхности. Например, удельная площадь поверхности никелевой пены с плотностью пор 10 PPI (pores per inch – количество пор на дюйм) и пористостью 0.9 составляет 925 м^{-1} ; удельная площадь поверхности той же пены с плотностью пор 40 PPI составляет уже 1680 м^{-1} [74]. Как известно, увеличение удельной площади поверхности способствует значительному улучшению теплообмена. Таким образом, изменение размера ячейки металлического ВПЯМа оказывает значительное влияние на его тепловые характеристики, что подтверждено многими научными исследованиями. Dixit и др. [75] экспериментально исследовали влияние размера ячейки на удельный перепад давления в медных пенах с плотностью пор 10, 20, и 30 PPI. Результаты исследований показали, что пена с 10 PPI обеспечила удельный перепад давления в 1-5 Па/м, в то время как пена с 30 PPI обеспечила удельный перепад давления 3-11 Па/м в диапазоне скоростей потока воздуха от 2,25 до 5,5 м/с. Таким образом, пены с маленькими ячейками обеспечивают больший перепад давления, соответственно требуют применения воздуходувок более высокой мощности. Nawaz и др. [76] провели экспериментальные исследования по определению тепловых и гидравлических характеристик алюминиевых пен. Образцы пен имели пористость от 0,96 до 0,99, размер ячеек составлял от 1,8 мм (40 PPI) до 4 мм (5 PPI). Результаты исследований показали, что при уменьшении размера ячеек удельный перепад давления увеличивается (рисунок 17 а). Например, при скорости воздушного потока 4 м/с, пена с ячейками 5 PPI создает удельный перепад давления, равный 3000 Па/м, пена с ячейками 40 PPI обеспечивает перепад давления уже в 15 000 Па/м. Согласно рисунку 17 (б), уменьшение размера ячейки также способствует и повышению коэффициента теплопередачи. При скорости потока воздуха 3 м/с пена с ячейками 5 PPI обеспечивает значение коэффициента теплопередачи $200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, пена с ячейками 40 PPI – $350 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, то есть в 1,75 раз выше. Таким образом, уменьшение размера ячейки с 40 до 5 PPI приводит к повышению удельного перепада давления в 5 раз, а коэффициент теплопередачи увеличивается лишь в 1,75 раз. Carpenter и др. [77] провели исследования теплообмена и гидродинамики в металлических пенах с градиентом размера ячеек. Авторы выяснили, что градиентные металлические пены, размер ячеек которых изменяется с 40 до 10 PPI в направлении потока имеют лучшие теплогидравлические характеристики, чем пены с однородной структурой и ячейками 40 PPI, но уступают пенам с ячейками 10 PPI. Авторы также пришли к выводу, что целесообразнее применять пены, размер ячеек которых увеличивается в направлении потока, так как в этом случае достигается высокий коэффициент теплопередачи (до $300 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$) при сохранении небольшой мощности прокачки.

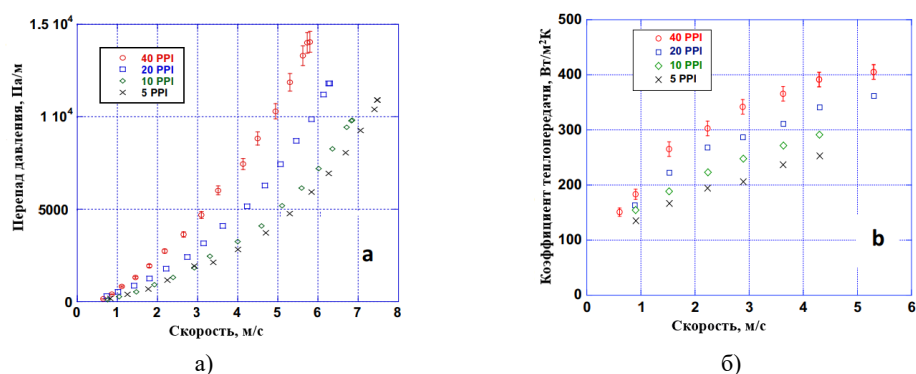


Рис. 17. Влияние размера ячейки алюминиевой пены на: а) удельный перепад давления; б) коэффициент теплопередачи [76]

Fig. 17. The influence of the cell size of aluminum foam on: a) specific pressure drop; b) heat transfer coefficient [76]

Увеличения площади поверхности теплообменника можно добиться и путем изменения формы элементарной ячейки. Контроль формы ячеек возможен для ВПЯМов с периодической структурой (решетки и соты), в то время как производить пены с заданной формой ячеек довольно проблематично. Ячейки простой формы, например, кубической, обеспечивают меньшую эффективность теплопередачи и меньший перепад давления. Ячейки более сложной формы, например, октета, имеют большую площадь поверхности и вместе с тем обеспечивают более интенсивный теплообмен и больший перепад давления. Исследованию влияния геометрии ячеек на теплообмен и гидродинамику в пористых теплообменниках посвящены работы многих ученых. Tian и др. [78] исследовали

структуры с ячейками, имеющими в поперечном сечении форму квадрата или ромба. Результаты исследований показали, что при идентичных значениях пористости, толщины стоек и размера ячейки, решетки с ячейками в форме ромба имеют на 40% большую удельную площадь поверхности, чем решетки с квадратными ячейками. Большая площадь поверхности объясняет и более высокие значения числа Нуссельта для решетки с ромбовидными ячейками. Li и др. [79] сравнили коэффициенты теплопередачи и трения в пустых металлических каналах и частично (50-75%) заполненных металлической пеной. Авторы исследовали влияние доли заполнения и размера ячеек пены на теплообмен и гидродинамику. Результаты исследований показали, что заполнение канала металлической пеной позволяет значительно повысить коэффициент теплопередачи со 100 до 250 Вт/м²К для случая 50%-го заполнения канала пеной с 40 PPI. Уменьшение размера ячеек способствует повышению как коэффициента теплопередачи, так и коэффициента трения. Интересно отметить, что увеличение доли заполнения канала металлической пеной с 50 до 75% приводит к повышению коэффициентов теплопередачи и трения примерно в 2 раза. Это объясняет тот факт, что канал с 75% наполнением металлической пены показал более высокую эффективность (значение PEC составило более 2,5). Liang и др. [80] экспериментально исследовали характеристики теплопередачи в решетчатых структурах различной геометрии: решетка Кагомэ, объемноцентрированная кубическая решетка, гранецентрированная кубическая решетка, решетка X-типа и структура со штифтовыми ребрами. Решетчатые структуры авторы создавали методом селективного лазерного плавления. Согласно результатам исследований, лучшие показатели по теплопередаче имеет решетка X-типа, а структура со штифтовыми ребрами имеет преимущества с точки зрения перепада давления. Kang и др. [81] провели исследования теплообмена в решетчатых структурах различных геометрий: октет, v-октет и октаэдр. Размеры ячеек и значение пористости задавались одинаковыми для всех исследованных структур. Авторы выяснили, что по сравнению с гладким каналом, структуры октет, v-октет и октаэдр обеспечивают в 2,96, 3,05 и 2,78 раз более высокую теплоотдачу. Yan и др. [82] исследовали влияние формы и ориентации ячеек решетчатых структур на теплообмен и перепад давления. Авторы исследовали такие структуры, как металлические пены с открытыми ячейками, металлические соты с открытыми ячейками, решетка Кагомэ, пирамидальная решетка, решетка X-типа (рис. 18) и т.д. В последнем случае авторы меняли также ориентацию решетки в пространстве (на рисунке 18: OA и OB). Результаты исследований показали, что решетка X-типа с ориентацией OB (рис. 18) имеет высокую площадь поверхности, благодаря чему обеспечивает лучшую теплопередачу, чем прочие структуры. Более того, решетка X-типа с ориентацией OB показала и самый низкий перепад давления, что делает этот тип структуры наиболее эффективным среди исследованных геометрий решеток.

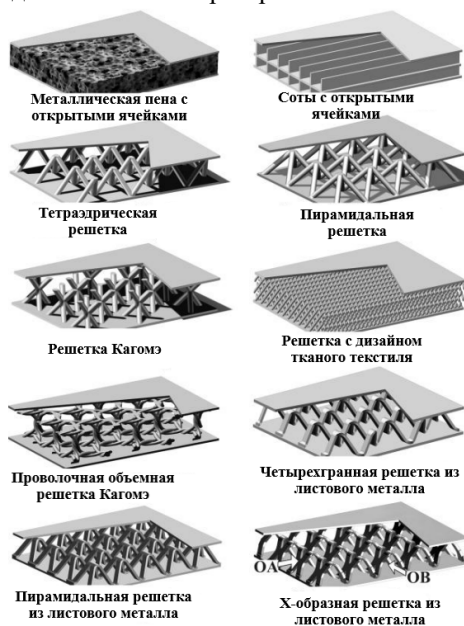


Рис. 18. Модели пористых структур, исследованных в работе [81]

Fig.18. Models of porous structures studied in [81]

Похожее исследование провели Bai и др. [83], в котором численно изучили

теплообмен в решетчатых структурах различной геометрии (Кагомэ, вертикальные штифтовые ребра, пирамидальные решетки, четырехгранные решетки, решетка с наклонными штифтами) и в металлической пене. Результаты расчетов авторы сравнили с результатами для пустого воздушного канала, без интенсификатора (рис. 19, а). Согласно проведенным расчетам, наибольший коэффициент теплопередачи соответствует структуре с четырехгранными решетками и составил $\sim 630 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, в то время как коэффициент теплопередачи пустого канала составил $\sim 90 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при скорости течения газа 11 м/с. Самые высокие показатели перепада давления (до 2300 Па) соответствуют металлической пене (рисунок 19, б). Оценка эффективности теплопередачи при равной мощности накачки показала, что наибольшую эффективность обеспечивает структура с четырехгранными решетками.

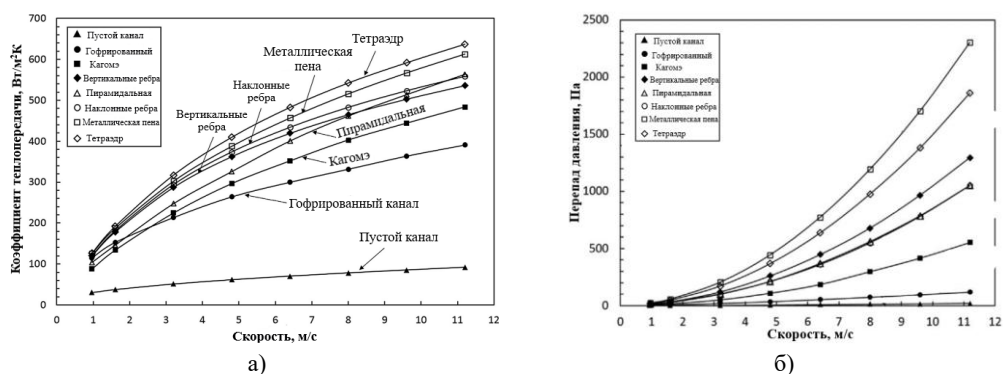


Рис. 19. Коэффициент теплопередачи (а) и падение давления (б) в пористых структурах различных геометрий в зависимости от скорости потока воздуха [83].

pressure drop (b) in porous structures of various geometries depending on the air flow rate [83].

Fig. 19. Heat transfer coefficient (a) and

Almutairi и др. [84] численно и экспериментально исследовали влияние длины ребра сотового теплообменника на характеристики теплопередачи и выяснили, что увеличение длины ребра способствует значительному улучшению теплопередачи. Wang и др. [85] провели численные исследования влияния формы ячеек металлических сотовых структур и пористости на значение эффективной теплопроводности. Согласно результатам исследований, увеличение пористости способствует снижению эффективной теплопроводности ВПЯМа. Среди исследованных форм ячеек (квадратные, ромбовидные, треугольные, Кагомэ и гофрированные) наибольшее значение теплопроводности показала структура с ромбовидными ячейками, наименьшие значения – гофрированная структура.

Другими известными на сегодняшний день параметрами, влияющими на свойства высокопористых ячеистых теплообменников, являются размер и форма стоек. Как отмечалось ранее, путем изменения размеров стоек можно контролировать пористость ВПЯМа и размер ячейки. Однако изменение формы стойки в поперечном сечении также оказывает влияние на теплогидравлические характеристики, что подтверждается исследованиями ряда авторов [86]. Liang и др. [87] провели численные и экспериментальные исследования теплообмена в решетчатых структурах, имеющих форму гранецентрированной кубической решетки. Стойки решетки имели различные геометрии: круг, эллипс и прямоугольник, а сами структуры имели равные значения пористости и площади поверхности. Авторы пришли к выводу о том, что структуры со стойками в форме эллипса обеспечивают наибольшее значение числа Нуссельта, однако этой же структуре соответствует самый высокий коэффициент трения (от 0,25 до 0,45). Решетки с круглыми стойками, наоборот, показали наименьшие значения числа Нуссельта и коэффициента трения. Несмотря на это, именно решетка с круглыми стойками продемонстрировала самую высокую общую эффективность теплопередачи благодаря наименьшему перепаду давления. Bianchi и др. [88] исследовали теплообмен в открытой ячеистой структуре с различными диаметрами и геометриями стоек (круг/треугольник). Согласно результатам параметрических расчетов, увеличение диаметра стоек в целом приводит к повышению эффективной теплопроводности ВПЯМа. При этом в случае кубической ячейки наибольшее значение теплопроводности достигается для стоек круглого сечения, в случае же ячейки Кельвина высокие значения

теплопроводности обеспечивают стойки квадратного сечения. Sarabhai и др. [89] провели исследования влияния геометрии ячейки и толщины стойки на коэффициент теплопередачи решетчатой структуры. Результаты представлены на рисунке 20 для трех различных режимов течения. Согласно представленным результатам, при ламинарном течении ($Re=1800$, рисунок 20 а) увеличение толщины стоек с 1 до 2 мм способствует снижению коэффициента теплопередачи в большинстве исследованных геометрий. В случае турбулентного режима ($Re=30000$, рисунок 20 б) изменение толщины стоек не оказывает значительного влияния на коэффициент теплопередачи. В режиме сильной турбулентности ($Re=292000$, рисунок 20 в) увеличение толщины стоек приводит к повышению коэффициента теплопередачи во всех случаях, кроме геометрии примитив.

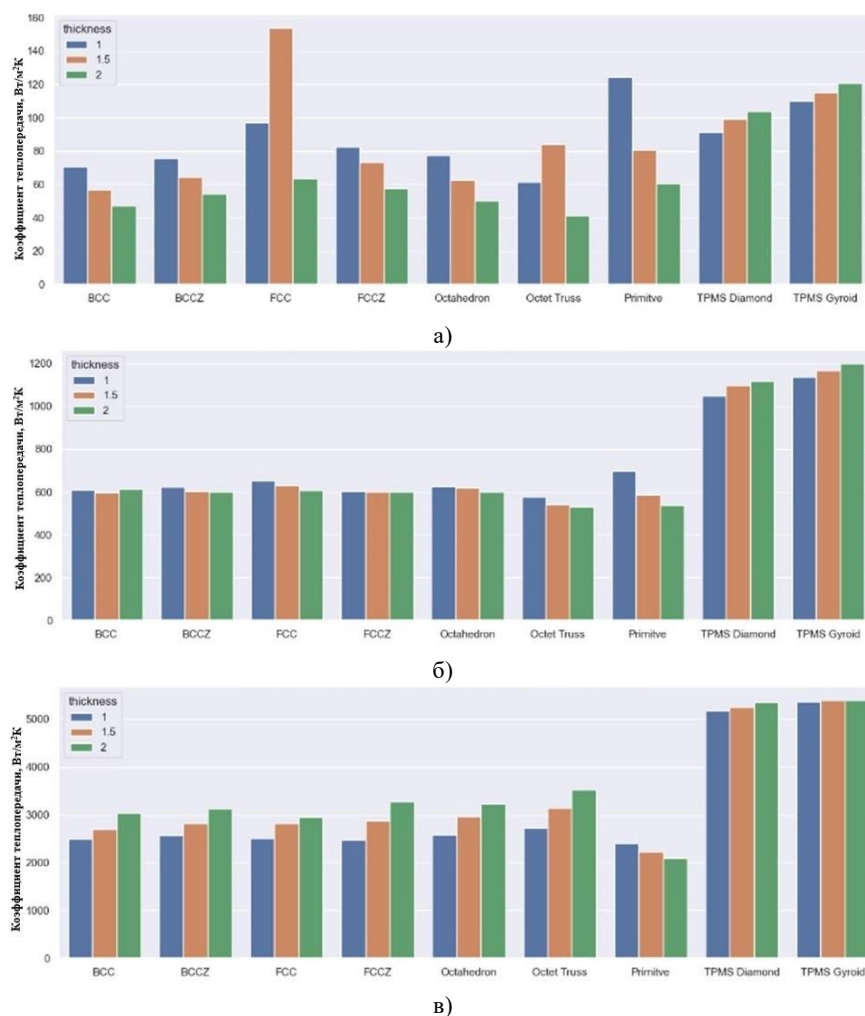


Рис. 20. Коэффициент теплопередачи для различных геометрий решетчатых структур, толщин стоек и чисел Рейнольдса: а) ламинарное течение; б) турбулентное течение; в) режим высокой турбулентности [89].

Fig. 20. Heat transfer coefficient for various geometries of lattice structures, strand thicknesses and Reynolds numbers: a) laminar flow; b) turbulent flow; c) high turbulence regime [89].

Так как методы производства металлических пен подразумевают получение пен с полыми стойками, Моон и др. [90] исследовали изменение характеристик теплопередачи в случае полых стоек в сравнении со сплошными стойками. Авторы выяснили, что при прочих фиксированных характеристиках металлические пены с полыми стойками обеспечивают на 40% меньшее число Нуссельта, чем пены со сплошными стойками.

В зависимости от природы материала ВПЯМы нашли различные применения в теплообменниках. Металлические ВПЯМы обладают эффективной высокой теплопроводностью и нашли применение в системах охлаждения в микроэлектронике, в качестве интенсификаторов теплообмена в кожухотрубных теплообменниках и т.д. Керамические ВПЯМы способны выдерживать высокие температуры до несколько сотен градусов Цельсия, и нашли применение в качестве регенеративных теплообменников в

высокотемпературных приложениях, например, при регенерации тепла отходящих газов.

Одним из основных критериев выбора материала ВПЯМа является теплопроводность. Очевидно, что ВПЯМ должен обладать высокой теплопроводностью. Второй критерий – стоимость материала. Производство ВПЯМа подразумевает высокие затраты, соответственно использование недорогого материала наиболее целесообразно. Помимо вышеперечисленных критериев, важными также являются такие параметры, как плотность материала, прочность на сжатие, прочность на изгиб. В таблице 1 представлены характеристики основных материалов, из которых изготавливаются ВПЯМы для теплотехнических приложений.

Таблица 1.

Основные характеристики пористых теплообменников						
Структура ВПЯМ	Материал	Плотность, кг/м ³	PPI / размер поры, мм	Пористость, %	Эффективная теплопроводность, Вт/мК	Ссылка
Пена	Алюминий	250	0,75-2,5 мм	–	–	[91]
Пена	Алюминий	156-227	10-30 PPI	91,6-94,2	1,34-1,54	[92]
Пена	Медь	272-992	5-25 PPI	88,9-96,9		[93]
	Никель	180-835	5-25 PPI	90,6-98,0		
Пена	FeCrAl	–	0,3-2,4 мм	85-90	0,32-0,41	[94]
Пена	Нерж. сталь	1099	20-40 PPI	86	–	[95]
Решетка	Нерж. сталь	–	0,05-0,123 мм	53,5-85,7	0,148-0,376	[96]
	Оксид алюминия	–	10-45 PPI	75-85	2,7-3,37	
Пена	Муллит	–	10-45 PPI	75-85	0,358-0,660	[97]
	OBSiC	–	10-45 PPI	75-85	1,086-2,113	

Zhao и др. [98] экспериментально исследовали свойства пен из FeCrAlY и меди. Авторы обратили внимание на то, что теплопередача в медных пенах более чувствительна к размеру ячеек, чем к плотности, а для пен FeCrAlY наблюдалась обратная картина. Обе пены показали более интенсивную теплопередачу в случае высокой плотности и малого размера ячеек пены.

Wen и др. [99] исследовали влияние материала сотового теплообменника и формы ячеек на скорость теплопередачи и перепад давления. Авторы исследовали металлические сотовые конструкции из нержавеющей стали и меди со следующими формами ячеек: квадрат, ромб, трапеция и шестиугольник. Результаты исследований показали, что перепад давления зависит в большей степени от формы ячеек и удельной площади поверхности, в то время как скорость теплопередачи коррелирует не только с морфологическими свойствами, но также с теплопроводностью материала. Сотовые ВПЯМы из меди показали в целом более высокую скорость теплопередачи, чем ВПЯМы из нержавеющей стали. Структуры с ромбовидными ячейками показали высокие значения перепада давления и скорости теплопередачи.

Сферы применения (Applications)

Металлическая пена с открытыми ячейками является хорошим интенсификатором теплообмена, потому что применяется в одно- и двухтрубных теплообменниках. Существуют разные конфигурации трубных теплообменников с металлической пеной: заполнение металлической пеной межтрубного пространства; заполнение металлической пеной внутритрубного пространства; обмотка трубы слоем металлической пены (рис. 21) [100].

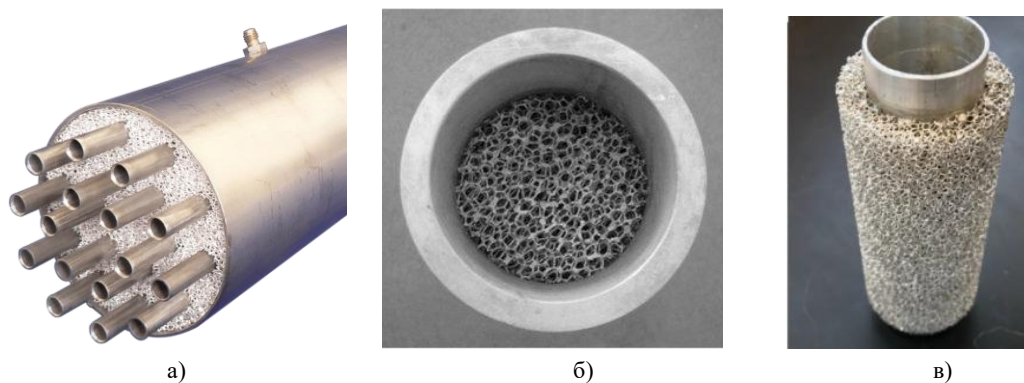


Рис. 21. Конфигурации трубных теплообменников с металлической пеной: (а) заполнение металлической пеной межтрубного пространства; (б) заполнение металлической пеной внутритрубного пространства [101]; (в) обмотка трубы слоем металлической пены [102].

Fig. 21. Configurations of tube heat exchangers with metal foam: (a) filling the inter-tube space with metal foam; (b) filling the intra-pipe space with metal foam [101]; (c) wrapping the pipe with a layer of metal foam [102].

В научных публикациях, посвященных трубным теплообменникам с металлической пеной, исследуется влияние морфологических параметров пены, высоты слоя пены, её расположение и компоновка на теплогидравлические свойства трубных теплообменников.

Zhao и др. [103] исследовали теплопередачу в теплообменнике типа «труба в трубе» и выяснили, что для повышения скорости теплопередачи следует применять пену, имеющую высокую плотность пор и небольшую пористость. Однако такая конфигурация приведет к значительному увеличению перепада давления.

Arasteh и др. [104] исследовали теплообмен в двухтрубном теплообменнике типа труба в трубе, заполненном вставками из металлической пены. Авторы использовали различные схемы распределения фиксированного объема металлической пены и исследовали теплоотдачу и перепад давления. В результате авторы выяснили, что разделение металлической пены на небольшие вставки не оказывает значительного влияния на перепад давления, так как объем пены остается фиксированным. В случае, когда пенометаллические вставки обеих труб расположены в одной вертикальной плоскости, достигаются более высокие значения теплоотдачи. Также авторы выяснили, что пены с меньшей проницаемостью показали более высокие значения показателя эффективности.

На теплообмен в трубном теплообменнике с металлической пеной внутри во многом влияют морфологические параметры пены. Пены с ячейками меньшего размера обеспечивают более высокий коэффициент теплоотдачи за счет большой площади поверхности [105]. Однако пенометаллы с маленькими ячейками создают большое сопротивление потоку, из-за чего появляется необходимость в увеличении мощности нагнетателя для прокачки теплоносителя [106-115].

Alhusseney и др. [116] предложили конструкцию двухтрубного теплообменника типа «труба в трубе», в котором для интенсификации теплообмена как во внутренней, так и во внешней трубе добавили направляющие вращающиеся лопасти из пенометалла. Авторы оценили влияние конфигурации лопастей и геометрических характеристик пены на теплообмен и гидравлику. Результаты исследований показали, что увеличение пористости пены и частоты вращения лопастей способствует повышению энергетической эффективности теплообменника.

Namzah и др. [117] провели экспериментальные исследования теплообмена в двухтрубном водо-воздушном теплообменнике типа «труба в трубе». Для интенсификации теплообмена авторы добавили в конструкцию ребра из металлической пены 40 PPI, установленные под углом 30°. Авторы сравнили характеристики теплообмена между двумя случаями с ребрами из металлической пены и без них, а также между режимами параллельного потока и противотока. Согласно результатам исследований, наибольшие значения числа Нуссельта и среднего коэффициента теплоотдачи достигаются в конструкции с ребрами из пенометалла в режиме противотока. Авторы работы [118] заявляют о повышении эффективности двухтрубного теплообменника на 37% в случае противотока в сравнении с режимом параллельного

потока. Также авторы исследовали различные конфигурации теплообменника с градиентной металлической пеной и выяснили, что максимальные значения эффективности и производительности достигаются в случае, когда размер ячеек металлической пены, расположенной во внутренней трубе, уменьшается по радиусу от центра к краю, в то время как размер ячеек металлической пены, расположенной во внешней трубе, увеличивается от центра к краю.

Chen и др. [119] путем численного моделирования сравнили теплогидравлические характеристики кожухотрубных теплообменников с цельными металлическими перегородками и с перегородками из металлической пены. Авторы выяснили, что теплообменник с перегородками из металлической пены обеспечивает характеристики теплопередачи близкие к теплообменнику с цельными перегородками. Однако пористая структура пенометалла обеспечивает более низкие значения перепада давления и эффективно уменьшает застойные зоны. Толщина перегородок также влияет на теплогидравлические свойства, в основном, за счет увеличения полезной площади поверхности перегородок. Металлические перегородки из металлической пены обеспечивают на 230–425% больший коэффициент полезности площади в сравнении с цельными металлическими перегородками.

В микроэлектронике и компьютерной технике активно применяются системы воздушного и водяного охлаждения, главными элементами которых являются радиаторы – пластинчатые теплообменники. Рост мощностей устройств микроэлектроники и микросхем требует повышения эффективности отвода тепла для обеспечения их безопасной, быстрой и надежной работы. Повышение эффективности отвода тепла осуществляется, в основном, путем увеличения площади поверхности теплообменника. В случае с пластинчатыми теплообменниками, увеличение площади поверхности сопровождается увеличением размеров и веса теплообменника, т.е. повышением его металлоемкости и стоимости. В последнее время внимание исследователей все больше обращено к высокопористым ячеистым металлам для использования в качестве теплообменников в системах охлаждения электронных устройств [120, 121]. Для увеличения площади поверхности металлической пены необходимо либо снизить ее пористость, либо увеличить плотность пор, при этом габаритные размеры и вес теплообменника изменятся незначительно. Согласно работе [122], увеличение плотности пор алюминиевой пены с 10 до 40 PPI способствовало увеличению отношения площади поверхности к объему с 790 до 2740 м⁻¹, то есть более чем в 3 раза, габаритные размеры и пористость при этом остались неизменными.

Dai и др. [123] оценили массы и объемы теплообменников различной конструкции, обеспечивающих аналогичные теплогидравлические характеристики. Авторы исследовали пластинчатый теплообменник и теплообменник с металлической пеной. Результаты исследований показали, что для обеспечения заданной скорости теплопередачи при заданной мощности вентилятора теплообменник с металлической пеной может быть значительно меньше по размерам и массе, при этом сохраняется возможность изменять площадь поверхности теплообменника в широком диапазоне.

Samudre и др. [124] провели исследования по улучшению тепловых характеристик радиаторов из металлической пены. Авторы заявляют о нецелесообразности крепления металлической пены к подложке с помощью эпоксидных клеев ввиду межфазного контактного теплового сопротивления. Для снижения контактного сопротивления авторы предложили соединять металлическую подложку и пенометалл путем термического сплавления. Результаты исследований показали, что метод соединения плавлением позволяет снизить тепловое сопротивление в 19 раз по сравнению с методом соединения с помощью эпоксидного клея. Число Нуссельта при этом возрастает на 30%, а скорость теплопередачи увеличивается в 2 раза.

Rasam и др. [125] провели численное исследование теплообмена и гидродинамики в пенометаллическом теплообменнике системы водяного охлаждения. Авторы выяснили, что структурные параметры пены влияют как на температурный профиль, так и на градиент скорости: увеличение плотности пор при одновременном уменьшении пористости приводит к повышению градиента скорости у стенок и снижению скорости в центральной части. Снижение пористости приводит к снижению термического сопротивления, а температурный профиль становится ближе к температуре горячей стенки. Системы водяного охлаждения в целом обеспечивают более эффективное охлаждение, чем воздушные системы, однако требуют более высокой мощности на прокачку [126]. Более того, система воздушного охлаждения должна быть абсолютно герметичной, в ином случае попадание жидкости в электронное устройство может

привести к его сбою или выходу из строя.

Конфигурация теплообменника и расположение пористой среды оказывает влияние на эффективность охлаждения. В работе [127] авторы смоделировали микроканальный теплообменник для отвода тепла от центрального процессора. Теплообменник имел три различные конфигурации: пустотелый радиатор, радиатор с расположенными у внутренних стенок слоями металлической пены и радиатор со вставкой из металлической пены, занимающей всё внутреннее пространство каналов. Согласно результатам параметрических расчетов, модель радиатора с пористой вставкой обеспечивает наилучшее охлаждение: температура в корпусе радиатора с пористой вставкой на 8-9 °С ниже, чем в пустотелом радиаторе без пористой среды.

В микроканальных теплообменниках для интенсификации теплообмена применяют вставки из металлической пены. Металлическая пена создает большое сопротивление потоку, то есть перепад давления, что приводит к повышению мощности, требуемой для прокачки теплоносителя. Путем частичного заполнения каналов металлической пеной можно значительно снизить перепад давления, сохраняя высокую скорость теплопередачи.

Другим решением в снижении перепада давления является блочное расположение вставок из металлической пены (рис. 22). Chen и др. [128] разместили в канале четыре блока из металлической пены, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. В такой конфигурации основными параметрами, помимо морфологии пены, являются высота блоков и их проницаемость. В канале с большой высотой блоков металлической пены и высокой проницаемостью теплообмен будет происходить более интенсивно, но и перепад давления также будет высоким.

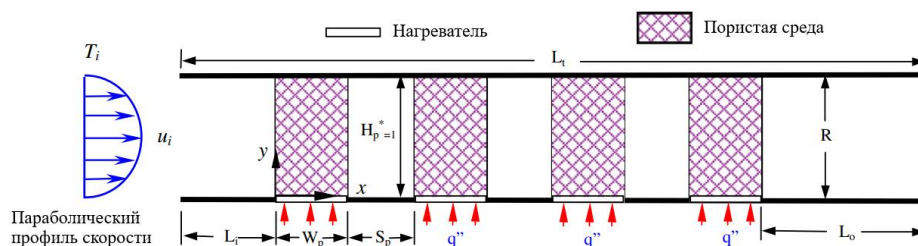


Рис. 22. Схема блочного расположения металлической пены в канале [128].

Fig.22. Scheme of block arrangement of metal foam in the channel [128].

Заключение (Conclusions)

В статье представлен обзор современных высокопористых ячеистых материалов, применяемых в качестве теплообменников для воды и воздуха. В обзоре представлены ВПЯМы с различной структурой: стохастической (пены) и упорядоченной (соты и решетки). Исследованы основные методы производства ВПЯМов со стохастической структурой, проанализированы возможности применения аддитивных технологий для производства ВПЯМов с упорядоченной структурой. Обсуждаются основные свойства ВПЯМов: пористость, проницаемость, извилистость, удельная площадь поверхности, эффективная теплопроводность. Проведен анализ влияния структурных параметров ВПЯМа на теплообмен и гидродинамику. Выявлено, что для интенсификации теплообмена следует уменьшить пористость и размер ячейки ВПЯМа, а также увеличить диаметр стоек. Необходимо отметить, что такие изменения структуры влекут за собой и повышение перепада давления. В случае, когда основной задачей является снижение перепада давления, следует увеличить пористость и размер ячеек ВПЯМа.

Литература

1. Osman S. et al. The influence of high-porosity nickel foam on the transition flow regime for heat transfer and pressure drop characteristics in a rectangular channel //Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022. С. 1-10.
2. Dubil K. et al. Development of a generalized thermal resistance model for the calculation of effective thermal conductivities in periodic open cellular structures (POCS) //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Т. 183. С. 122083.
3. Liu P. S., Qing H. B., Hou H. L. Primary investigation on sound absorption performance of highly porous titanium foams //Materials & Design. 2015. Т. 85. С. 275-281.

4. Liu J. et al. Highly porous SiC cellular ceramics for efficient high-temperature PM removal //Ceramics International. 2020. T. 46. №. 10. C. 15249-15254.
5. Liu J. et al. Fabrication of porous metal by selective laser melting as catalyst support for hydrogen production microreactor //International Journal of Hydrogen Energy. 2020. T. 45. №. 1. C. 10-22.
6. Sayah S., Hamouda A. Efficient method for estimation of smooth and nonsmooth fuel cost curves for thermal power plants //International Transactions on Electrical Energy Systems. 2018. T. 28. №. 3. C. e2498.
7. Singh G. K. et al. Atmospheric emissions from thermal (coal-fired) power plants and associated environmental impacts //Pollutants from Energy Sources: Characterization and Control. 2019. C. 53-72.
8. Babu R. et al. A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat exchanger //Materials Today: Proceedings. 2022. T. 54. C. 428-436.
9. Sharma V. R., N M., MS M. Enhanced thermal performance of tubular heat exchanger using triangular wing vortex generator //Cogent Engineering. 2022. T. 9. №. 1. C. 2050021.
10. Promvong P. et al. Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators //Energy Conversion and Management. 2010. T. 51. №. 6. C. 1242-1249.
11. Tang L. H. et al. A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel //Applied Thermal Engineering. 2016. T. 104. C. 74-84.
12. Park K. M., Min K. S., Roh Y. S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements //Materials. 2021. T. 15. №. 1. C. 97.
13. Banhart J. Light-metal foams—history of innovation and technological challenges //Advanced Engineering Materials. 2013. T. 15. №. 3. C. 82-111.
14. Rajak D. K. et al. Manufacturing methods of metal foams //An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications. 2020. C. 39-52.
15. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams //Jom. 2000. T. 52. C. 22-27.
16. Praveen Kumar T. N., Venkateswaran S., Seetharamu S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al–Si Alloy Closed Cell Foam //Transactions of the Indian Institute of Metals. 2015. T. 68. C. 109-112.
17. Byakova A. et al. Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability //Procedia Materials Science. 2014. T. 4. C. 9-14.
18. Miyoshi T. et al. ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications //Advanced engineering materials. 2000. T. 2. №. 4. C. 179-183.
19. Noack M. A. et al. Aluminium foam with sub-mm sized cells produced using a rotating gas injector //Materials Science and Engineering: B. 2021. T. 273. C. 115427.
20. Wang N. e al. Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams //Materials Characterization. 2019. T. 147. C. 11-20.
21. Heim K., García-Moreno F., Banhart J. Particle size and fraction required to stabilise aluminium alloy foams created by gas injection //Scripta Materialia. 2018. T. 153. C. 54-58.
22. Banhart J. Metallic foams: challenges and opportunities //Eurofoam. 2000. T. 2000. C. 13-20.
23. Yu C. J. et al. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications //Materials Research Innovations. 1998. T. 2. №. 3. C. 181-188.
24. Yang D. et al. Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties //Journal of Manufacturing Processes. 2016. T. 22. C. 290-296.
25. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams //MRS Online Proceedings Library (OPL). 1998. T. 521. C. 121.
26. Ashby M. F. et al. Metal foams: a design guide. Elsevier, 2000.
27. Gergely V., Clyne B. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors //Advanced Engineering Materials. 2000. T. 2. №. 4. C. 175-178.
28. Goodall R., Mortensen A. Porous metals //Physical metallurgy. Elsevier, 2014. C. 2399-2595.
29. Nakajima H. Fabrication, mechanical and physical properties, and its application of lotus-type porous metals //Materials Transactions. 2019. T. 60. №. 12. C. 2481-2489.
30. Wang X. F. et al. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method //Materials Science and Technology. 2011. T. 27. №. 4. C. 800-804.
31. Kapłon H. et al. Development of open-porosity magnesium foam produced by investment casting //Journal of Magnesium and Alloys. 2022. T. 10. №. 7. C. 1941-1956.
32. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams //Progress in materials science. 2001. T. 46. №. 6. C. 559-632.
33. Zahoor A., Mourad A. H. I., Khan S. H. Production of open cell Nickel-based metal foam from polyurethane template //2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE, 2022. C. 1-6.
34. Paserin V. et al. CVD technique for Inco nickel foam production //Advanced engineering materials. 2004. T. 6. №. 6. C. 454-459.

35. Báez-Pimiento S., Hernández-Rojas M. E., Palomar-Pardavé M. E. Processing and characterization of open-cell aluminum foams obtained through infiltration processes //Procedia Materials Science. 2015. T. 9. C. 54-61.
36. Kreigh J. R., Keith G. J. Metal-aggregate product : пат. 3055763 США. 1962.
37. Puga H. et al. Influence of particle diameter in mechanical performance of Al expanded clay syntactic foams //Composite Structures. 2018. T. 184. C. 698-703.
38. Zwissler M. Verfahren zur Herstellung metallischer Schwämme //German Patent, DE. T. 197. №. 25. C. 210.
39. Wan T. et al. Fabrication of high-porosity open-cell aluminum foam via high-temperature deformation of CaCl₂ space-holders //Materials Letters. 2021. T. 284. C. 129018.
40. Jha N. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route //Materials & Design. 2013. T. 47. C. 810-819.
41. Sazegaran H., Hojati M. Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams //International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2019. T. 26. №. 5. C. 588-596.
42. Ozan S., Bilhan S. Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminum metal foam, manufactured by powder metallurgy process //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008. T. 39. C. 257-260.
43. Yan C. et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting //International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012. T. 62. C. 32-38.
44. Alsalla H., Hao L., Smith C. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique //Materials Science and Engineering: A. 2016. T. 669. C. 1-6.
45. Al-Ketan O. et al. On mechanical properties of cellular steel solids with shell-like periodic architectures fabricated by selective laser sintering //Journal of Engineering Materials and Technology. 2019. T. 141. №. 2. C. 021009.
46. Mahjoob S., Vafai K. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. T. 51. №. 15-16. C. 3701-3711.
47. Chumpia A., Hooman K. Performance evaluation of single tubular aluminium foam heat exchangers //Applied Thermal Engineering. 2014. T. 66. №. 1-2. C. 266-273.
48. Chen K. et al. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam //Energy Reports. 2022. T. 8. C. 103-110.
49. De Schampheleire S. et al. Thermal hydraulic performance of 10 PPI aluminium foam as alternative for louvered fins in an HVAC heat exchanger //Applied Thermal Engineering. 2013. T. 51. №. 1-2. C. 371-382.
50. Seyf H. R., Layeghi M. Numerical analysis of convective heat transfer from an elliptic pin fin heat sink with and without metal foam insert. 2010.
51. Huisseune H. et al. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. T. 89. C. 1-9.
52. T'Joan C. et al. Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. T. 53. №. 15-16. C. 3262-3274.
53. Odabae M., Hooman K., Gurgenci H. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a cylinder in cross-flow //Transport in Porous Media. 2011. T. 86. C. 911-923.
54. Odabae M., Hooman K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank //Applied Thermal Engineering. 2012. T. 36. C. 456-463.
55. Alvandifar N., Saffar-Avval M., Amani E. Partially metal foam wrapped tube bundle as a novel generation of air cooled heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2018. T. 118. C. 171-181.
56. Paek J. W. et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials //International Journal of Thermophysics. 2000. T. 21. C. 453-464.
57. Xiao T. et al. An analytical fractal model for permeability in isotropic open-cell metal foam with surface roughness //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 126. C. 105473.
58. Diao K., Zhang L., Zhao Y. Measurement of tortuosity of porous Cu using a diffusion diaphragm cell //Measurement. 2017. T. 110. C. 335-338.
59. Liu P. S. A new method for calculating the specific surface area of porous metal foams //Philosophical magazine letters. 2010. T. 90. №. 6. C. 447-453.
60. Soloveva O. V. et al. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies //Processes. 2022. T. 10. №. 11. C. 2257.
61. Notario B. et al. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams //Polymer. 2015. T. 56. C. 57-67.

62. De Schampheleire S. et al. How to study thermal applications of open-cell metal foam: Experiments and computational fluid dynamics //Materials. 2016. T. 9. №. 2. C. 94.
63. Lai Z., Hu H., Ding G. Effect of porosity on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in hydrophobic metal foam under dehumidifying conditions //Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. T. 96. C. 90-100.
64. Soloveva O. et al. Mathematical modelling of heat transfer in open cell foam of different porosities //Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. – Cham : Springer International Publishing, 2019. C. 371-382.
65. Soloveva O. et al. Estimation of energy efficiency factor for models of porous automotive heat exchangers //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1081-1088.
66. Lu W., Zhao C. Y., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes //International journal of heat and mass transfer. 2006. T. 49. №. 15-16. C. 2751-2761.
67. Yun S. et al. Heat transfer and stress characteristics of additive manufactured FCCZ lattice channel using thermal fluid-structure interaction model //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 149. C. 119187.
68. Son K. N. et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 115. C. 619-629.
69. Hu C. et al. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications //Applied Thermal Engineering. 2020. T. 180. C. 115845.
70. Kaur I., Mahajan R. L., Singh P. Generalized correlation for effective thermal conductivity of high porosity architected materials and metal foams //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023. T. 200. C. 123512.
71. Tian J. et al. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels //International journal of heat and mass transfer. 2007. T. 50. №. 13-14. C. 2521-2536.
72. Lai X. et al. Analysis of heat transfer characteristics of a heat exchanger based on a lattice filling //Coatings. 2021. T. 11. №. 9. C. 1089.
73. Dixit T., Nithiarasu P., Kumar S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications //International Journal of Thermal Sciences. 2021. T. 159. C. 106607.
74. Li Y. et al. Pore-level determination of spectral reflection behaviors of high-porosity metal foam sheets //Infrared Physics & Technology. 2018. T. 89. C. 77-87.
75. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface //Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. T. 77. C. 28-37.
76. Nawaz K., Bock J., Jacobi A. M. Thermal-hydraulic performance of metal foam heat exchangers under dry operating conditions //Applied Thermal Engineering. 2017. T. 119. C. 222-232.
77. Carpenter K. P., da Silva A. K. A combined hydro-thermal characterization of high-porosity metal foam test sections with discrete pore-size gradients //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. T. 77. C. 770-776.
78. Tian J. et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. T. 47. №. 14-16. C. 3171-3186.
79. Li Y., Wang S., Zhao Y. Experimental study on heat transfer enhancement of gas tube partially filled with metal foam //Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. T. 97. C. 408-416.
80. Liang D. et al. Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by Selective Laser Melting //International Journal of Thermal Sciences. 2022. T. 172. C. 107312.
81. Kaur I., Singh P. Endwall heat transfer characteristics of octahedron family lattice-frame materials //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 127. C. 105522.
82. Yan H. et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core //Applied Thermal Engineering. 2017. T. 127. C. 1293-1304.
83. Bai X., Zheng Z., Nakayama A. Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures //International journal of heat and mass transfer. 2019. T. 143. C. 118525.
84. Almutairi M. M., Osman M., Tlili I. Thermal behavior of auxetic honeycomb structure: an experimental and modeling investigation //Journal of Energy Resources Technology. 2018. T. 140. №. 12. C. 122904.
85. Wang W. et al. Analytical design of effective thermal conductivity for fluid-saturated prismatic cellular metal honeycombs //Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2016. T. 6. №. 2. C. 69-75.
86. Kumar P., Topin F., Vicente J. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams //International Journal of Thermal Sciences. 2014. T. 81. C. 13-28.
87. Liang D. et al. Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. T. 153. C. 119579.

88. Bianchi E., Schwieger W., Freund H. Assessment of Periodic Open Cellular Structures for Enhanced Heat Conduction in Catalytic Fixed-Bed Reactors //Advanced Engineering Materials. 2016. T. 18. №. 4. C. 608-614.
89. Sarabhai S. et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures //Materials & Design. 2023. T. 227. C. 111787.
90. Moon C. et al. Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. T. 102. C. 911-918.
91. Jing L. et al. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores //Composites Part B: Engineering. 2011. T. 42. №. 1. C. 1-10.
92. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-cell aluminium foams //Materials & Design. 2017. T. 131. C. 252-264.
93. Xiao X., Zhang P., Li M. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage //International Journal of Thermal Sciences. 2014. T. 81. C. 94-105.
94. Wulf R. et al. Experimental and numerical determination of effective thermal conductivity of open cell FeCrAl-alloy metal foams //International journal of thermal sciences. 2014. T. 86. C. 95-103.
95. Poureslami P. et al. Pore-scale convection-conduction heat transfer and fluid flow in open-cell metal foams: A three-dimensional multiple-relaxation time lattice Boltzmann (MRT-LBM) solution //International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. T. 126. C. 105465.
96. Qu Z. G. et al. A theoretical octet-truss lattice unit cell model for effective thermal conductivity of consolidated porous materials saturated with fluid //Heat and Mass Transfer. 2012. T. 48. №. 8. C. 1385-1395.
97. Randrianalisoa J. et al. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Laguerre-Voronoi tessellation method //International Journal of Thermal Sciences. 2015. T. 98. C. 277-286.
98. Zhao C. Y. et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams //Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2004. T. 18. №. 3. C. 309-317.
99. Wen T. et al. Forced convection in metallic honeycomb structures //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. T. 49. №. 19-20. C. 3313-3324.
100. Yang X. et al. Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube //Applied Energy. 2019. T. 239. C. 142-156.
101. Bağcı Ö. et al. Investigation of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch //Heat and Mass Transfer. 2018. T. 54. C. 2343-2349.
102. Boules D., Sharqawy M. H., Ahmed W. H. Enhancement of heat transfer from a horizontal cylinder wrapped with whole and segmented layers of metal foam //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. T. 165. C. 120675.
103. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers //International journal of heat and mass transfer. 2006. T. 49. №. 15-16. C. 2762-2770.
104. Arasteh H., Salimpour M. R., Tavakoli M. R. Optimal distribution of metal foam inserts in a double-pipe heat exchanger //International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow. 2019. T. 29. №. 4. C. 1322-1342.
105. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes. 2009.
106. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Шакурова Р. З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. №. 1. С. 82-103.
107. Соловьев С. А., Соловьева О. В., Ахметова И. Г., Ваньков Ю. В., Шакурова Р. З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами //Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. №. 1. С. 86-98.
108. Соловьева О. В., Соловьев С. А., Талипова А. Р., Шакурова Р. З., Гилязов А. И. Исследование влияния пористости волокнистого материала на значение энергетической эффективности //Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №. 1 (53). С. 56-64.
109. 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.
110. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction //ChemEngineering. 2022. T. 6. №. 1. C. 11.

111. Soloveva O. V. et al. Study of heat transfer in models of FCC, BCC, SC and DEM porous structures with different porosities //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. T. 2373. №. 2. C. 022040.
112. Solovev S. A., Soloveva O. V., Gilmurahmanov B. Sh., Lamberov A. A. Numerical investigation of the ethylbenzene dehydrogenation reaction in a fixed bed reactor with catalyst granules of various sizes //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. T. 1399. №. 5. C. 055022.
113. Solovev S., Soloveva O. Numerical Simulation of the Operation of a Chemical Reactor with an Open Cell Foam Catalyst //XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021” Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2. Springer International Publishing, 2022. C. 23-32.
114. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1205-1210.
115. Solovev S., Soloveva O., Talipova A., Belousova, L., Sabirova, J. Study of the influence of the porosity of the fibrous material used in transport on the value of energy efficiency //Transportation Research Procedia. 2022. T. 63. C. 1252-1258.
116. Alhusseny A., Turan A., Nasser A. Rotating metal foam structures for performance enhancement of double-pipe heat exchangers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. T. 105. C. 124-139.
117. Hamzah J. A., Nima M. A. Experimental study of heat transfer enhancement in double-pipe heat exchanger integrated with metal foam fins //Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. T. 45. №. 7. C. 5153-5167.
118. Chen X. et al. Performance evaluation of a double-pipe heat exchanger with uniform and graded metal foams //Heat and Mass Transfer. 2020. T. 56. C. 291-302.
119. Chen T. et al. Performance evaluation of metal-foam baffle exhaust heat exchanger for waste heat recovery //Applied energy. 2020. T. 266. C. 114875.
120. Izadi A. et al. MHD enhanced nanofluid mediated heat transfer in porous metal for CPU cooling //Applied Thermal Engineering. 2020. T. 168. C. 114843.
121. Muduli S., Panigrahi U. Numerical simulation of thermal performance of porous metal heat sink for cooling the CPU //2022 International Electronics Symposium (IES). IEEE, 2022. C. 150-155.
122. Kim S. Y., Paek J. W., Kang B. H. Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air cooling //IEEE Transactions on components and packaging technologies. 2003. T. 26. №. 1. C. 262-267.
123. Dai Z. et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications //Heat Transfer Engineering. 2012. T. 33. №. 1. C. 21-30.
124. Samudre P., Kailas S. V. Thermal performance enhancement in open-pore metal foam and foam-fin heat sinks for electronics cooling //Applied Thermal Engineering. 2022. T. 205. C. 117885.
125. Rasam H. et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications //Energies. 2020. T. 13. №. 15. C. 3851.
126. Bayomy A. M., Saghir M. Z., Yousefi T. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: Experimental and numerical approach //International Journal of Thermal Sciences. 2016. T. 109. C. 182-200.
127. Wang J. et al. Simulation of hybrid nanofluid flow within a microchannel heat sink considering porous media analyzing CPU stability //Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. T. 208. C. 109734.
128. Chen C. C., Huang P. C., Hwang H. Y. Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. T. 58. №. 1-2. C. 356-373.

Авторы публикации

Соловьев Сергей Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, зав. каф. кафедрой «Информационные технологии и интеллектуальные системы» (ИТИС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Соловьева Ольга Викторовна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шакурова Розалина Зуфаровна – аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений» (ЭОС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Голубев Ярослав Павлович – инженер НИЛ «Разработка энергоэффективных

теплообменников» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Osman S. et al. The influence of high-porosity nickel foam on the transition flow regime for heat transfer and pressure drop characteristics in a rectangular channel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022; 1-10.
2. Dubil K., Wolf H., Wetzel T., Dietrich B. Development of a generalized thermal resistance model for the calculation of effective thermal conductivities in periodic open cellular structures (POCS). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022; 183: 122083.
3. Liu P. S., Qing H. B., Hou H. L. Primary investigation on sound absorption performance of highly porous titanium foams. *Materials & Design*. 2015; 85: 275-281.
4. Liu J. et al. Highly porous SiC cellular ceramics for efficient high-temperature PM removal. *Ceramics International*. 2020; 46 (10): 15249-15254.
5. Liu J. et al. Fabrication of porous metal by selective laser melting as catalyst support for hydrogen production microreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020; 45 (1): 10-22.
6. Sayah S., Hamouda A. Efficient method for estimation of smooth and nonsmooth fuel cost curves for thermal power plants. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2018; 28 (3): e2498.
7. Singh G. K. et al. Atmospheric emissions from thermal (coal-fired) power plants and associated environmental impacts. *Pollutants from Energy Sources: Characterization and Control*. 2019: 53-72.
8. Babu R. et al. A comprehensive review on compound heat transfer enhancement using passive techniques in a heat exchanger. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 54: 428-436.
9. Sharma V. R., N M., MS M. Enhanced thermal performance of tubular heat exchanger using triangular wing vortex generator. *Cogent Engineering*. 2022; 9 (1): 2050021.
10. Promvong P. et al. Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators. *Energy Conversion and Management*. 2010; 51(6): 1242-1249.
11. Tang L. H. et al. A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 104: 74-84.
12. Park K. M., Min K. S., Roh Y. S. Design optimization of lattice structures under compression: study of unit cell types and cell arrangements. *Materials*. 2021; 15 (1): 97.
13. Banhart J. Light-metal foams-history of innovation and technological challenges. *Advanced Engineering Materials*. 2013; 15 (3): 82-111.
14. Rajak D. K. et al. Manufacturing methods of metal foams. *An Insight Into Metal Based Foams: Processing, Properties and Applications*. 2020: 39-52.
15. Banhart J. Manufacturing routes for metallic foams. *Jom*. 2000; 52: 22-27.
16. Praveen Kumar T. N., Venkateswaran S., Seetharamu S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al-Si Alloy Closed Cell Foam. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015; 68: 109-112.
17. Byakova A. et al. Fabrication method for closed-cell aluminium foam with improved sound absorption ability. *Procedia Materials Science*. 2014; 4: 9-14.
18. Miyoshi T. et al. ALPORAS aluminum foam: production process, properties, and applications. *Advanced engineering materials*. 2000; 2 (4): 179-183.
19. Noack M. A. et al. Aluminium foam with sub-mm sized cells produced using a rotating gas injector. *Materials Science and Engineering: B*. 2021; 273: 115427.
20. Wang N. et al. Compressive performance and deformation mechanism of the dynamic gas injection aluminum foams. *Materials Characterization*. 2019; 147: 11-20.
21. Heim K., García-Moreno F., Banhart J. Particle size and fraction required to stabilise aluminium alloy foams created by gas injection. *Scripta Materialia*. 2018; 153: 54-58.
22. Banhart J. Metallic foams: challenges and opportunities. *Eurofoam*. 2000: 13-20.
23. Yu C. J. et al. Metal foaming by a powder metallurgy method: Production, properties and applications. *Materials Research Innovations*. 1998; 2 (3): 181-188.
24. Yang D. et al. Fabrication of Mg-Al alloy foam with close-cell structure by powder metallurgy approach and its mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016; 22: 290-296.
25. Banhart J., Baumeister J. Production methods for metallic foams. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*. 1998; 521: 121.
26. Ashby M. F. et al. Metal foams: a design guide. *Elsevier*, 2000.
27. Gergely V., Clyne B. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors. *Advanced Engineering Materials*. 2000; 2 (4): 175-178.
28. Goodall R., Mortensen A. Porous metals. Physical metallurgy. *Elsevier*. 2014: 2399-2595.
29. Nakajima H. Fabrication, mechanical and physical properties, and its application of lotus-type porous metals. *Materials Transactions*. 2019; 60 (12): 2481-2489.

30. Wang X. F. et al. Sound absorption of open celled aluminium foam fabricated by investment casting method. *Materials Science and Technology*. 2011; 27 (4): 800-804.
31. Kaplon H. et al. Development of open-porosity magnesium foam produced by investment casting. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2022; 10 (7): 1941-1956.
32. Banhart J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. *Progress in materials science*. 2001; 46 (6): 559-632.
33. Zahoor A., Mourad A. H. I., Khan S. H. Production of open cell Nickel-based metal foam from polyurethane template. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE*. 2022; 1-6.
34. Paserin V. et al. CVD technique for Inco nickel foam production. *Advanced engineering materials*. 2004; 6 (6): 454-459.
35. Báez S., Hernández M. E., Palomar M. E. Processing and Characterization of Open-Cell Aluminum Foams Obtained through Infiltration Processes. *Procedia Mater. Sci*. 2015; 9: 54-61.
36. Kreigh J. R., Keith G. J. Metal-aggregate product: пат. 3055763 ЧИИА. 1962.
37. Puga H. et al. Influence of particle diameter in mechanical performance of Al expanded clay syntactic foams. *Composite Structures*. 2018; 184: 698-703.
38. Zwissler M. Verfahren zur Herstellung metallischer Schwämme. German Patent, DE. T. 197. №. 25. C. 210.
39. Wan T. et al. Fabrication of high-porosity open-cell aluminum foam via high-temperature deformation of CaCl₂ space-holders. *Materials Letters*. 2021; 284: 129018.
40. Jha N. et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route. *Materials & Design*. 2013; 47: 810-819.
41. Sazegaran H., Hojati M. Effects of copper content on microstructure and mechanical properties of open-cell steel foams. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2019; 26 (5): 588-596.
42. Ozan S., Bilhan S. Effect of fabrication parameters on the pore concentration of the aluminum metal foam, manufactured by powder metallurgy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008; 39: 257-260.
43. Yan C. et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012; 62: 32-38.
44. Alsalla H., Hao L., Smith C. Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2016; 669: 1-6.
45. Al-Ketan O. et al. On mechanical properties of cellular steel solids with shell-like periodic architectures fabricated by selective laser sintering. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2019; 141 (2): 021009.
46. Mahjoob S., Vafai K. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51 (15-16): 3701-3711.
47. Chumpia A., Hooman K. Performance evaluation of single tubular aluminium foam heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 66 (1-2): 266-273.
48. Chen K., Wang X., Chen P., Wen L. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam. *Energy Reports*. 2022; 8: 103-110.
49. De Schamphelre S. et al. Thermal hydraulic performance of 10 PPI aluminium foam as alternative for louvered fins in an HVAC heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2013; 51 (1-2): 371-382.
50. Seyf H. R., Layeghi M. Numerical analysis of convective heat transfer from an elliptic pin fin heat sink with and without metal foam insert. 2010.
51. Huisseune H. et al. Comparison of metal foam heat exchangers to a finned heat exchanger for low Reynolds number applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 89:1-9.
52. T'Joel C. et al. Thermo-hydraulic study of a single row heat exchanger consisting of metal foam covered round tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010; 53 (15-16): 3262-3274.
53. Odabae M., Hooman K., Gurgenci H. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a cylinder in cross-flow. *Transport in Porous Media*. 2011; 86: 911-923.
54. Odabae M., Hooman K. Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a tube bank. *Applied Thermal Engineering*. 2012; 36: 456-463.
55. Alvandifar N., Saffar-Avval M., Amani E. Partially metal foam wrapped tube bundle as a novel generation of air cooled heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018; 118: 171-181.
56. Paek J. W. et al. Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials. *International Journal of Thermophysics*. 2000; 21: 453-464.
57. Xiao T. et al. An analytical fractal model for permeability in isotropic open-cell metal foam with surface roughness. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 126: 105473.

58. Diao K., Zhang L., Zhao Y. Measurement of tortuosity of porous Cu using a diffusion diaphragm cell. *Measurement*. 2017; 110: 335-338.
59. Liu P. S. A new method for calculating the specific surface area of porous metal foams. *Philosophical magazine letters*. 2010; 90 (6): 447-453.
60. Soloveva O. V. et al. Experimental studies of the effective thermal conductivity of polyurethane foams with different morphologies. *Processes*. 2022; 10 (11): 2257.
61. Notario B. et al. Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams. *Polymer*. 2015; 56: 57-67.
62. De Schampheleire S. et al. How to study thermal applications of open-cell metal foam: Experiments and computational fluid dynamics. *Materials*. 2016; 9 (2): 94.
63. Lai Z., Hu H., Ding G. Effect of porosity on heat transfer and pressure drop characteristics of wet air in hydrophobic metal foam under dehumidifying conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 96: 90-100.
64. Soloveva O. et al. Mathematical modelling of heat transfer in open cell foam of different porosities. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Cham: Springer International Publishing. 2019: 371-382.
65. Soloveva O. et al. Estimation of energy efficiency factor for models of porous automotive heat exchangers. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63:1081-1088.
66. Lu W., Zhao C. Y., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes. *International journal of heat and mass transfer*. 2006; 49 (15-16): 2751-2761.
67. Yun S. et al. Heat transfer and stress characteristics of additive manufactured FCCZ lattice channel using thermal fluid-structure interaction model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020; 149: 119187.
68. Son K. N. et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 115: 619-629.
69. Hu C. et al. Numerical simulation on the forced convection heat transfer of porous medium for turbine engine heat exchanger applications. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 180: 115845.
70. Kaur I., Mahajan R. L., Singh P. Generalized correlation for effective thermal conductivity of high porosity architected materials and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023; 200: 123512.
71. Tian J. et al. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels. *International journal of heat and mass transfer*. 2007; 50 (13-14): 2521-2536.
72. Lai X. et al. Analysis of heat transfer characteristics of a heat exchanger based on a lattice filling. *Coatings*. 2021; 11 (9): 1089.
73. Dixit T., Nithiarasu P., Kumar S. Numerical evaluation of additively manufactured lattice architectures for heat sink applications. *International Journal of Thermal Sciences*. 2021; 159: 106607.
74. Li Y. et al. Pore-level determination of spectral reflection behaviors of high-porosity metal foam sheets. *Infrared Physics & Technology*. 2018; 89: 77-87.
75. Dixit T., Ghosh I. An experimental study on open cell metal foam as extended heat transfer surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016; 77: 28-37.
76. Nawaz K., Bock J., Jacobi A. M. Thermal-hydraulic performance of metal foam heat exchangers under dry operating conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 119: 222-232.
77. Carpenter K. P., da Silva A. K. A combined hydro-thermal characterization of high-porosity metal foam test sections with discrete pore-size gradients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014; 77: 770-776.
78. Tian J. et al. The effects of topology upon fluid-flow and heat-transfer within cellular copper structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004; T. 47. №. 14-16. C. 3171-3186.
79. Li Y., Wang S., Zhao Y. Experimental study on heat transfer enhancement of gas tube partially filled with metal foam. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 97: 408-416.
80. Liang D. et al. Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by Selective Laser Melting. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022; 172: 107312.
81. Kaur I., Singh P. Endwall heat transfer characteristics of octahedron family lattice-frame materials. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 127: 105522.
82. Yan H. et al. Convective heat transfer in a lightweight multifunctional sandwich panel with X-type metallic lattice core. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 127: 1293-1304.
83. Bai X., Zheng Z., Nakayama A. Heat transfer performance analysis on lattice core sandwich panel structures. *International journal of heat and mass transfer*. 2019; 143: 118525.
84. Almutairi M. M., Osman M., Tlili I. Thermal behavior of auxetic honeycomb structure: an experimental and modeling investigation. *Journal of Energy Resources Technology*. 2018; 140: 122904.

85. Wang W., Yang X., Han B., Zhang Q., Wang X., Lu T. Analytical design of effective thermal conductivity for fluid-saturated prismatic cellular metal honeycombs. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2016; 6: 69-75.
86. Kumar P., Topin F., Vicente J. Determination of effective thermal conductivity from geometrical properties: Application to open cell foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014; 81: 13-28.
87. Liang D. et al. Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;153: 119579.
88. Bianchi E., Schwieger W., Freund H. Assessment of Periodic Open Cellular Structures for Enhanced Heat Conduction in Catalytic Fixed-Bed Reactors. *Advanced Engineering Materials*. 2016; 18: 608-614.
89. Sarabhai S. et al. Understanding the flow and thermal characteristics of non-stochastic strut-based and surface-based lattice structures. *Materials & Design*. 2023; 227: 111787.
90. Moon C. et al. Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 102: 911-918.
91. Jing L. et al. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores. *Composites Part B: Engineering*. 2011; 42: 1-10.
92. Jung A., Diebels S. Microstructural characterisation and experimental determination of a multiaxial yield surface for open-cell aluminium foams. *Materials & Design*. 2017; 131: 252-264.
93. Xiao X., Zhang P., Li M. Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014; 81: 94-105.
94. Wulf R. et al. Experimental and numerical determination of effective thermal conductivity of open cell FeCrAl-alloy metal foams. *International journal of thermal sciences*. 2014; 86: 95-103.
95. Poureslami P. et al. Pore-scale convection-conduction heat transfer and fluid flow in open-cell metal foams: A three-dimensional multiple-relaxation time lattice Boltzmann (MRT-LBM) solution. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021; 126: 105465.
96. Qu Z. G. et al. A theoretical octet-truss lattice unit cell model for effective thermal conductivity of consolidated porous materials saturated with fluid. *Heat and Mass Transfer*. 2012; 48: 1385-1395.
97. Randrianalisoa J. et al. Microstructure effects on thermal conductivity of open-cell foams generated from the Laguerre-Voronoi tessellation method. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 98: 277-286.
98. Zhao C. Y. et al. Thermal transport in high porosity cellular metal foams. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2004; 18: 309-317.
99. Wen T. et al. Forced convection in metallic honeycomb structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006; 49: 3313-3324.
100. Yang X. et al. Role of porous metal foam on the heat transfer enhancement for a thermal energy storage tube. *Applied Energy*. 2019; 239: 142-156.
101. Bağcı Ö. et al. Investigation of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch. *Heat and Mass Transfer*. 2018; 54:2343-2349.
102. Boules D., Sharqawy M. H., Ahmed W. H. Enhancement of heat transfer from a horizontal cylinder wrapped with whole and segmented layers of metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021; 165: 120675.
103. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers. *International journal of heat and mass transfer*. 2006; 49: 2762-2770.
104. Arasteh H., Salimpour M. R., Tavakoli M. R. Optimal distribution of metal foam inserts in a double-pipe heat exchanger. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2019; 29: 1322-3142.
105. Zhao C. Y., Lu W., Tassou S. A. Flow boiling heat transfer in horizontal metal-foam tubes. 2009.
106. Soloveva O. V., Solovev S. A., Shakurova R. Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25(1): 82-104.
107. Solovev S.A., Soloveva O.V., Akhmetova I.G., Vankov Y.V., Shakurova R.Z. Numerical investigation of the thermal conductivity of a composite heat-insulating material with microgranules. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(1):86-98. (In Russ.)
108. Soloveva O. V., Solovev S. A., Talipova A. R., Shakurova R. Z., Gilyazov A. I. 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 (53): 56-64.
109. Soloveva O. V., Solovev S. A., Vankov Yu. V., Akhmetova I. G., Shakurova R. Z., Talipova A. R. 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. (In Russ.)

110. Solovev S. A., Soloveva O. V., Akhmetova I. G., Vankov Y. V., Paluku D. L. Numerical simulation of heat and mass transfer in an open-cell foam catalyst on example of the acetylene hydrogenation reaction. *ChemEngineering*. 2022; 6(1): 11.
111. Soloveva O. V. et al. Study of heat transfer in models of FCC, BCC, SC and DEM porous structures with different porosities. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2022; 2373(2): 022040.
112. Solovev S. A., Soloveva O. V., Gilmurahmanov B. Sh., Lamberov A. A. Numerical investigation of the ethylbenzene dehydrogenation reaction in a fixed bed reactor with catalyst granules of various sizes. *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing. 2019; 1399(5): 055022.
113. Solovev S., Soloveva O. Numerical Simulation of the Operation of a Chemical Reactor with an Open Cell Foam Catalyst. *XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021" Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry*, Springer International Publishing. 2022; 2: 23-32.
114. Soloveva O., Solovev S., Talipova A., Sagdieva T., Golubev Y. Study of heat transfer in a heat exchanger with porous granules for use in transport. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63: 1205-1210.
115. Solovev S., Soloveva O., Talipova A., Belousova, L., Sabirova, J. Study of the influence of the porosity of the fibrous material used in transport on the value of energy efficiency. *Transportation Research Procedia*. 2022; 63: 1252-1258.
116. Alhusseny A., Turan A., Nasser A. Rotating metal foam structures for performance enhancement of double-pipe heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017; 105: 124-139.
117. Hamzah J. A., Nima M. A. Experimental study of heat transfer enhancement in double-pipe heat exchanger integrated with metal foam fins. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020; 45(7): 5153-5167.
118. Chen X. et al. Performance evaluation of a double-pipe heat exchanger with uniform and graded metal foams. *Heat and Mass Transfer*. 2020; 56: 291-302.
119. Chen T. et al. Performance evaluation of metal-foam baffle exhaust heat exchanger for waste heat recovery. *Applied energy*. 2020; 266: 114875.
120. Izadi A. et al. MHD enhanced nanofluid mediated heat transfer in porous metal for CPU cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 168: 114843.
121. Muduli S., Panigrahi U. Numerical simulation of thermal performance of porous metal heat sink for cooling the CPU. *2022 International Electronics Symposium (IES)*. IEEE. 2022. 150-155.
122. Kim S. Y., Paek J. W., Kang B. H. Thermal performance of aluminum-foam heat sinks by forced air cooling. *IEEE Transactions on components and packaging technologies*. 2003. 26(1): 262-267.
123. Dai Z. et al. A comparison of metal-foam heat exchangers to compact multilouver designs for air-side heat transfer applications. *Heat Transfer Engineering*. 2012; 33(1): 21-30.
124. Samudre P., Kailas S. V. Thermal performance enhancement in open-pore metal foam and foam-fin heat sinks for electronics cooling. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 205: 117885.
125. Rasam H. et al. Numerical assessment of heat transfer and entropy generation of a porous metal heat sink for electronic cooling applications. *Energies*. 2020; 13(15): 3851.
126. Bayomy A. M., Saghir M. Z., Yousefi T. Electronic cooling using water flow in aluminum metal foam heat sink: Experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016; 109: 182-200.
127. Wang J. et al. Simulation of hybrid nanofluid flow within a microchannel heat sink considering porous media analyzing CPU stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022; 208: 109734.
128. Chen C. C., Huang P. C., Hwang H. Y. Enhanced forced convective cooling of heat sources by metal-foam porous layers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013; 58(1-2): 356-373.

Authors of the publication

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

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

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

Yaroslav P. Golubev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено 25.09.2023 г.

Отредактировано 24.01.2024 г.

Принято 01.02.2024 г.

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 004.7

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ПРЕПЯТСТВИЯ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМОЙ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОМОЩЬЮ ИК-ДАТЧИКОВ РАССТОЯНИЯ ТИПА GP2Y0A (SHARP)

Андреев В.П.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
г. Москва, Россия
andreevipa@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* При организации движения мобильного робота (МР) в недетерминированной среде возникает задача SLAM, которая включает обнаружение сенсорной системой МР наличия препятствия, расстояния до него и формы препятствия. Для решения данной задачи часто используется инфракрасный (ИК) аналоговый датчик расстояния, информационный поток от которого относительно невелик и может быть обработан в реальном времени с помощью микроконтроллеров невысокой производительности. Однако такой датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить расстояние до некоторой точки его поверхности. Цель – разработать метод определения как расстояния до препятствия, так и его форму. При использовании аналогового датчика типа GP2Y0A (SHARP) выявилась проблема, связанная с возникновением со случайной периодичностью в коммуникационном канале передачи данных аномальных значений сигнала – артефактов. Необходимо выявить источник таких помех, предложить метод оценки их параметров и способ минимизации влияния. *МЕТОДЫ.* Для определения формы препятствия предлагается дифференциальный метод, основанный на использовании нескольких отсчётов сканирующего ИК-датчика расстояния. В качестве показателя «зашумлённости» канала предлагается использовать количество значений сигнала датчика, превышающих величину среднего значения сигнала на 1σ , 2σ , 3σ , 4σ и 5σ . Применение статистических методов фильтрации шума приводит к существенным задержкам реакции системы управления МР. Это недопустимо, поскольку на исполнительном уровне системы управления требуется обеспечить режим «жёсткого» реального времени. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье приведены результаты экспериментов, показывающие условия применения дифференциального метода, выявлен источник аномальных значений сигнала и предложен способ их минимизации. Предложен метод увеличения диапазона практического использования нелинейной функции преобразования ИК-датчика. *ВЫВОДЫ.* Количество и величина аномальных значений зависят от длины коммуникационного канала. При использовании аналоговых датчиков следует преобразовывать выходной сигнал в цифровую форму, применяя для этого аналого-цифровые преобразователи (АЦП) в интегральном исполнении, максимально приближая АЦП к источнику сигнала.

Ключевые слова: мобильный робот; система управления; аналоговый датчик; коммуникационный канал; флуктуационный шум; фильтрация шума.

Благодарности: Работа, по результатам которой подготовлена статья, является инициативной и выполнена при участии сотрудников Центра технологической поддержки образования Международного института новых образовательных технологий РГТУ.

Для цитирования: Андреев В.П. Определение формы препятствия сенсорной системой мобильного робота с помощью ИК-датчиков расстояния типа GP2Y0A (Sharp) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 1. С. 195-207. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207.

**OBSTACLE SHAPE DETERMINATION BY MOBILE ROBOT SENSOR SYSTEM
USING GP2Y0A (SHARP) TYPE IR DISTANCE SENSORS**

Andreev VP.

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
andreevipa@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* When organizing a mobile robot (MR) movement in a non-deterministic environment, the SLAM problem arises, which includes the detection of an obstacle presence by the MR sensor system, the distance to the obstacle and its shape. To solve this problem, an infrared (IR) analog distance sensor is often used, the information flow from which is relatively small and can be processed in real time using low-performance microcontrollers. However, such a sensor can only detect an obstacle and determine a distance to a certain point on its surface. The goal is to develop a method for determining both a distance to an obstacle and its shape. When setting up experiments on the use of an analog sensor of the GP2Y0A (SHARP) type, a problem was revealed associated with the occurrence of not only fluctuation noise in a data communication channel, but also artifacts – anomalous signal values appear with random periodicity. It is necessary to determine the source of such interference, propose a method for estimating its parameters and a way to minimize its influence. *METHODS.* To determine the shape of an obstacle, a differential method is proposed based on the use of several readings of a scanning IR distance sensor. As an indicator of the “noisiness” of the channel, it is proposed to use the number of sensor signal values that exceed the average signal value by 1σ , 2σ , 3σ , 4σ and 5σ . The use of standard methods for filtering abnormal values of a sensor signal leads to significant delays in a response of the MR control system. This is unacceptable, because at the executive level of a control system it is required to provide a “hard” real-time mode. *RESULTS.* The article presents the results of experiments showing the conditions for applying the differential method for determining a shape of an obstacle, the source of anomalous signal values is identified and a method for minimizing them is proposed. A method for increasing the practical use range of a nonlinear IR sensor conversion function is also proposed. *CONCLUSION.* The number and magnitude of abnormal values depend on a communication channel length. When using analog sensors, it is necessary to convert an output signal into digital form using analog-to-digital converters (ADCs) in an integrated design, structurally bringing the ADC as close as possible to the signal source.

Keywords: mobile robotics; control system; analog sensor; communication channel; fluctuation noise; noise filtering.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was prepared, is proactive and was carried out with the participation of employees of the Center for Technological Support of Education of the International Institute of New Educational Technologies of the Russian State University for the Humanities.

For citation: Andreev VP. Obstacle shape determination by mobile robot sensor system using GP2Y0A (Sharp) type ir distance sensors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (1): 195-207. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-1-195-207.

Введение (Introduction)

При организации движения мобильного робота (МР) в недетерминированной среде возникает задача SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) [1, 2], при решении которой обычно используются такие дистанционные датчики, как лидары, телекамеры, тепловизоры. Однако, для обработки их выходных сигналов в режиме «жёсткого» реального времени требуется иметь на борту МР мощные вычислительные средства, что приводит к высокому энергопотреблению и увеличению массогабаритных характеристик мобильной части робототехнического комплекса. Это, в свою очередь, снижает время автономной работы МР. Одной из основных составляющих SLAM является задача обнаружения в процессе движения сенсорной системой МР препятствия, определения расстояния до него и его формы [3]. Для решения данной задачи часто используется инфракрасный (ИК) датчик расстояния типа GP2Y0A (SHARP) [4], информационный поток

от которого невелик и относительно легко может быть обработан в реальном времени с помощью микроконтроллеров невысокой производительности – встраиваемых вычислительных устройств [5]. Однако этот датчик позволяет лишь обнаружить препятствие и определить расстояние до некоторой точки его поверхности. **Цель исследования** заключается в разработке метода определения как расстояния до препятствия, так и его формы по данным, получаемым с помощью аналогового ИК-датчика расстояния. При постановке экспериментов по использованию в сенсорной системе МР аналогового датчика типа GP2Y0A (SHARP) выявился ряд проблем, связанных с возникновением не имеющих статистической закономерности помех в коммуникационном канале при передаче аналоговых сигналов в блок обработки системы управления МР [6, 7]. Такие помехи, выражающиеся в появлении со случайной периодичностью аномальных значений сигнала, обычно называют артефактами. Такие искажения сигнала датчиков расстояния критичны при организации движения МР в недетерминированной среде – неверное определение расстояния до препятствия или его формы могут привести к столкновению робота с объектами среды. В статье [8] перечислено 5 проблем с функционированием аналоговых каналов, в том числе влияние электромагнитных полей. Один из наиболее эффективных способов защиты от влияния электромагнитных полей – это использование соответствующего экранирования с заземлением [9]. Однако, такой способ в конструктиве мобильного робота реализовать сложно, например, при использовании колёсной транспортной платформы с обрешиненными колёсами. **Научная значимость исследования** состоит в предложении метода оценки параметров аномальных значений сигнала, возникающих в аналоговых каналах передачи данных. **Практическая значимость исследования** заключается в выявлении источника таких помех в сенсорной системе МР и предложении способа их минимизации, что позволит использовать дешёвые аналоговые ИК-датчики расстояния, например, типа GP2Y0A (SHARP), для определения расстояния до препятствия и его формы.

Принцип работы ИК-датчика расстояния GP2Y0A фирмы SHARP

Инфракрасные датчики расстояния широко применяются в мобильной робототехнике для обнаружения препятствий на пути движения мобильного робота (МР). Датчики типа GP2Y0A фирмы SHARP (рис. 1) относятся к классу генераторных аналоговых дистанционных датчиков – датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины в аналоговый электрический сигнал [10].



Рис. 1. Датчик типа GP2Y0A (SHARP)

Fig. 1. GP2Y0A (SHARP) type sensor

*Источник: [11] Source: [11].

Для определения расстояния до объекта используется метод триангуляции (рис. 2) [11]. Излучателем LED формируются световые импульсы ИК-диапазона, модулированные определённой частотой. Излучение проходит через линзу L1 и отражается от объектов P1 или P2, находящихся в поле зрения сенсора. Отражённый луч света собирается линзой L2 и передаётся на позиционно-чувствительный фотоэлемент PSD, который поделён на две равные части U1 и U2. Испускаемый и отражённый лучи образуют треугольник «излучатель-объект-приёмник». Угол отражения зависит от расстояния l ($l_1 \div l_2$) до объекта.

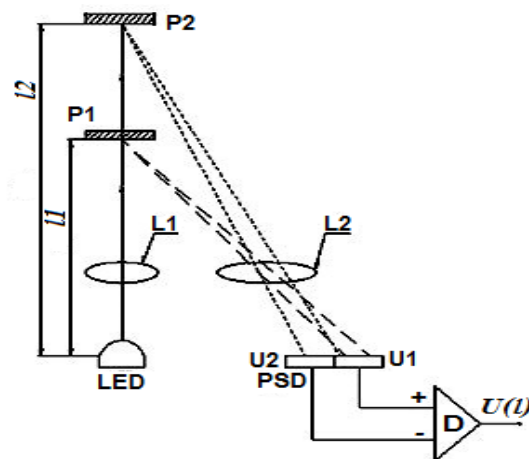


Рис. 2. Метод триангуляции

Fig. 2. Triangulation method

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

Отражённый от объектов P1 и P2 луч на поверхности PSD образует световое пятно (вследствие диффузии). Когда световое пятно находится в центральной части, сегменты обеих частей фотозлемента будут освещены одинаково. В положении объекта P1 отражённый свет будет падать на часть U1 фотозлемента PSD, в положении P2 – на часть U2. Смещение светового пятна приводит к большей доле освещённости одного сегмента PSD по сравнению с другим. В результате на выходе дифференциального усилителя D возникает аналоговый электрический сигнал $U(l)$, пропорциональный углу отклонения светового пятна от центральной части фотозлемента. Величина угла, в свою очередь, зависит от расстояния до объекта в пределах диапазона $l1 \div l2$. Для исключения влияния на показания стороннего излучения датчик работает в зоне ближнего ИК излучения – $850\text{nm} \pm 70\text{nm}$, дополнительно используется модуляция с фиксированной частотой импульсного ИК-излучения с соответствующей фильтрацией полосовым фильтром на приёмной стороне.

В зависимости от диапазона измеряемой дальности выпускаются 4 типа датчиков: GP2Y0A41SK0F – $4 \div 30\text{cm}$, GP2Y0A21YK0F – $10 \div 80\text{cm}$, GP2Y0A02YK0F – $20 \div 150\text{cm}$ и GP2Y0A710K0F – $100 \div 550\text{cm}$. Модель датчика GP2Y0A02YK0F имеет цифровой выходной сигнал, в отличие от остальных датчиков, и соответственно обладает несколько большими габаритами. Сенсор способен определять изменение смещения объекта с точностью до 1mkm (при определённых условиях).

На рис. 3 приведена типовая зависимость выходного напряжения датчика GP2Y0A21YK0F от расстояния до объекта [12]. Датчики имеют два основных недостатка: неоднозначная зависимость выходной величины от расстояния до объекта (в диапазоне 0-10 см для данной модели датчика) и нелинейность характеристики преобразования (для всех датчиков данного типа).

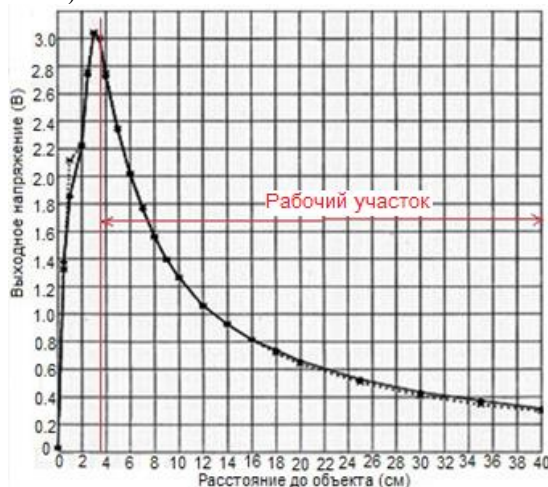


Рис. 3. Типовая зависимость напряжения на выходе датчика GP2Y0A21YK0F

Fig. 3. Typical dependence of the output voltage of the sensor GP2Y0A21YK0F

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

Для исключения неоднозначности показаний датчик располагают на корпусе робота так, чтобы данный участок характеристики не мог быть использован чисто физически, например, так, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Пример установки ИК-датчиков на Fig. 4. An example of installing IR sensors on the корпусе МР MR body

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

Для исключения влияния нелинейности обычно используют обратную зависимость показаний датчика от расстояния, поскольку в этом случае имеется небольшой более-менее линейный участок (рис. 5) [12]. Линейный участок на этом графике совсем небольшой, что существенно снижает динамический диапазон работы датчика.

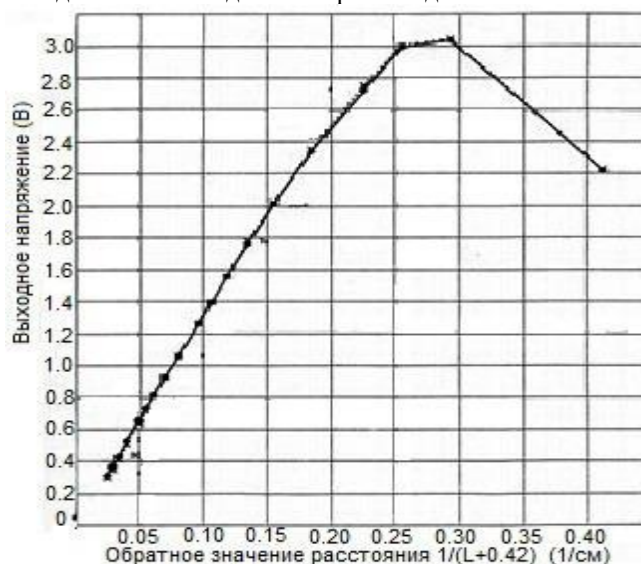


Рис. 5. Обратная зависимость напряжения на Fig. 5. Inverse dependence of the output voltage of выходе датчика the sensor

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

Для использования всего нелинейного участка характеристики предлагается в процессе калибровки датчика определить функцию, аппроксимирующую данную нелинейность. Эксперименты показали, что данная нелинейность хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$y = a \cdot x^b,$$

где a , b – коэффициенты аппроксимации для конкретного датчика, определяемые в процессе калибровки.

Перед использованием датчиков данного типа требуется их калибровка, поскольку наблюдается разброс параметров a и b для разных образцов.

Но возникает проблема организации вычисления по приведённой формуле расстояния y по аналоговым значениям показаний x датчика – затратная операция умножения и ещё более затратная операция возведение в нецелую степень. Однако данная проблема легко разрешается, если аналоговые значения показаний преобразовать в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), что всё равно придётся сделать с целью цифровой обработки в системе управления (СУ) робота. Тогда в ячейки памяти микроконтроллера системы управления, адрес которых соответствует цифровым значениям на выходе АЦП, достаточно занести точные значения расстояний,

полученные в процессе калибровки или предварительно вычисленные на ЭВМ по приведённой формуле. В результате в процессе движения робота его системе управления достаточно будет по текущим цифровым значениям дальности считывать из этого массива соответствующие значения расстояния в метрической системе. Но можно этого и не делать – просто дальность будет измеряться не в сантиметрах, а в некоторых целочисленных единицах в диапазоне, определяемом разрядностью АЦП – для вычислительного процесса СУ робота это неважно, поскольку все пороговые значения дальности можно также указать в единицах разрядности АЦП.

Помехи в канале передачи аналогового сигнала

В большинстве случаев для преобразования аналогового сигнала датчика в цифровую форму используют АЦП, входящий в состав микроконтроллера СУ робототехнического устройства. В этом случае приходится передавать сигнал с многочисленных датчиков, обычно устанавливаемых по периметру корпуса робота, в микроконтроллер, который, как правило, располагается на значительном расстоянии от датчиков – внутри корпуса робота. В этом случае возникает проблема искажения сигнала в коммуникационном канале передачи данных из-за влияния электромагнитных полей, создаваемых приводами МР.

В процессе проведения экспериментов по использованию в сенсорной системе МР аналоговых датчиков типа GP2Y0A (SHARP) оказалось, что в коммуникационном канале присутствует не только флуктуационный шум, но и наличествуют артефакты (рис. 6) – со случайной периодичностью появляются аномальные значения сигнала. Причём такие артефакты возникали как при использовании разных видов микроконтроллеров со встроенными АЦП, так и разных моделей датчика [6, 7, 13-15]. Следует заметить, что артефакты наблюдаются в целой последовательности измерений сигнала – n . Данное явление приводит к искажениям в показаниях дальности до препятствия, что равносильно ложному обнаружению близко расположенного препятствия на пути робота и соответствующей реакции его СУ.

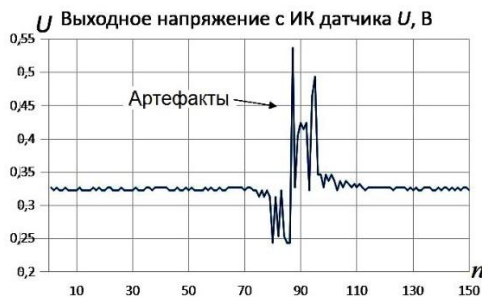


Рис. 6. Выходной сигнал датчика (n – количество измерений сигнала)

Fig. 6. Sensor output signal (n is the number of signal measurements)

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

Эксперименты проводились с использованием следующего оборудования: ИК-датчик GP2Y0A21YK0F, микроконтроллер Arduino Uno, стандартный ПК.

Эксперимент 1. Цель: исследовать параметры канала передачи аналоговых данных ИК датчика GP2Y0A21YK0F.

Схема установки приведена на рис. 7. Датчик зафиксирован на жёсткой поверхности перпендикулярно рабочей плоскости (стол). Препятствие, представляющее собой плоский объект из картона, ориентировано перпендикулярно столу и параллельно рабочей плоскости датчика.

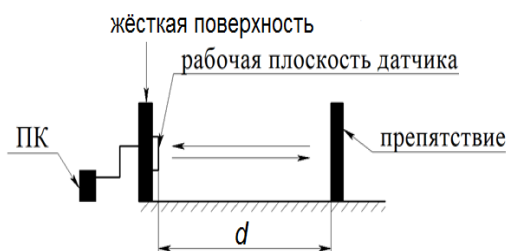


Рис. 7. Схема установки (d – расстояние от датчика до объекта)

Fig. 7. Installation scheme (d – distance from the sensor to the object)

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

Схема подключения датчика к микроконтроллеру приведена на рисунке 8. Микроконтроллер Arduino Uno подключён к ПК по кабелю USB-A, питание микроконтроллера осуществляется от ПК по тому же кабелю. Аналоговый выход датчика подключён проводом длиной $L_1 = 18$ см к входу АЦП микроконтроллера. Электропитание датчика осуществляется от специальных выводов +5В и GND микроконтроллера.

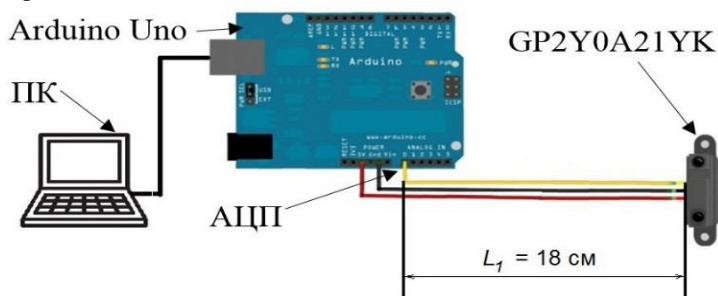


Рис. 8. Схема эксперимента 1 (L_1 – длина проводников) Fig. 8. Experiment 1 (L_1 – length of conductors)

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

Измерения проводились на расстояниях $d = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ и 80 см датчика от препятствия. На каждом расстоянии автоматически производилось по $n = 150$ измерений с периодичностью 55 мс, при этом выполнялось по $h = 5$ попыток со случайной периодичностью (~ 2 сек, ручной запуск). По завершении измерений для каждого расстояния d вычислялись: среднеквадратичное отклонение (σ) и среднее значение (m). В качестве показателя «зашумлённости» канала принималось количество k значений сигнала датчика, превышающих величину среднего значения сигнала m на $1\sigma, 2\sigma, 3\sigma, 4\sigma$ и 5σ . Результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Статистика появления аномальных значений сигнала в эксперименте 1
Statistics of the occurrence of anomalous signal values in experiment 1

d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:					d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:				
		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ			1σ	2σ	3σ	4σ	5σ
10	1	16	16	10	0	0	20	20	14	5	0	0	
	2	16	16	0	0	1		20	14	8	0	0	
	3	16	16	5	0	0		20	11	2	4	0	
	4	14	14	10	0	0		23	15	8	0	0	
	5	13	13	10	0	0		23	13	7	0	0	
30	1	23	12	2	1	0	40	24	12	7	0	0	
	2	20	11	2	2	0		22	12	6	0	0	
	3	20	11	6	0	0		23	9	8	0	0	
	4	21	12	5	1	0		23	12	7	0	0	
	5	22	12	3	1	0		22	10	0	0	0	
50	1	8	8	1	7	0	60	54	2	1	0	0	
	2	5	5	0	0	5		8	8	5	5	0	
	3	4	4	0	0	4		17	1	0	0	1	
	4	3	3	0	0	3		6	6	3	3	0	
	5	10	10	10	0	0		5	5	0	5	0	
70	1	20	8	0	0	1	80	26	14	7	0	0	
	2	12	12	0	1	2		23	14	7	0	0	
	3	20	14	1	3	0		18	1	0	0	1	
	4	10	10	0	6	0		19	13	5	1	0	
	5	1	1	0	0	1		18	12	3	3	0	

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

Вывод:

Показания датчика нестабильны. Наблюдается значительное количество *k* отклонений измеренных значений от среднего (выделено жирным шрифтом), превышающее 3σ , в ряде случаев наблюдается превышение в 5σ . Для худшего случая значение отношения сигнал/шум (m/σ) составляет 3.4.

Гипотеза. Помехи возникают из-за наводок в канале передачи аналоговых данных от датчика к АЦП микроконтроллера.

Эксперимент 2. Цель: исследовать параметры канала передачи аналоговых данных ИК-датчика GP2Y0A21YK0F при минимальной длине канала передачи аналогового сигнала.

Для уменьшения длины информационного проводника используется отдельный однокристальный АЦП ADS1015, который устанавливается в максимальной близости от датчика. В результате длина проводника $L_1 = 3$ см (Рис. 9).

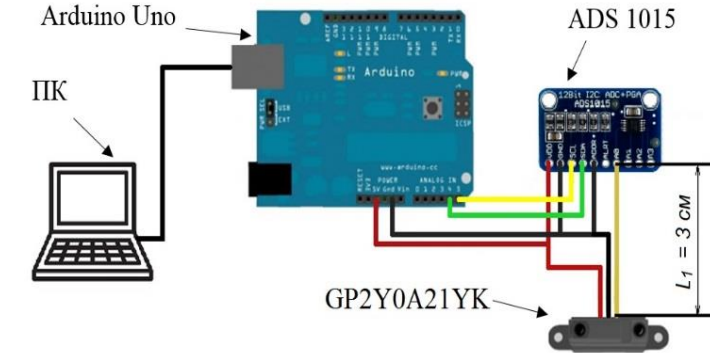


Рис. 9. Схема эксперимента 2 (L_1 – длина проводников) Fig. 9. Scheme of the experiment 2 (L_1 – length of conductors)

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

Аналого-цифровой преобразователь ADS1015 – это 12-разрядный АЦП, конструктивно выполненный в виде микросхемы. Обмен информацией между управляющим устройством (микроконтроллером) и АЦП происходит по протоколу I2C. Выводы АЦП SCL и SDA предназначены для передачи информации по протоколу I2C, вывод ADDR служит для установки адреса модуля, вывод ALERT – выход компаратора, используемый для оповещения управляющего устройства. В микроконтроллере используются входы АЦП A0, A1, A2, A3. Электропитание датчика и АЦП осуществляется от специальных выводов +5V и GND микроконтроллера.

Все измерения проводились аналогично эксперименту 1. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Статистика появления аномальных значений сигнала в эксперименте 2
Statistics of the occurrence of anomalous signal values in experiment 2

d , см	h	Кол-во k значений сигнала больше:					d , см	Кол-во k значений сигнала больше:				
		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ		1σ	2σ	3σ	4σ	5σ
10	1	59	6	0	0	0	20	62	11	0	0	0
	2	58	5	0	0	0		51	5	0	0	0
	3	60	7	0	0	0		68	3	0	0	0
	4	54	5	0	0	0		56	1	0	0	0
	5	57	5	0	0	0		65	1	0	0	0
30	1	57	3	1	0	0	40	50	9	0	0	0
	2	50	3	1	0	0		48	6	0	0	0
	3	71	4	0	0	0		44	8	0	0	0
	4	36	3	0	0	0		44	7	0	0	0
	5	81	3	0	0	0		51	6	0	0	0
50	1	38	0	0	0	0	60	81	0	0	0	0
	2	43	10	0	0	0		40	1	0	0	0

Продолжение таблицы 2. *Continuation of Table 2.*

	3	42	3	0	0	0		39	3	1	0	0
	4	80	1	0	0	0		58	2	0	0	0
	5	35	5	0	0	0		77	4	1	0	0
70	1	49	8	1	0	0	80	37	5	0	0	0
	2	53	7	1	0	0		37	4	0	0	0
	3	49	7	2	0	0		83	5	0	0	0
	4	53	9	0	0	0		38	3	0	0	0
	5	24	13	0	0	0		81	3	0	0	0

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

При использовании внешней микросхемы АЦП, подключённого коротким проводом длиной $L_1 = 3$ см, количество k отклонений измеренных значений от среднего, превышающее 3σ существенно меньше. Значение отношения сигнал/шум m/σ для худшего случая составляет 25.7, что значительно лучше результата из эксперимента 1 ($m/\sigma = 3.4$).

Полагаем, что наводки возникают в канале передачи аналоговых данных от датчика на вход устройства обработки.

Дифференциальный метод определения формы препятствия

Дифференциальный метод определения формы препятствия был предложен ещё в 2017г. в статье [14, 15], но для случая применения сканирующего ультразвукового датчика расстояния типа HC-SR04, выходной сигнал которого представляет собой импульс с длительностью, пропорциональной расстоянию. В этом случае влияние внешних факторов на коммуникационный канал отсутствует. Для определения ориентации и формы препятствия дифференциальным методом следует при обнаружении объекта определить расстояние как минимум до 2-х точек на его поверхности (рис.10).

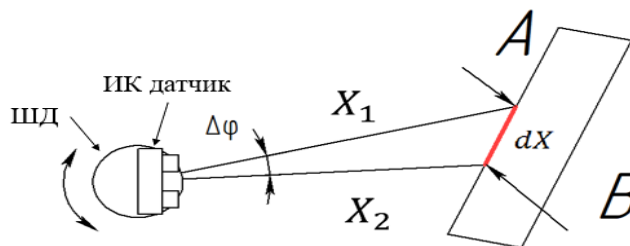


Рис. 10. Дифференциальный метод определения формы или ориентации препятствия *Fig. 10. Differential method for determining the obstacle shape or orientation*

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

Из схемы на рисунке видно, что измеренное расстояние до препятствия будет зависеть от угла поворота вала двигателя $\Delta\varphi$; это можно выразить функцией $X(\varphi)$. Вычислив первую производную данной функции

$$\frac{dX}{d\varphi} = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{X(\varphi + \Delta\varphi) - X(\varphi)}{\Delta\varphi},$$

можно определить ориентацию препятствия относительно датчика.

Границы объекта определяются по второй производной функции $X(\varphi)$:

$$\frac{d^2X}{d\varphi^2} = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} \frac{X(\varphi + \Delta\varphi) - 2X(\varphi) + X(\varphi - \Delta\varphi)}{\Delta\varphi^2}$$

при фиксации положений вала двигателя, при которых $\frac{d^2X}{d\varphi^2} \neq 0$, а знак производной будет указывать на начало и конец объекта

Данный подход с использованием ИК-датчика расстояния, был описан в 2020г. в работе [7], однако результаты оказались неудовлетворительными даже при применении стандартных методов фильтрации флуктуационных шумов (фильтрация по среднему, медианный фильтр и т.п., при значительном «окне» фильтрации). Лишь позже в 2022г. экспериментально была найдена причина – артефакты в коммуникационном канале [13].

Известно, что точность дифференциальных методов существенно зависит от точности исходных данных. В нашем случае на результат влияют неточности измерения дальности, вызванные помехами в каналах передачи данных от аналогового датчика в устройство обработки сигнала:

$$dX(\varphi) = \lim_{\Delta\varphi \rightarrow 0} [X(\varphi + \Delta\varphi) + n_1 - X(\varphi) + n_2],$$

где n_1, n_2 – помехи, вызванные флуктуационным шумом и аномальными значениями сигнала. Поэтому, для снижения влияния флуктуационного шума следует использовать обычный способ сравнения результатов вычислений с некоторым пороговым значением. Использование тех или иных статистических методов фильтрации шума требует значительного количества измерений, т.е. «окна фильтрации», что приводит к увеличению времени реакции системы управления МР.

С влиянием аномальных значений сигнала сложнее, поскольку, как следует из рис.6, они занимают значительное количество последовательных отсчётов n , и могут быть ложно приняты за объект сцены. Поэтому, как показали описанные эксперименты, снижение таких шумов достигается техническими средствами – использование цифровых коммуникационных каналов.

Проблемы организации сканирования

Для реализации дифференциального метода определения ориентации и размеров объектов важное значение имеют такие параметры сканирования сцены датчиком, как точность и повторяемость позиционирования датчика при его угловых перемещениях по горизонтали, организуемых поворотом вала двигателя по часовой стрелке и обратно. В работе [7] для организации сканирования был использован сервопривод. В процессе экспериментов оказалось, что не все типы сервоприводов обеспечивают требуемые точности позиционирования датчика. Поэтому предлагается использовать шаговый двигатель (ШД). Известный недостаток ШД – пропуск шагов при высоких нагрузках на вал двигателя, но в данном случае это исключено вследствие малого веса датчика.

Для исследования возможности использования шагового двигателя в системе сканирования была создана экспериментальная установка [13], состоящая из ШД типа 28BYJ-48 [16] и лазерной указки, закреплённой на оси двигателя (рис.11). Управление двигателем осуществлялось программно через драйвер ULN2003 [17] от микроконтроллера Arduino Uno, подключённого к стандартному ПК.



Рис. 11. Схема эксперимента с шаговым двигателем

Fig. 11. Scheme of the experiment with a stepper motor

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

Экспериментальная установка зафиксирована перпендикулярно рабочей плоскости (стол) на расстоянии $L=262$ см от плоскости препятствия так, что след от лазера направлен перпендикулярно плоскости препятствия. Были рассчитаны точки M_i , в которых теоретически должен оказаться след от луча лазера при повороте вала двигателя на угол $\Delta\varphi = 5^\circ$, где крайние положения это $\varphi_1 = -15^\circ$ (точка A) и $\varphi_2 = +15^\circ$ (точка B) от начального положения (точка M_3).

Для качественной оценки точности были измерены отклонения следа лазера от рассчитанных точек (Рис.12) при движении следа лазера $A \Rightarrow B$ и $B \Rightarrow A$ (по часовой и против часовой стрелки поворота оси ШД). Также вычислялась относительная погрешность отклонение/расстояние до точки: $|\Delta X|/L$.

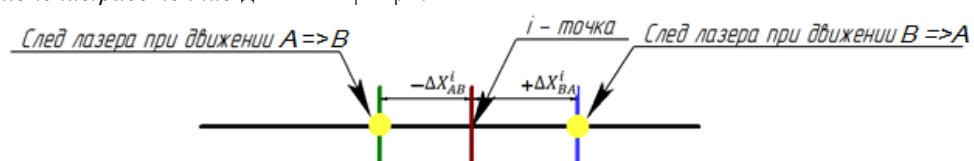


Рис. 12. Схема измерения погрешности позиционирования

Fig. 12. Scheme for measuring position error

Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Погрешность позиционирования ШД в i точках при φ_i углах поворота ($L = 262$ см)

Positioning error of the ball screw at i points at φ_i rotation angles ($L = 262$ cm)

i	φ_i , град.	ΔX_{AB}^i , см ($ \Delta X /L$), %	ΔX_{BA}^i , см ($ \Delta X /L$), %	$\Delta \varphi_{AB}^i$, град.	$\Delta \varphi_{BA}^i$, град.
1	-10	+1.0 (0.4)	+2.3 (0.9)	0.2	0.5
2	-5	+0.5 (0.2)	+2.2 (0.8)	0.1	0.5
3	0	0.0 (0.0)	+1.5 (0.6)	0.0	0.3
4	5	0.0 (0.0)	+1.7 (0.6)	0.0	0.4
5	10	-1.5 (0.6)	+0.6 (0.2)	0.3	0.1

Вывод:

Относительная погрешность не превышает 0,9%. Считаем, что полученная точность достаточна для использования шагового двигателя 28BYJ-48 в системе сканирования ИК-датчиком.

Заключение

В сенсорной системе МР с аналоговыми датчиками для снижения наводок в коммуникационном канале, по которому аналоговый сигнал передаётся в систему управления, не рекомендуется использовать АЦП микроконтроллера или иного обработчика информации. Необходимо преобразовывать аналоговый сигнал датчика в цифровую форму с помощью отдельного АЦП в интегральном исполнении, причём АЦП следует устанавливать в максимальной близости к датчику. В идеальном случае следует использовать датчики с интегрированным в датчик АЦП – цифровые датчики. Цифровая форма представления сигнала позволяет наиболее полно и точно представлять нелинейную передаточную функцию датчика, получаемую в процессе предварительной калибровки, что, в свою очередь, обеспечивает существенное снижение времени реакции системы управления МР за счёт простой выборки наиболее полного массива в памяти микроконтроллера необходимых значений показаний датчика.

Исключение влияния аномальных значений шума на выходной сигнал аналогового ИК-датчика расстояния типа GP2Y0A (SHARP) позволяет с допустимой для движения МР точностью использовать дифференциальный метод определения формы препятствия сенсорной системой МР.

Литература

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I. The Essential Algorithms // Robotics and Automation Magazine. 2006. Vol. 13, N2. pp. 99–110.
2. Kawewong A., Tongprasit S., Hasegawa O., et al. Online and Incremental Appearance-Based SLAM in Highly Dynamic Environments // International Journal of Robotics Research. 2011. Vol.30, N1. pp. 33-55.
3. Kamil F., Tang SH, Khaksar W., et al. A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments // Advances in Robotics & Automation. 2015. Vol. 4, Issue 2, 1000134. pp.1-8.
4. Инфракрасные датчики для роботов. Доступно по: <https://shamrin.ru/infra-krasnye-datchiki-dlya-robotov>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.
5. Определение расстояния до препятствия с помощью инфракрасного датчика учебной системы ROBOTINO. Доступно по: <https://masters.donntu.ru/2016/fknt/gorin/library/article6.htm>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.
6. Andreev V., Tarasova V. The Mobile Robot Control for Obstacle Avoidance with an Artificial Network Application. In: Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Published by DAAAM International. Vienna, Austria; 2019. pp.0724–0732.
7. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Идентификация объектов с помощью комплексирования показаний ультразвуковых и инфракрасных датчиков искусственной нейронной сетью // Труды 31-й Международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА; 28-29 сентября 2020г., С-Петербург: ООО «Издательско-полиграфический комплекс «Гангут», 2020. С.12–18.
8. Проблемы с функционированием аналоговых каналов. Доступно по: <https://imena-dlya-devochek.ru/problemu-s-funkcionirovaniem-analogovykh-kanalov>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

9. Влияние электромагнитных полей на цифровой сигнал. Доступно по: <https://queryzone.ru/article/96202-vliyanie-elektromagnitnykh-pomekh-na-tsifrovoy-signal>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

10. Платт Ч., Янссон Ф. Энциклопедия электронных компонентов // Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2017. 224 с.

11. Инфракрасный датчик расстояния: описание, подключение, схема, характеристики. Доступно по: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/infrakrasnyj-datchik-rasstojanija>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

12. Паспорт ИК-датчика GP2Y0A21YK0F. Доступно по: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

13. Бакулев Х.С. Определение размеров препятствия ИК-датчиком расстояния SHARP 2Y0A21 в сенсорной системе мобильного робота \ Материалы заключительного этапа студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2022)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. С.8–10. Доступно по: https://stankin.ru/uploads/files/file_62bc0e97cc696.pdf. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

14. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Определение формы препятствий мобильным роботом с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Мехатроника, Автоматизация, Управление. М.: Изд-во «Новые технологии». 2017. №11, Том 18. С.759–763.

15. Андреев В.П., Тарасова В.Э. Идентификация объектов с помощью сканирующих угловых перемещений ультразвукового датчика // Труды Международной научно-технической конференции ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА; 02-03 ноября 2017г., С-Петербург. Санкт-Петербург: ИПЦ ООО «Политехника-принт», 2017. С.222–230.

16. Шаговый двигатель 28BYJ-48. Доступно по: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/stepper-motor-28BYJ-48>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

17. Паспорт драйвера шагового двигателя ULN2003. Доступно по: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/uln2001.pdf>. Ссылка активна на 18 ноября 2023.

Автор публикации

Андреев Виктор Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Сенсорные и управляющие системы» Московского государственного технологического университета «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»).

References

1. Durrant-Whyte H., Bailey T. Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I. The Essential Algorithms // Robotics and Automation Magazine. 2006. Vol. 13, N2. pp. 99–110.

2. Kawewong A., Tongprasit S., Hasegawa O., et al. Online and Incremental Appearance-Based SLAM in Highly Dynamic Environments // International Journal of Robotics Research. 2011. Vol.30, N1. pp. 33–55.

3. Kamil F., Tang SH, Khaksar W., et al. A Review on Motion Planning and Obstacle Avoidance Approaches in Dynamic Environments // Advances in Robotics & Automation. 2015. Vol. 4, Issue 2, 1000134. pp.1-8.

4. Infrakrasnyye datchiki dlya robotov. Available at: <https://shamrin.ru/infrakrasnyye-datchiki-dlya-robotov>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

5. Opredeleniye rasstoyaniya do prepyatstviya s pomoshch'yu infrakrasnogo datchika uchebnoy sistemy ROBOTINO. Available at: <https://masters.donntu.ru/2016/fknt/gorin/library/article6.htm>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

6. Andreev V., Tarasova V. The Mobile Robot Control for Obstacle Avoidance with an Artificial Network Application. In: Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, B. Katalinic (Ed.). Published by DAAAM International. Vienna, Austria; 2019. pp.0724–0732.

7. Andreyev VP., Tarasova VE. Identifikatsiya ob"yektov s pomoshch'yu kompleksirovaniya pokazaniy ul'trazvukovykh i infrakrasnykh datchikov iskusstvennoy neyronnoy set'yu [Object Identification by Ultrasonic and Infrared Sensors Data Fusion Using Artificial Neural Network] // Trudy 31-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii EKSTREMAL'NAYA ROBOTOTEKHNIKA. 28-29 sentyabrya 2020. Sankt-Peterburg: ООО «Izdatel'sko-poligraficheskiy kompleks «Gangut», 2020. – Pp.12-18. (In Russ.).

8. Problemy s funktsionirovaniyem analogovykh kanalov. Available at: <https://imena-dlya-devochek.ru/problems-s-funktsionirovaniem-analogovykh-kanalov>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

9. Vliyanie elektromagnitnykh poley na tsifrovoy signal. Available at: <https://queryzone.ru/article/96202-vliyanie-elektromagnitnykh-pomekh-na-tsifrovoj-signal>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
10. Platt CH., Yansson F. Entsiklopediya elektronnykh komponentov, Sankt-Peterburg: BKHV-Peterburg, 2017. 224 P. (In Russ.).
11. Infekrasnyy datchik rasstoyaniya: opisaniye, podklyucheniye, skhema, kharakteristiki. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-datchiki/infekrasnyj-datchik-rasstojaniya>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
12. Passport IK-datchik GP2Y0A21YK0F. Available at: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
13. Bakulev KH.S. Opredeleniye razmerov prepyatstviya IK-datchikom rasstoyaniya SHARP 2Y0A21 v sensornoy sisteme mobil'nogo robota. Materialy zaklyuchitel'nogo etapa studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomatizatsiya i informatsionnyye tekhnologii (AIT-2022)». Sbornik dokladov. – M.: FGBOU VO «MGU «STANKIN», 2022. – S.8-10. Available at: https://stankin.ru/uploads/files/file_62bc0e97cc696.pdf. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
14. Andreyev V.P., Tarasova V.E. Opredeleniye formy prepyatstviy mobil'nym robotom s pomoshch'yu skaniruyushchikh uglovykh peremeshcheniy ul'trazvukovogo datchika // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye. M.: Izd-vo «Novyye tekhnologii». 2017. No11, Vol 18. Pp.759 – 763. (In Russ).
15. Andreyev VP, Tarasova VE. Identifikatsiya ob'yektov s pomoshch'yu skaniruyushchikh uglovykh peremeshcheniy ul'trazvukovogo datchika / Ekstremal'naya robototekhnika (ER-2017). Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii; 02-03 noyabrya 2017. Sankt-Peterburg: IPTS OOO «Politekhnik-print», 2017. Pp.222–230. (In Russ).
16. Shagovyŭ dvigatel' 28BYJ-48. Available at: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-mechanics/stepper-motor-28BYJ-48>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).
17. Passport drayvera shagovogo dvigatelya ULN2003. Available at: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/uln2001.pdf>. Accessed: 18 Nov 2023. (In Russ).

Author of the publication

Victor P. Andreev – Moscow State University of Technology «STANKIN».

Шифр научной специальности: 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

Получено **19.11.2023 г.**

Отредактировано **25.12.2023 г.**

Принято **09.01.2024 г.**

Сдано в набор 15.02.2024 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 18,3
Заказ №
Дата выхода в свет

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

