



Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2024 / Вып. 6

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново)
(главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. техн. наук (Иваново)
(зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Ключина, нач. УИУНЛ (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин,
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

С.В. Ключина
Н.В. Королева
С.М. Коткова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

В.М. Лапшова, М.В. Козлова, А.В. Банников, С.А. Банникова, В.А. Горбунов. Разработка тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки и анализ условий ее применения.....**5**

А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, К.В. Зотова. Расчет значений pH_t при рабочих параметрах теплоносителя второго контура АЭС с ВВЭР.....**15**

А.К. Соколов, В.П. Жуков, Н.Н. Смирнов, Н.Н. Ярунина. Метод комплексного определения зависимости теплофизических характеристик металла от температуры решени-ем обратной задачи теплопроводности.....**23**

А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, Е.Г. Ухалова, Л.Н. Хрипкова. Химический контроль органических веществ по водопаровому тракту энергоблока.....**31**

В.Н. Диденко, Д.А. Хворенков, И.И. Фахразиев. Расчетное определение доли воздуха, отводимого в осушительных установках на холодную регенерацию адсорбента.....**39**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

М.В. Вечеркин, А.Ю. Леднов, А.С. Сарваров, Д.М. Долгушин. Математическая модель для выбора границ диапазонов частот при регистрации акустических сигналов частичных разрядов в высоковольтных трансформаторах.....**51**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.И. Тихонов, В.Е. Розин, М.С. Фадеева, Е.Р. Соловьев, Н.В. Прохорова. Разработка системы проектирования электрических реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности.....**58**

А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов, В.С. Ивекеев. Анализ эффективности способов обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов с активными выпрямителями в условиях реального производства....**67**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

М.Д. Фомичев, В.П. Жуков, М.В. Козлов. Исследование влияния скорости ветра на неравномерность распределения воздушного потока в башенных градирнях.....**75**

С.П. Бобков, И.А. Астраханцева, В.П. Жуков, Е.С. Бобкова. Имитационное моделирование генератора озона.....**81**

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

С.Н. Литвинов, С.А. Ладанов, М.В. Карелин. Разработка алгоритма непрерывного отслеживания объектов производства на базе рекурсивного фильтра Калмана.....**91**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).



Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2024 / Issue 6

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovskiy, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics
(Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue:
E.N. Bushuyev, A.Yu. Murzin, A.I. Tikhonov,
A.R. Kolganov, S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

S.V. Klyunina
N.V. Koroleva
S.M. Kotkova

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

V.M. Lapshova, M.V. Kozlova, A.V. Bannikov, S.A. Bannikova, V.A. Gorbunov. Development of thermal scheme of gas contact desalination plant and analysis of its application conditions...**5**

A.B. Larin, B.M. Larin, K.V. Zotova. Calculation of pH_t values at operating parameters of water coolant of the secondary circuit of NPPs with PWR.....**15**

A.K. Sokolov, V.P. Zhukov, N.N. Smirnov, N.N. Yarunina. Method of complex determination of the dependence of the thermophysical characteristics of metal on temperature by solving the inverse problem of thermal conductivity.....**23**

A.B. Larin, B.M. Larin, E.G. Ukhalova, L.N. Khripkova. Chemical control of organic substances along water steam path of the power unit.....**31**

V.N. Didenko, D.A. Khvorenkov, I.I. Fakhraziev. Calculation of the portion of air in drying units used for cold regeneration of the adsorbent....**39**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

M.V. Vecherkin, A.Yu. Lednov, A.S. Sarvarov, D.M. Dolgushin. Mathematical model for selection of frequency range boundaries when recording acoustic signals of partial discharges in high-voltage transformers.....**51**

ELECTROMECHANICS

A.I. Tikhonov, V.E. Rozin, M.S. Fadeeva, E.R. Soloviev, N.V. Prokhorova. Development of design system for electrical reactors, chokes and low-power transformers.....**58**

A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.S. Ivekeev. Analysis of the effectiveness of methods for ensuring electromagnetic compatibility of electric drives with active rectifiers in real production conditions.....67

MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY

M.D. Fomichev, V.P. Zhukov, M.V. Kozlova. Study of wind speed influence on non-uniformity of air flow distribution in tower cooling towers.....75

S.P. Bobkov, I.A. Astrakhantseva, V.P. Zhukov, E.S. Bobkova. Simulation modeling of ozone generator.....81

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES

S.N. Litvinov, S.A. Ladanov, M.V. Karelin. Development of an algorithm for industrial production objects continuous tracking based on recursive Kalman filter.....91

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 628.165

Виктория Михайловна Лапшова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: lapschova.victoria@yandex.ru

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Александр Васильевич Банников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Светлана Андреевна Банникова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Владимир Александрович Горбунов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Разработка тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки и анализ условий ее применения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Дымовые газы, покидающие различные энергетические установки, широко используются в качестве греющей среды в котлах-утилизаторах, контактных теплообменных аппаратах с активной насадкой, рекуперативных теплообменниках. Одним из перспективных направлений использования теплоты дымовых газов является их применение в процессе получения обессоленной воды. Уходящие газы в большинстве существующих опреснительных установок используются только для подогрева опресняемой воды, при этом данный процесс осуществляется в поверхностных теплообменных аппаратах, однако организация контактного теплообмена позволяет повысить эффективность процесса опреснения. Продукты сгорания содержат в себе парниковые газы, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду, но обладают при этом энергетическим потенциалом, который может быть полезно использован. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с разработкой технологий, позволяющих утилизировать теплоту уходящих газов, а также осуществлять их очистку.

Материалы и методы. При разработке методики расчета тепловой схемы опреснительной установки и оценке эффективности процесса опреснения использованы методы балансовых расчетов.

Результаты. Разработана тепловая схема газоконтактной опреснительной установки с адиабатическим увлажнением дымовых газов. Определено влияние температуры дымовых газов и солёности морской воды на эффективность работы опреснительной установки.

Выводы. Использование дымовых газов в процессе получения обессоленной воды в контактных опреснителях позволяет не только получать пресную воду, пригодную для технических нужд, но и осуществлять очистку продуктов сгорания. В результате проведенного исследования установлено, что изменение температуры уходящих газов при адиабатическом увлажнении с 365 до 120 °С приводит к снижению производительности установок газоконтактного типа в 2,62 раза, а увеличение солёности морской воды, поступающей в установку, с 10 до 90 г/л приводит к увеличению ее расхода на 8–10 %.

Ключевые слова: уходящие газы, обессоливание морской воды, газоконтактная опреснительная установка, адиабатическое увлажнение, метод балансовых расчетов

Victoria Mikhailovna Lapshova

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: lapschova.victoria@yandex.ru

Maria Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Alexander Vasilyevich Bannikov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Svetlana Andreevna Bannikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Vladimir Alexandrovich Gorbynov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Development of thermal scheme of gas contact desalination plant and analysis of its application conditions

Abstract

Background. Flue gases of various power plants are widely used as a heating medium in waste heat boilers, contact heat exchangers with an active nozzle, and regenerative heat exchangers. Use of flue gases in the process of obtaining desalinated water is one of the promising directions of using heat of flue gases. The exhaust gases in most existing desalination plants are used only to heat desalinated water, in this case, this process is carried out in regenerative heat exchangers. However, contact heat exchange makes it possible to increase the efficiency of the desalination process. Combustion products contain greenhouse gases that have a negative impact on the environment, but at the same time have an energy potential that can be effectively used. In this regard, the tasks of the development of technologies that allow us to utilize heat of the exhaust gases, as well as to purify them, are relevant.

Materials and methods. Balance calculation methods have been used to develop a method for calculating the thermal scheme of a desalination plant and evaluating the effectiveness of the desalination process.

Results. A thermal scheme of a gas-contact desalination plant with adiabatic humidification of flue gases has been developed. The effect of flue gas temperature and sea water salinity on the efficiency of the installation has been determined.

Conclusions. The use of flue gases in the process of obtaining desalinated water in contact desalinators allows us not only to obtain fresh water suitable for technical needs, but also to purify combustion products. As a result of balance calculations, it has been found that a change of the temperature of exhaust gases during adiabatic humidification from 365 to 120 °С leads to a 2.62-fold decrease in the productivity of gas-contact type installations. An increase of the initial salinity of seawater entering the installation leads to an increase of its consumption by 8.5 %.

Key words: exhaust gases, seawater desalination, gas-contact desalination plant, adiabatic humidification, balance calculation method

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.005-014

Введение. Объем выбросов загрязняющих веществ от различных источников составляет более 20 000 тысяч тонн в год¹, при этом большая их часть образуется в результате сжигания органического топлива.

Продукты сгорания содержат в себе парниковые газы, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду, но обладают при этом энергетическим потенциалом, который может быть полезно использован. В этой связи актуальными являются задачи, связанные с разработкой технологий, позволяющих утилизировать тепло уходящих газов, а также осуществлять их очистку.

Дымовые газы, покидающие различные энергетические установки, применяются в качестве греющей среды в различных агрегатах: котлах-утилизаторах, контактных теплообменных аппаратах с активной насадкой, рекуперативных теплообменниках [1, 2].

Схема утилизации теплоты дымовых газов и вид применяемых утилизаторов зависят от источника продуктов сгорания, возможности использования их потенциала, вида сжигаемого топлива, их состава, определяющего их агрессивность по отношению к материалу оборудования [3].

В свою очередь, утилизация тепла дымовых газов является одним из способов повышения эффективности процесса опреснения.

Анализ технических решений по использованию дымовых газов при опреснении показал, что продукты сгорания используются в основном для нагрева опресняемой воды, при этом данный процесс осуществляется в поверхностных теплообменных аппаратах [4, 5].

Использование контактного способа утилизации тепла дымовых газов в термических опреснителях позволяет не только более полно использовать их потенциал, но и осуществлять их очистку.

В качестве источника тепла в газоконтактных опреснительных установках могут использоваться уходящие газы котельных агрегатов, судовых двигателей, газотурбинных установок газоперекачивающих станций [6].

Опреснение с использованием тепла уходящих газов может быть реализовано двумя путями. Первый способ включает в себя нагрев и испарение морской воды при

контакте с продуктами сгорания с последующей конденсацией из парогазовой смеси в поверхностном или смешивающем конденсаторе. Второй способ заключается в нагреве воды уходящими газами и сбросе ее в испаритель мгновенного вскипания. При реализации первого способа возможно не только получение пресной воды, но и очистка дымовых газов перед сбросом их в окружающую среду.

Тепловая схема газоконтактной опреснительной установки. Настоящее исследование направлено на разработку тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки, в которой осуществляется утилизация теплоты дымовых газов.

Так как получение пресной воды в таких установках включает в себя 2 основных процесса – увлажнение и осушку дымовых газов, то одним из параметров, влияющих на эффективность работы газоконтактной опреснительной установки, является температура воды, с которой контактируют дымовые газы.

Возможны следующие варианты организации контакта дымовых газов и воды (рис. 1):

- взаимодействие продуктов сгорания с водой, температура которой ниже температуры точки росы (процесс О-1).

- контакт уходящих газов с водой, температура которой равна температуре точки росы (процесс О-2);

- взаимодействие дымовых газов и воды, температура которой соответствует температуре продуктов сгорания по мокрому термометру (процесс О-3);

- контакт продуктов сгорания и воды, температура которой выше температуры дымовых газов по мокрому термометру (процесс О-4).

При взаимодействии дымовых газов и воды, температура которой ниже температуры точки росы, будет происходить осушка дымовых газов, при этом вода подогреется, однако образовавшийся концентрат будет содержать в себе различные кислоты, что делает его неприменимым для использования.

При контакте уходящих газов и воды, температура которой соответствует температуре точки росы продуктов сгорания, выпадения конденсата не произойдет. В результате контакта воды и газов морская вода подогреется, однако будет содержать в себе различные кислоты и соли.

¹ Охрана окружающей среды в России. 2022: статистический сборник / Росстат. – М., 2022. – 115 с.

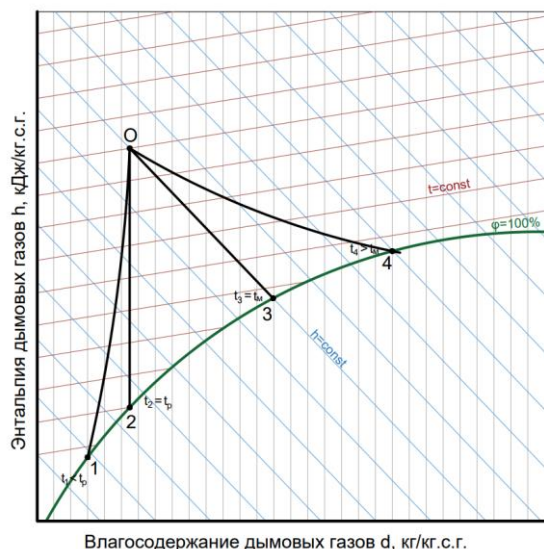


Рис. 1. Процессы взаимодействия дымовых газов и воды, построенные в h - d -диаграмме

При адиабатическом увлажнении дымовых газов (процесс О-3) влагосодержание продуктов сгорания возрастет, при этом их температура понижается. В таком случае осуществляется увлажнение газов, так как они уносят с собой пресную воду. Данные процессы протекают без поступления тепла извне.

Для организации процесса О-4 необходимо подводить тепловую энергию, однако в таком случае с дымовыми газами может быть унесено больше влаги.

Таким образом, увлажнение дымовых газов возможно осуществить путем их взаимодействия с водой, температура которой равна или выше температуры продуктов сгорания по мокрому термометру, однако при последнем варианте усложняется конструкция опреснителя. В этой связи при разработке тепловой схемы было рассмотрено адиабатное увлажнение дымовых газов.

Процесс взаимодействия дымовых газов и морской воды может быть организован разными способами. Контактные аппараты могут быть насадочными, пленочными и форсуночными. Форсуночные аппараты обеспечивают равномерное и мелкодисперсное распыление морской воды, что увеличивает площадь контакта воды и дымовых газов. Это способствует эффективному насыщению газов влагой.

За счет интенсивного распыления и быстрого контакта воды с дымовыми газами время пребывания морской воды и увлажненных дымовых газов в аппарате мини-

мально. Это сокращает время, в течение которого могут происходить химические реакции, вызывающие коррозию и образование отложений. Таким образом, в форсуночных аппаратах износ идет менее интенсивно, тем самым продлевается срок службы оборудования. В этой связи рассмотрим форсуночную контактную колонну.

Принципиальная схема тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки представлена на рис. 2,а.

Процесс получения пресной воды в оригинальной тепловой схеме осуществляется следующим образом. Морская вода, предварительно нагретая в теплообменнике концентрата 3 насосом 2, подается в верхнюю часть контактной колонны 4 и разбрызгивается в виде мелких капель. Дымовые газы после энергетической установки через газодувку 9 поступают в нижнюю часть контактной колонны 4, создавая противоточное движение между дымовыми газами и каплями морской воды. В ходе тепломассообменных процессов дымовые газы насыщаются влагой, охлаждаются, очищаются и покидают контактную колонну в верхней ее части. В ходе взаимодействия морской воды и дымовых газов происходят химические реакции, в результате которых дымовые газы очищаются от сажи, диоксида углерода и диоксида серы. Все эти компоненты остаются в концентрате, который также насыщается солью из поступающей морской воды. Концентрат подогревает морскую воду, а затем отправляется в емкость-сборник 7 для дальнейшего хранения и утилизации. Увлажненные дымовые газы затем направляются в теплообменный аппарат 10, где происходит их охлаждение и осушка, после чего в сепараторе 11 происходит разделение на охлажденные и очищенные дымовые газы, выбрасываемые в атмосферу, и обессоленную морскую воду, которая подается в блок нейтрализации 13 для восстановления нейтральной pH среды. Далее обессоленная вода используется по назначению.

Для исключения явления капельного уноса с дымовыми газами в верхней части контактной колонны устанавливается каплеотбойник.

Контактная колонна, в которой происходит насыщение дымовых газов влагой, должна быть изготовлена из материалов, устойчивых к коррозии и агрессивной среде, возникающей в результате взаимодействия морской воды и дымовых газов.

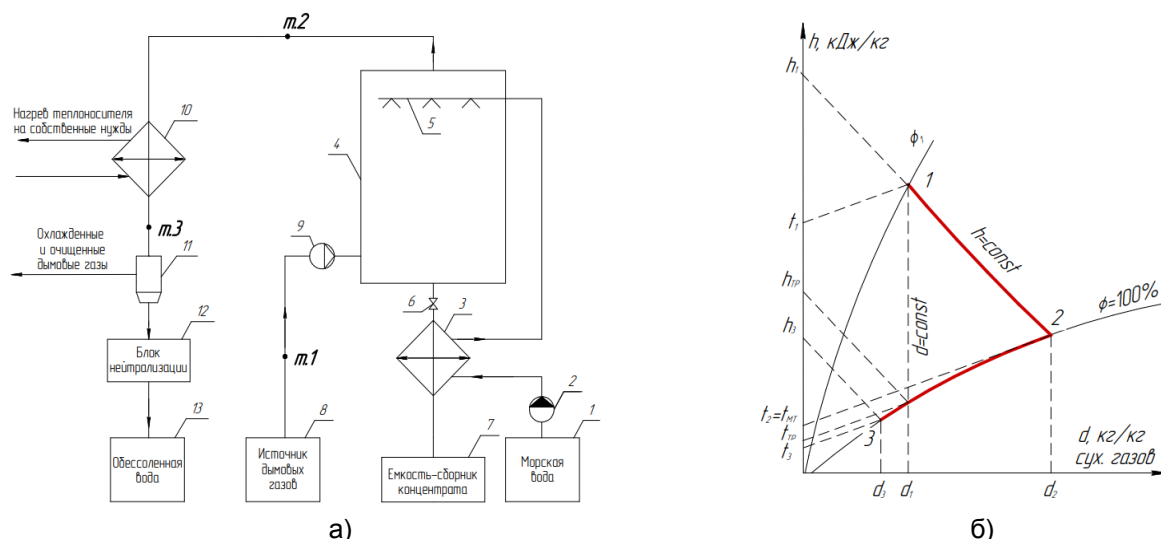


Рис. 2. Тепловая схема (а) и цикл работы газоконтактной опреснительной установки в h - d -диаграмме (б): 1 – емкость исходной опресняемой воды; 2 – насос; 3 – теплообменник концентрата; 4 – контактная колонна; 5 – система диспергирования опресняемой воды (форсунки); 6 – релугилирующий клапан; 7 – емкость-сборник концентрата; 8 – источник продуктов сгорания; 9 – газодувка; 10 – конденсатор-осушитель дымовых газов; 11 – сепаратор; 12 – блок нейтрализации; 13 – емкость-сборник обессоленной воды; 1-2 – адиабатное увлажнение дымовых газов; 2-3 – охлаждение и осушка дымовых газов

Тепловая схема, представленная на рис. 2,а, работает в соответствии с разомкнутым циклом, приведенным на рис. 2,б, в соответствии с которым процесс 1-2 (увлажнение) протекает в контактной колонне, процесс 2-3 (осушка) – в поверхностном охладителе.

Исследование установок, принцип работы которых основан на контактном взаимодействии дымовых газов и морской воды, показало, что полученный в результате их работы дистиллят может быть использован для технических нужд [7]. Характеристики получаемой пресной воды приведены в таблице.

Результаты санитарно-гигиенического исследований полученной обессоленной воды

№ п/п	Показатель	Результаты измерений	Норматив	Единицы измерений
1	Цветность	14	20	град.
2	Водородный показатель	6,5	6–9	ед. pH
3	Запах	0	2	балл
4	Хлориды	103	250	мг/дм ³
5	Жесткость общая	3,55	7	мг-экв/дм ³

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод о том, что получен-

ный в результате работы установки дистиллят соответствует требованиям, предъявляемым к дистиллированной воде.

В результате применения контактного способа взаимодействия морской воды и дымовых газов при функционировании разработанной тепловой схемы достигаются следующие эффекты:

1) **снижение выбросов CO_2** . При взаимодействии дымовых газов с морской водой часть углекислого газа растворяется в воде, что способствует снижению его концентрации в дымовых газах. Диоксид углерода вместе с образовавшимся концентратом покидает опреснительную установку;

2) **удаление SO_2 и других загрязнителей**. Морская вода эффективно улавливает диоксид серы (SO_2) и другие вредные примеси, такие как сажа и твердые частицы. Удаление этих веществ из дымовых газов снижает их выбросы в атмосферу и уменьшает кислотные осадки, способствуя улучшению качества воздуха;

3) **охлаждение дымовых газов**. Взаимодействие дымовых газов с морской водой также способствует их охлаждению. Снижение температуры выбросов позволяет снизить локальные тепловые выбросы и их воздействие на окружающую среду.

Методы исследования. Для исследования влияния различных параметров на эффективность работы опреснительной

установки были использованы методы балансовых расчетов [8, 9].

Для расчета параметров работы установки в характерных точках схемы необходимо обладать сведениями о влагосодержании и энтальпии дымовых газов после энергетической установки, после контакта с распыляемой водой, а также после осушки. Температура уходящих газов после энергетической установки считается известной. В ходе расчета термодинамических параметров дымовых газов используется модель идеального газа, основанная на уравнении состояния Менделеева-Клапейрона [10].

Влагосодержание дымовых газов после энергетической установки рассчитывается по формуле

$$d_1 = \frac{G_{H_2O}}{G_{пс} - G_{H_2O}}, \quad (1)$$

где G_{H_2O} – массовый расход водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания, кг/с; $G_{пс}$ – расход продуктов сгорания, кг/с.

При этом расход водяных паров может быть рассчитан на основе теории горения.

Энтальпия дымовых газов во всех характерных точках схемы определяется в соответствии с выражением

$$h_i = h_{пс,i} \left(1 - \frac{d_i}{d_i + 1} \right) + h_{в.п,i} \frac{d_i}{d_i + 1}, \quad (2)$$

где $h_{пс,i}$ – энтальпия продуктов сгорания при температуре и давлении в i -й точке схемы, кДж/кг; $h_{в.п,i}$ – энтальпия водяных паров при температуре и давлении в i -й точке схемы, кДж/кг; d_i – влагосодержание продуктов сгорания в i -й точке схемы, кг/кг с.г.

Энтальпия продуктов сгорания в характерных точках схемы определяется с учетом состава уходящих газов.

Влагосодержание в точках 2 и 3 определяется согласно выражению

$$d = \frac{\mu_{H_2O}}{\mu_{сух,дг}} \frac{p_n \varphi}{B - p_n \varphi}, \quad (3)$$

где μ_{H_2O} – молярная масса воды, кг/кмоль; $\mu_{сух,дг}$ – молярная масса сухих дымовых газов, кг/кмоль; p_n – давление насыщения водяных паров, Па; φ – относительная влажность, в долях; B – общее давление смеси, Па.

Молярная масса сухой части уходящих газов рассчитывается с учетом частичной очистки продуктов сгорания от CO_2 и SO_2 .

Положение точки 2 зависит от исходного состояния продуктов сгорания, так как процесс 1-2 является адиабатическим, то энтальпия продуктов сгорания в точке 1 соответствует энтальпии в точке 2. Температура продуктов сгорания в данной точке соответствует температуре мокрого термометра дымовых газов. При этом влажность дымовых газов находится в диапазоне от 95 до 97 %.

В качестве исходных данных в расчетах используются: расход продуктов сгорания; солёность и температура исходной опресняемой воды; солёность концентрата; солёность пресной воды.

Для определения производительности установки составляются уравнения теплового и материального балансов контактной колонны. При этом в качестве допущения не учитываются тепловые эффекты от химических реакций, протекающих между продуктами сгорания и морской водой.

Уравнение материального баланса для контактной камеры опреснительной установки записывается следующим образом:

$$G_{дг} + G_m = W' + G_k, \quad (4)$$

где $G_{дг}$ – расход дымовых газов, покидающих энергетическую установку, кг/с; G_m – расход морской воды, поступающей на опреснение, кг/с; W' – расход увлажнённых очищенных дымовых газов после контакта с морской водой, кг/с; G_k – расход концентрата, кг/с.

Уравнение солевого баланса газоконтактной опреснительной установки имеет вид

$$G_m S_m = G_o S' + G_k S_k, \quad (5)$$

где S_m – солёность исходной морской воды, ‰; S' – солёность обессоленной воды, ‰; S_k – солёность концентрата, ‰; G_o – расход обессоленной воды, кг/с;

Уравнение теплового баланса колонны газоконтактной опреснительной установки с адиабатным увлажнением дымовых газов имеет вид:

$$B_{пс} h_1 + G_m c_m t = G_k c_k t_k + W' h_2, \quad (6)$$

где $B_{пс}$ – расход дымовых газов, поступающих в контактную колонну, кг/с; h_1 – энтальпия дымовых газов на входе в контактную колонну, кДж/кг; c_m – средняя массовая теплоёмкость морской воды, кДж/(кг·К); t – температура морской воды на входе в контактную колонну, °C; c_k – средняя массовая теплоёмкость концентрата, кДж/(кг·К); t_k – температура концентрата, °C; h_2 – энтальпия

дымовых газов на выходе из контактной колонны, кДж/кг.

Морская вода характеризуется сложными физико-химическими свойствами, что объясняется многообразием ее состава. Вещества, содержащиеся в составе морской воды, классифицируются на растворенные в ней соли, газы, электролиты, неэлектролиты и органические соединения, а также находящиеся в форме самостоятельной фазы твердые частицы и газовые пузыри. Следует учитывать, что содержание веществ в воде непостоянно и зависит от климатических условий, температурных факторов, глубины отбора воды.

Физические свойства морской воды, кинетика протекающих в ней химических процессов определяются свойствами воды как растворителя и составом растворенных в ней веществ.

В основном растворенные в воде элементы обычно находятся не в чистом виде, а в виде соединений, например:

- 1) хлоридов (NaCl , MgCl_2 , KCl);
- 2) сульфатов (MgSO_4 , CaSO_4 , K_2SO_4);
- 3) карбонатов (CaCO_3).

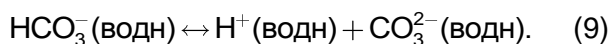
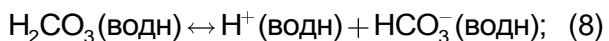
При взаимодействии морской воды и дымовых газов могут происходить химические реакции, которые зависят от состава дымовых газов и химического состава морской воды. Основные компоненты дымовых газов включают углекислый газ (CO_2), оксиды серы (SO_2 и SO_3), оксиды азота (NO_x) и др. Морская вода содержит соли, главным образом хлорид натрия (NaCl).

Рассмотрим основные реакции, которые происходят в контактной колонне опреснительной установки.

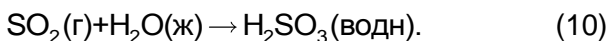
1. Растворение углекислого газа



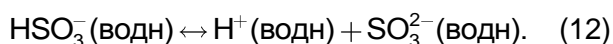
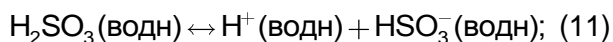
Далее угольная кислота может диссоциировать:



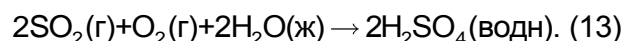
2. Реакции с оксидами серы:



Сернистая кислота может диссоциировать:

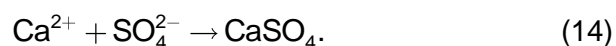


Также возможно окисление сернистой кислоты до серной кислоты:

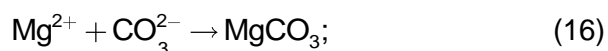
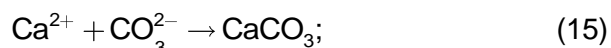


3. Образование осадков.

Некоторые реакции могут приводить к образованию нерастворимых солей, которые выпадают в осадок. Например, сульфат ионы могут реагировать с кальцием, образуя сульфат кальция:



Карбонаты могут реагировать с кальцием и магнием, образуя карбонат кальция и карбонат магния:



4. Ионные обменные реакции.

Сульфат магния в воде может взаимодействовать с хлоридом кальция, образуя осадок сульфата кальция:



Таким образом, оксиды углерода и серы из газообразного состояния преобразуются в новые соединения и в жидком или твердом виде находятся в концентрате, тем самым снижается негативное воздействие на атмосферу.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при работе газоконтактной опреснительной установки будет осуществляться очистка дымовых газов, что будет способствовать снижению углеродного следа, в том числе, за счет использования вторичных энергетических ресурсов.

Результаты исследования. В результате теплового расчета газоконтактной опреснительной установки был получен ряд зависимостей, отражающих влияние температуры уходящих газов и солености опресняемой воды на производительность установки.

Основным параметрами, влияющими на производительность установки, являются температура и влагосодержание уходящих газов, поскольку предельно допустимое количество влаги, уносимое дымовыми газами при контакте с опресняемой водой, определяется температурой мокрого термометра данных продуктов сгорания. При этом чем выше температура уходящих газов, тем больше влаги они смогут удерживать. Зависимости влагосодержания и температуры по мокрому термометру от температуры уходящих газов приведены на рис. 3.

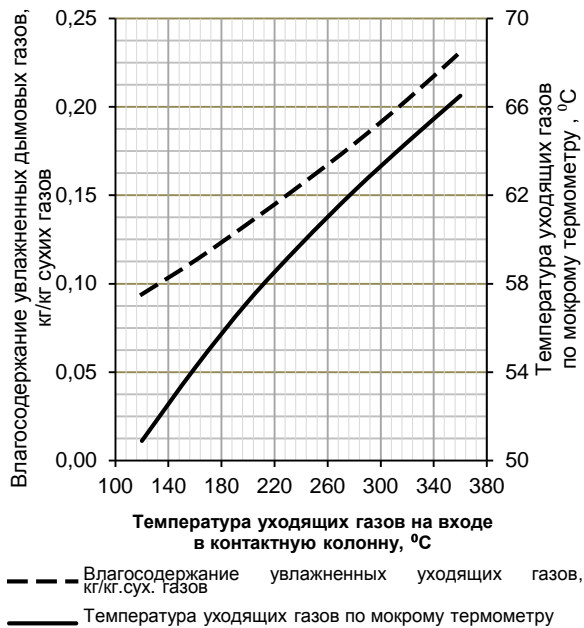


Рис. 3. Зависимость влагосодержания и температуры уходящих газов по мокрому термометру от температуры уходящих газов на входе в контактную колонну

Анализ полученных зависимостей (рис. 3) показывает, что зависимость влагосодержания и температуры дымовых газов по мокрому термометру носит нелинейный характер, при изменении температуры уходящих газов на входе в контактную колонну с 365 до 120 °C температура уходящих газов по мокрому термометру меняется от 66,5 до 50,9 °C, что соответствует влагосодержанию 0,231 и 0,094 кг/кг с.г. соответственно.

Зависимость производительности установки от расхода уходящих газов и их температуры приведена на рис. 4.

Представленные на рис. 4 зависимости получены при заданном влагосодержании поступающих в установку дымовых газов, равном 0,062 кг/кг с.г. Влагосодержание рассматриваемых дымовых газов, полученных в результате сжигания малосернистого мазута, определено в соответствии с выражением (1).

Необходимо отметить, что температура осушки принята равной 40 °C, поскольку при более низких температурах влагосодержание уходящих газов меняется незначительно. Кроме того, при выполнении расчетов соленость опресняемой воды принята равной 30 ‰, соленость получаемого дистиллята — 1 г/л.

Анализ представленной на рис. 4 зависимости показывает, что при температуре

уходящих газов 365 °C (в расчетах принята температура продуктов сгорания после судового двигателя, работающего на малосернистом мазуте) расход получаемой обессоленной воды и расход дымовых газов соотносятся как 1:5. При понижении температуры уходящих газов на входе в установку до 120 °C расход дымовых газов для получения того же количества пресной воды возрастает при прочих равных условиях в 2,62 раза.

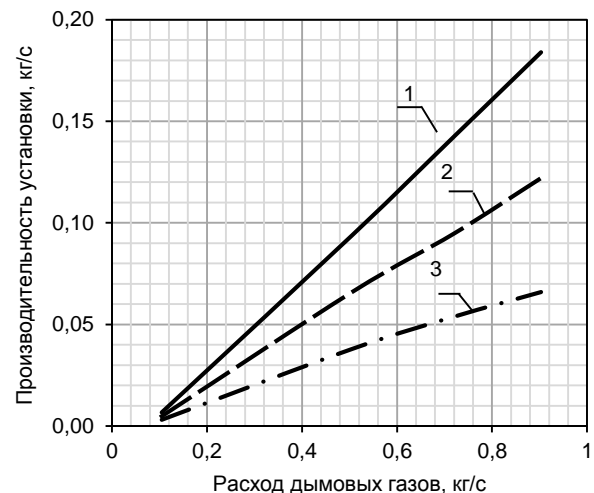


Рис. 4. Зависимость производительности установки от температуры и расхода уходящих газов: 1 — температура уходящих газов 365 °C; 2 — температура уходящих газов 260 °C; 3 — температура уходящих газов 120 °C

Другим фактором, оказывающим влияние на эффективность работы установки, является соленость опресняемой воды. При ее возрастании снижается производительность установки. Для получения одного и того же количества пресной воды в таком случае в установку должно поступать большее количество морской воды, что приводит к возрастанию затрат энергии на ее перемещение. На рис. 5 представлена зависимость требуемого расхода морской воды, поступающей в установку для получения одного и того же количества пресной воды при расходе дымовых газов 1 кг/с, от солености и температуры уходящих газов.

Анализ данных зависимостей показывает, что увеличение солености от 10 до 90 ‰ приводит к росту расхода морской воды при температуре уходящих газов 365 °C на 8,5 %. Необходимо отметить, что при меньших температурах уходящих газов рост данной величины находится ориентировочно на том же уровне.

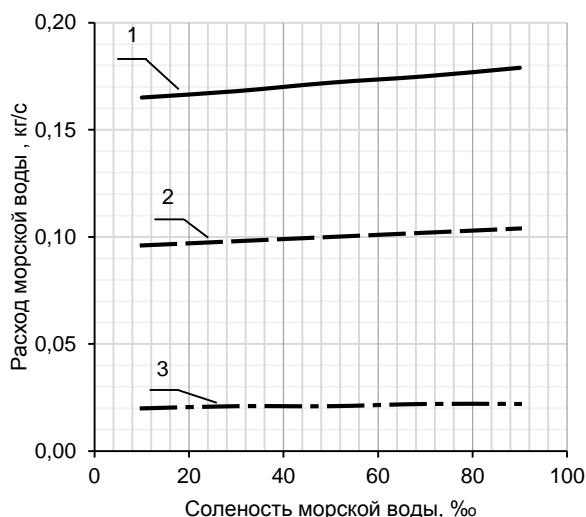


Рис. 5. Зависимость расхода морской воды от солености и температуры уходящих газов: 1 – температура уходящих газов 365 °C; 2 – температура уходящих газов 260 °C; 3 – температура уходящих газов 120 °C

В ходе работы контактных опреснителей образуется концентрат, который содержит в себе различные соли и кислоты. Обращение с этим концентратом требует особого внимания. Одним из возможных вариантов его утилизации является его захоронение, а также использование для получения различных солей, производства хлора и натрия.

Выводы. Таким образом, применение разработанной тепловой схемы позволяет получать обессоленную воду, которая может использоваться для технических нужд. Кроме этого, в процессе опреснения при работе предлагаемой установки осуществляется очистка уходящих газов, что позволяет снизить их негативное влияние на окружающую среду.

Предложенное техническое решение может использоваться на судах, котельных, и ТЭЦ, расположенных на прибрежных территориях и функционирующих на органическом топливе.

В результате выполненных балансовых расчетов установлено, что снижение температуры уходящих газов с 365 до 120 °C приводит к уменьшению производительности опреснителя в 2,62 раза при работе установки на дымовых газах, полученных в результате сжигания малосернистого мазута.

При увеличении солености исходной воды требуемый расход поступающей в установку морской воды возрастает на 8–10 % при изменении солености с 10 до 90 г/л.

Суммарное энергопотребление установки состоит из затрат энергии на привод нагнетательных устройств (газодувок и насосов).

Список литературы

1. Кальметова А.Г., Кулешов О.Ю. Энергоэффективные проектные решения котельных с глубокой утилизацией теплоты дымовых газов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – № 13(70). – С. 127–129.
2. Хамидуллин Р.Н. Рекуперация тепла дымовых газов контактным теплообменом // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 88–90.
3. Чехранов С.В., Симашов Р.Р., Ханькович И.Н. Развитие теплоутилизационных технологий в судовой энергетике // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3-2(37). – С. 107–111.
4. Алиева О.О. Технология утилизационного опреснения морской воды // Вестник науки и образования. – 2022. – № 1-1(121). – С. 36–41.
5. Слесаренко В.Н. Дистилляционные опреснительные установки. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.
6. Наими А., Рассохин В.А. Эффективность газотурбинного цикла с впрыском пара и анализ его взаимодействия с опреснительной установкой // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 2(55). – С. 58–68.
7. Ковалев О.П. Тепломассообмен в контактных пленочных аппаратах судовых утилизационной опреснительной установки на дымовых газах (разработка методики теплового расчета): дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 1984. – 171 с.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666115 Российская Федерация. Расчет тепловой схемы газоконтактной опреснительной установки / М.В. Козлова, А.В. Банников, В.М. Лапшова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – № 2024664340: заявл. 24.06.2024; опублик. 10.07.2024.
9. Козлова М.В., Банников А.В., Банникова С.А. Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 5. – С. 21–30.
10. Козлова М.В., Соколов П.С., Банников А.В. Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 4. – С. 5–13.

References

1. Kal'metova, A.G., Kuleshov, O.Yu. Energoeffektivnye proektnye resheniya kotel'nykh s glubokoy utilizatsiey teploty dymovykh gazov [Energy-efficient design solutions for boiler houses with deep utilization of flue gas heat]. *Matematicheskie metody v*

tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT, 2014, no. 13(70), pp. 127–129.

2. Khamidullin, R.N. Rekuperatsiya tepla dymovykh gazov kontaktnym teploobmenom [Heat recovery flue gases by contact heat exchange]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 2, pp. 88–90.

3. Chekhranov, S.V., Simashov, R.R., Khan'kovich, I.N. Razvitie teploutilizatsionnykh tekhnologiy v sudovoy energetike [Development of thermal insulation technologies in marine power engineering]. *Morskoe intellektual'nye tekhnologii*, 2017, no. 3-2(37), pp. 107–111.

4. Alieva, O.O. Tekhnologiya utilizatsionnogo opresneniya morskoy vody [Technology of utilization of seawater desalination]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2022, no. 1-1(121), pp. 36–41.

5. Slesarenko, V.N. *Distillyatsionnye opresnitel'nye ustanovki* [Distillation desalination plants]. Moscow: Energiya, 1980. 248 p.

6. Naimi, A., Rassokhin, V.A. Effektivnost' gazoturbinnogo tsikla s vpryskom para i analiz ego vzaimodeystviya s opresnitel'noy ustanovkoy [Efficiency of a gas turbine cycle with steam injection and analysis of its interaction with a desalination plant]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 2(55), pp. 58–68.

7. Kovalev, O.P. *Teplomassoobmen v kontaktnykh plenochnykh apparatakh sudovoy utilizatsionnoy opresnitel'noy ustanovki na dymovykh gazakh (razrabotka metodiki teplovogo rascheta)*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer in contact film apparatuses of a shipboard waste gas desalination plant (development of a thermal calculation methodology). Cand. tech. sci. diss.]. Vladivostok, 1984. 171 p.

8. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Lapshova, V.M. *Raschet teplovoy skhemy gazokontaktной opresnitel'noy ustanovki* [Calculation of the thermal circuit of a gas-contact desalination plant]. Certificate RF of state registration of the computer program, no. 2024666115, 2024.

9. Kozlova, M.V., Bannikov, A.V., Bannikova, S.A. Issledovanie raboty termicheskoy opresnitel'noy ustanovki s kontaktnym isparitelem i kompressiey parovozdushnoy smesi [Investigation of the operation of a thermal desalination plant with a contact evaporator and compression of a steam-air mixture]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 5, pp. 21–30.

10. Kozlova, M.V., Sokolov, P.S., Bannikov, A.V. Issledovanie vliyaniya real'nykh fizicheskikh svoystv vlazhnogo vozdukha na tochnost' rascheta teplomassoobmennyykh protsessov [Investigation of the influence of real physical properties of humid air on the accuracy of calculation of heat and mass transfer processes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 4, pp. 5–13.

УДК 621.187

Андрей Борисович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Борис Михайлович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: 292714@mail.ru

Ксения Владимировна Зотова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: ks.zotova@bk.ru

Расчет значений pH_t при рабочих параметрах теплоносителя второго контура АЭС с ВВЭР

Авторское резюме

Состояние вопроса. Основной задачей водно-химического режима второго контура АЭС является обеспечение безаварийной работы основного оборудования посредством поддержания таких физико-химических свойств теплоносителя, которые бы предотвращали коррозионные повреждения конструкционных материалов оборудования и образование отложений на его поверхностях. Скорость коррозии во многом зависит от величины водородного показателя (pH), измерение которого производится в охлажденных пробах (при 25 °С), отобранных в контрольных точках пароводяного тракта. С увеличением температуры изменяются степень диссоциации электролитов, их коэффициенты активности, константы диссоциации воды и растворенных электролитов. Эти изменения приводят к тому, что значения pH , измеренные при 25 °С, не соответствуют реальным значениям водородного показателя при фактических параметрах теплоносителя. В связи с этим очевидна необходимость своевременного контроля pH при фактической температуре среды (pH_t) и коррекция водно-химического режима в случае отклонения этого показателя от нормируемых параметров. Решить поставленную задачу предлагается полумпирически, применяя разработанные математические модели с использованием некоторых данных, полученных с приборов автоматического химического контроля.

Методы и материалы. Математические модели для расчета pH_t составлены на основе уравнений из теории растворов электролитов. Используются ранее полученные температурозависимые значения ионного произведения воды, удельной электропроводности и констант диссоциации электролитов.

Результаты. Разработаны математические модели ионных равновесий теплоносителя в условиях гидразин-аммиачного водно-химического режима. Рассчитаны значения pH_t в водных растворах угольной кислоты и аммиака малых концентраций.

Выводы. Определение высокотемпературного показателя pH_t имеет важное практическое значение, особенно для блоков АЭС с ВВЭР. Полученные результаты показывают, что возможно контролировать этот показатель с помощью уже имеющихся на станции приборов в рамках автоматического химического контроля. Значения термического pH , рассчитанные по разработанным алгоритмам, соразмерны с данными других авторов. Полученные результаты могут быть использованы при составлении усложненных алгоритмов расчета pH_t для промышленных условий.

Ключевые слова: водно-химический режим, автоматический химический контроль, показатели качества теплоносителя, удельная электропроводность, водородный показатель pH , угольная кислота, аммиак

Andrey Borisovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-08, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Boris Mikhailovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-08, e-mail: 292714@mail.ru

Ksenia Vladimirovna Zotova

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, phone (4932) 26-96-08, e-mail: ks.zotova@bk.ru

Calculation of pH_t values at operating parameters of water coolant of the secondary circuit of NPPs with PWR

Abstract

Background. The main issue of the water-chemical mode (WCM) of the secondary circuit of a nuclear power plant (NPP) is to ensure trouble-free operation of the main equipment by maintaining such physical and chemical properties of the coolant that would prevent corrosion and deposition of internal surfaces equipment. The rate of corrosion depends on the pH value, which is measured in cooled samples (at 25 °C) and taken at control points throughout the steam-water circuit. Temperature increasing leads to the change in dissociation of electrolytes, their activity coefficients, and the dissociation constants of water and dissolved electrolytes change. These changes lead to the fact that the pH values measured at 25 °C do not correspond to the real values of the pH value at the operation parameters of the coolant. Therefore, it is necessary to monitor pH value at the actual temperature (pH_t) and, in case of indicator deviations, to correct a water chemistry mode. The problem may be solved semi-empirically, that is to calculate pH_t values using developed mathematical models with some data obtained from chemical monitoring devices.

Materials and methods. Mathematical models to calculate pH_t are based on equations of the theory of electrolyte solutions. Previously obtained temperature-dependent values of the ionic product of water, specific electrical conductivity and dissociation constants of electrolytes have been used.

Results. The authors have developed mathematical models of coolant ionic equilibria under conditions of hydrazine-ammonia water chemistry mode. pH_t values in aqueous solutions of carbonic acid and ammonia have been calculated.

Conclusions. The determination of the high-temperature pH value is of great practical importance, especially for nuclear power plant units with PWR. The results obtained show that it is possible to monitor this indicator using the devices already available at the station for automatic chemical control. The values of thermal pH calculated according to the algorithms developed by the authors are comparable with the results of other studies. The results obtained may be used to develop complex algorithms to calculate pH for industrial conditions.

Key words: water chemistry, automatic chemical monitoring, coolant quality indicators, specific electrical conductivity, hydrogen pH, carbonic acid, ammonia

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.015-022

Введение. Скорость коррозии металлов определяется физико-химическими свойствами водной среды, соприкасающейся с металлом. Кисотно-щелочное равновесие (величина pH) в водном теплоносителе является одним из показателей, характеризующим эти свойства. В связи с изменением степени диссоциации различных примесей и самой воды величины pH при нормальной (pH_{25} , при $t = 25$ °C) и рабочей (pH_t , при $t \leq 300$ °C) температурах не совпадают. Так, например, в продувочной воде парогенераторов энергоблока АЭС с ВВЭР диссоциация аммиака при рабочей температуре полностью подавлена, величина pH_t смещается в «кислую» область, несмотря на то что измеряемая величина pH_{25} остается щелочной. При упаривании кислотные свойства концентрата возрастают и создают реальную угрозу повреждения коллекторов, поскольку сталь 12ГНМФА в «кислой» области подвержена коррозионному

растрескиванию гораздо больше, чем в нейтральной или слабощелочной среде. В этой связи очевидна необходимость введения в регламент химического контроля водно-химического режима (ВХР) контроль величины pH_t , а также необходимость введения коррекционной обработки котловой воды сильными щелочами при отклонении этого показателя в кислую среду [1].

Таким образом, одной из основных задач поддержания физико-химических показателей водного режима теплоносителя и рабочего тела АЭС в пределах, обеспечивающих длительную и надежную эксплуатацию оборудования, является контроль и своевременная коррекция высокотемпературного значения показателя pH_t . В настоящее время не существует надежных способов непосредственного измерения и надежного контроля этого чрезвычайно важного

показателя. Поддержание pH_t в необходимых пределах решается полуэмпирически.

Методы исследования. В продувочной воде парогенераторов второго контура непрерывно контролируется pH_{25} и электропроводность χ_{25} (в некоторых случаях после Н-фильтров). Все остальные показатели контролируются периодически. В таких условиях своевременная коррекция водородного показателя pH_t (измеряемого как ЭДС пары электродов) практически невозможна.

Одним из возможных способов решения данной проблемы (способ 1) является создание аналитических моделей, описывающих зависимость величины pH_t от измеряемых параметров водной среды, допускающих непрерывный мониторинг и не требующих разработки и внедрения новых приборов контроля. Однако определять pH_t можно по измерению удельной электропроводности χ_t водного теплоносителя при фактических параметрах рабочей среды (способ 2):

$$1000 \cdot \chi_t = (\lambda_{0,H^+} + \lambda_{0,OH^-}) C_{H^+}; \quad (1)$$

$$\Lambda_{0,t}^{H_2O} = \frac{1000 \cdot \chi_t}{\sqrt{K_{w,t}}}; \quad (2)$$

$$pH_t = -\lg \left(\frac{1000 \chi_t}{\Lambda_{0,t}} \right), \quad (3)$$

где χ_t – измеренное значение удельной электропроводности воды при фактической температуре, См/см; $K_{w,t}$ – ионное произведение воды при фактической температуре среды.

При этом измерение χ_t теплоносителя проводится специальным датчиком.

В [2] описан опыт, реализованный при нагревании обессоленной воды в титановом автоклаве до температуры 350 °С по линии насыщения со скоростью 30 °С в час (рис. 1). Полученные данные по изменению удельной электропроводности воды с ростом температуры представлены в табл. 1.

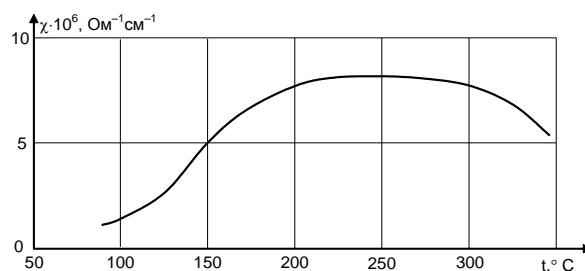


Рис. 1. Зависимость удельной электропроводности обессоленной воды от температур

Таблица 1. Изменение удельной электропроводности воды в зависимости от температуры, $\chi_{t,H_2O} = f(t)$

Нагрев		Охлаждение	
t °С	χ , мкСм/см	t °С	χ , мкСм/см
23	0,75	342	5,79
83	1,82	340	6,55
94	2,12	332	6,87
106	2,53	325	7,01
120	3,04	319	7,68
130	3,84	315	7,92
155	5,40	310	7,98
180	6,95	305	8,42
197	7,83	300	8,70
220	8,12	295	8,83
236	8,38	290	9,29
252	8,55	276	10,01
264	8,55	270	10,01
280	8,38	255	10,02
290	8,20	251	10,01
301	7,81	244	10,79
315	7,17	217	10,73
325	6,73	205	10,70
327	6,09	195	10,60
342	5,78	180	10,00
343	5,65	160	9,33
		158	8,39
		147	7,57
		100	4,84

После нагрева и выдержки на максимальной температуре проводилось плавное охлаждение автоклава. Разность значений удельной электропроводности прямого и обратного хода может быть объяснена как инерционностью тепловых процессов, так и химическими процессами при контакте глубоко обессоленной воды со стенками автоклава.

Представленные данные (табл. 1, рис. 1) показывают сложный характер изменения χ_t воды, а измеренные значения могут использоваться для расчета показателя pH_t .

При использовании первого способа необходимо знать измеренные значения χ_{25} и концентрации ионных примесей, влияющих на pH , при использовании второго способа – измеренные значения χ_t и в обоих способах – константы диссоциации воды $K_{w,t}$ и ионогенных примесей $K_{i,t}$.

Решение задачи расчетного определения pH_t первым способом может быть выполнено с использованием анализатора «Лидер АПК», разработанного на кафедре Химии и химических технологий в энергетике ИГЭУ совместно с «НПП Техноприбор» (г. Москва) [3]. В этом случае по измеренным значениям удельной электропроводности (χ и χ_H) в охлажденных пробах водного теплоносителя рассчитываются концентрации ионных примесей, а затем производится расчет значений pH_t при рабочей температуре водной среды с использованием математической модели (ММ) ионных равновесий в «чистой» воде и предельно разбавленных растворах.

Анализ ионных равновесий в «чистой воде» дает следующее. Применяя уравне-

ние электропроводности (1) и учитывая характер изменения ионного произведения воды $K_{w,t}$ в зависимости от температуры (рис. 2), можно рассчитать значения эквивалентной электропроводности воды (ионов H^+ и OH^-) по выражению (2) и значения показателей pH_t по выражению (3).

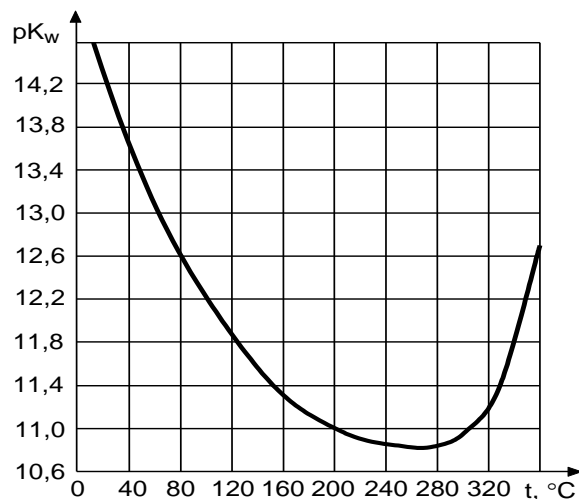


Рис. 2. Зависимость pK_w от температуры (на линии насыщения)

Однако значение ионного произведения $K_{w,t}$ не учитывает изменения плотности воды с ростом температуры $\rho = f(t)$, что при увеличении удельного объема $v = \frac{1}{\rho}$ дает уменьшение концентрации ионов H^+ и OH^- [2, 4, 8].

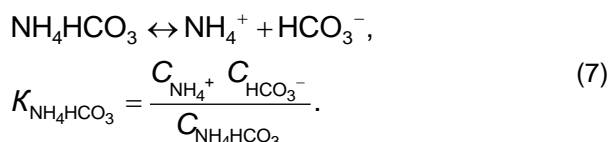
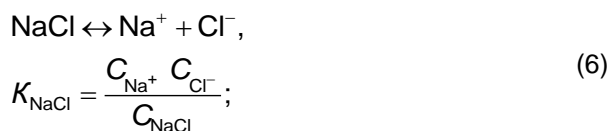
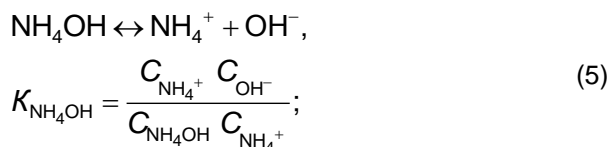
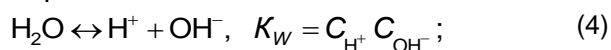
Использование измерения электропроводности воды для расчета pH_t требует учета изменения концентраций ионов в воде с ростом температур в форме $C_0 \cdot \rho$ (табл. 2).

Таблица 2. Некоторые физико-химические характеристики водного теплоносителя в диапазоне температур 25–350 °C (по линии насыщения)

Показатели	Температура, °C							
	25	50	100	150	200	250	300	350
Удельный объем, dm^3/kg	1,01	1,01	1,04	1,09	1,15	1,25	1,4	1,74
Плотность, kg/m^3	1000	990,1	958,0	915,7	869,6	800,0	714,3	574,5
Вязкость, mPa	–	3,55	2,75	1,90	1,40	1,10	0,85	0,75
pK_w	14,0	13,4	12,2	11,4	11,0	10,8	11,0	12,2
$pH(t)$ (при C_{H^+} , моль/кг)	7,0	6,7	6,1	5,7	5,5	5,4	5,5	6,1
$pH(t)$ (при C_{H^+} , моль/ dm^3)	7,0	6,70	6,12	5,74	5,56	5,50	5,65	5,34
$\Lambda_0^{H_2O}$, $cm \cdot cm^2 \cdot mol^{-1}$	550	825	3079	2786	2864	2678	3480	1096
Удельная электропроводность χ_t , $mcSm/cm$	–	–	2,34	5,09	7,87	8,53	7,85	5,0

Представленные в табл. 2 данные ($\text{pH}(t)$, $\Lambda_0^{\text{H}_2\text{O}}$, удельная электропроводность (χ_t)) могут служить исходными данными для расчета pH_t по измерениям χ_t как в чистой воде, так и в предельно разбавленных водных растворах, какими являются питательная вода и пар энергетических установок.

Диссоциацию электролитов в питательной воде можно записать следующими выражениями:



Уравнение электронейтральности запишется в виде

$$C_{\text{H}^+} + C_{\text{NH}_4^+} + C_{\text{Na}^+} = C_{\text{OH}^-} + C_{\text{HCO}_3^-} + C_{\text{Cl}^-}. \quad (8)$$

Уравнение электропроводности запишется в виде

$$1000 \cdot \chi = \lambda_{\text{H}^+} C_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{OH}^-} C_{\text{OH}^-} + \lambda_{\text{NH}_4^+} C_{\text{NH}_4^+} + \lambda_{\text{Na}^+} C_{\text{Na}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-} C_{\text{Cl}^-} + \lambda_{\text{HCO}_3^-} C_{\text{HCO}_3^-}, \quad (9)$$

где χ – удельная электропроводность воды (водного раствора) при фактической температуре среды (χ_t , мкСм/см); C_i – концентрации соответствующих ионов, моль-экв/дм³; λ_i – эквивалентные электропроводности соответствующих ионов, См·см²·моль(экв)⁻¹, при фактической температуре среды ($\lambda_{i,t}$) (при малых концентрациях ионогенных примесей питательной воды значения λ_i могут быть приняты равными их предельным подвижностям при бесконечном разбавлении ($\lambda_{0,i}$)).

Зависимости эквивалентной электропроводности при бесконечном разбавлении некоторых электролитов от плотности воды на линии насыщения ($\lambda_{0,i} = f(\rho)$) могут быть взяты из литературы [2, 5].

Зависимость эквивалентной электропроводности малых концентраций некоторых электролитов приведены на рис. 3 [6].

Необходимые для расчетов значения констант диссоциации электролитов в зависимости от плотности воды на линии насыщения приведены на рис. 4 по данным [2, 6, 9].

Дозировка аммиака или другого подщелачивающего вещества в питательную воду проводится, прежде всего, для нейтрализации угольной кислоты, поступающей с добавочной водой, с присосами воды в конденсаторе ПТУ.

На основании полученных значений констант диссоциации угольной кислоты, электропроводности ее водных растворов с ростом температуры [5, 7, 10] можно оценить ее влияние на значение pH_t в области малых концентраций угольной кислоты.

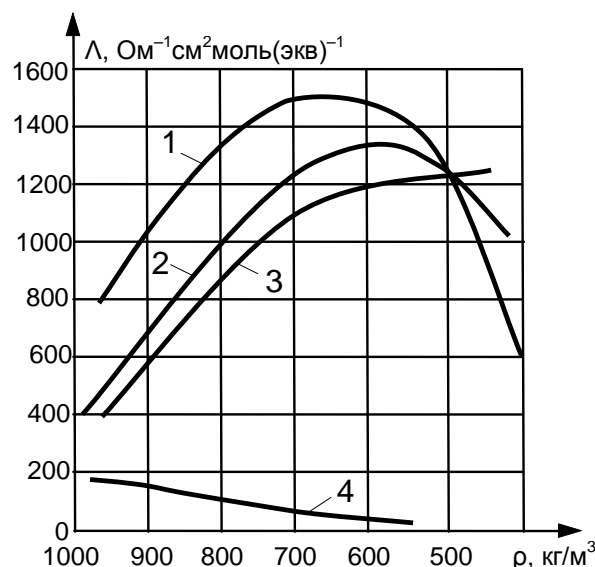


Рис. 3. Зависимость эквивалентной электропроводности примесей теплоносителя от плотности воды на линии насыщения: 1 – HCl ($C = 10^{-4}$ моль/кг); 2 – NaOH ($C = 10^{-4}$ моль/кг); 3 – NaCl ($C = 10^{-4}$ моль/кг); 4 – NH_4OH ($C = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/кг)

В [7] предложен метод расчета молярной (эквивалентной) электропроводности растворов угольной кислоты в широком диапазоне концентраций и температур. Метод основан на использовании уравнения, преобразованного из закона Оствальда, при степени диссоциации $\alpha \ll 1$:

$$\Lambda = \Lambda_0 \sqrt{\frac{K_d}{C}}, \quad (10)$$

где Λ – эквивалентная электропроводность раствора с концентрацией C (моль/дм³); Λ_0 – предельная эквивалентная электропроводность, Ом⁻¹·см²·моль(экв)⁻¹; K_d – константа диссоциации угольной кислоты при фактической температуре среды, моль/дм³.

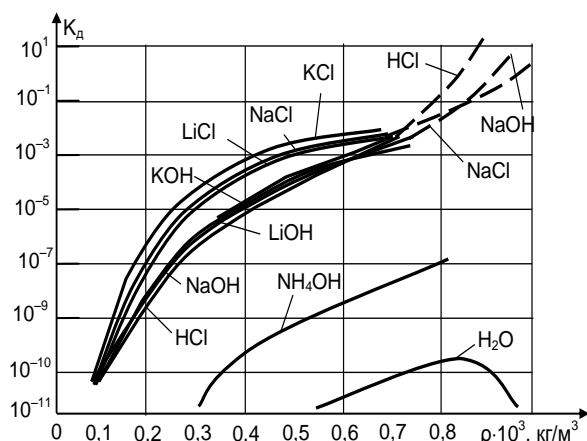
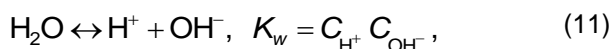


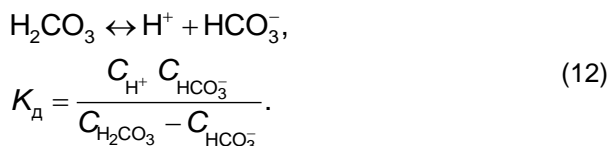
Рис. 4. Зависимость констант диссоциации электролитов от плотности воды на линии насыщения

Зависимость первой константы диссоциации угольной кислоты от температуры приведена на рис. 5.

Равновесие ионов в воде, содержащей угольную кислоту, выражается уравнением диссоциации воды:



и уравнением диссоциации угольной кислоты, в первом приближении рассмотренном по первой ступени:



Уравнение электронейтральности можно записать следующим образом:

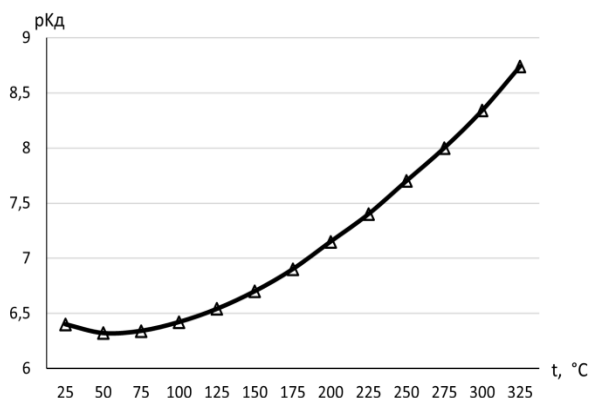


Рис. 5. Зависимость первой константы диссоциации угольной кислоты от температуры

Результаты исследования. Ввиду малости концентраций солевых компонентов в питательной воде по сравнению с NH_4OH их вкладом в расчетную величину pH_i можно пренебречь и рассмотреть упрощенный вариант состава примесей воды, например, как водный монораствор аммиака [5]. В этом случае к уравнениям ионных равновесий (4) и (5) добавится уравнение электропроводности:

$$1000 \cdot \chi = \lambda_{0,\text{NH}_4^+} C_{\text{NH}_4^+} + \lambda_{0,\text{OH}^-} C_{\text{OH}^-}, \quad (14)$$

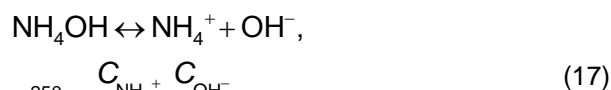
которое в первом приближении (учитывая небольшое различие концентраций NH_4^+ и OH^- в водном растворе) можно записать в виде

$$1000 \cdot \chi = \Lambda_{0,\text{NH}_4\text{OH}} C_{\text{OH}^-}. \quad (15)$$

Решая совместно уравнения (4), (5), (15), можно определить такие характеристики, как pH_i , степень диссоциации NH_4OH , эквивалентную электропроводность $\Lambda_{\text{NH}_4\text{OH}}$ при фактической температуре среды.

Рассмотрим решение изложенной задачи, например, для водного раствора аммиака концентрацией $2 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ (C_0) при температуре 250 °C (523 K). При этом имеем:

- уравнения ионных равновесий:



- уравнение электронейтральности



- уравнение электропроводности

$$1000 \cdot \chi^{250} = \Lambda_{\text{NH}_4\text{OH}}^{250} C_{\text{OH}^-}. \quad (19)$$

По приведенным литературным источникам, можно считать известными следующие данные (при $t = 250$ °C): $\rho = 800$ кг/дм³; $K_d = 1 \cdot 10^{-6}$ моль/дм³; $\text{pK}_w = 10,8$. Значение удельной электропроводности раствора аммиака можно принять по [5] равным

$$\chi_{\text{NH}_4\text{OH}}^{250} = 14 \text{ мкСм/см}.$$

Решая в отношении C_{OH^-} квадратное уравнение

$$a \cdot C_{\text{OH}^-}^2 + a \cdot 10^{-6} \cdot C_{\text{OH}^-} - 10^{-6} \cdot C_0 = 0, \quad (20)$$

полученное преобразованием уравнения (13)

в предположении $a = \frac{C_{\text{NH}_4^+}}{C_{\text{OH}^-}} = 0,8$, получим

$C_{\text{OH}^-} = 1,53 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³. Тогда из уравнения (12) найдем $C_{\text{H}^+} = 1,03 \cdot 10^{-6}$ моль/дм³ и далее $\text{pH}_{250} = 5,99$ (для сравнения, pH «чистой» воды при $t = 250$ °С составляет $\text{pH}_{250} = 5,4$).

В случае с водным монораствором угольной кислоты, решая систему уравнений (10)–(13) в отношении концентрации ионов водорода и предполагая, что $C_{\text{OH}^-} \ll C_{\text{H}_2\text{CO}_3} - C_{\text{H}^+}$, получим квадратное уравнение

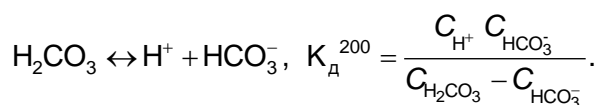
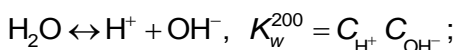
$$C_{\text{H}^+}^2 + K_d C_{\text{H}^+} - (K_d C_{\text{H}_2\text{CO}_3} + K_w) = 0. \quad (21)$$

Тогда

$$C_{\text{H}^+} = \frac{-K_d}{2} + \sqrt{\frac{K_d^2}{4} + K_d C_{\text{H}_2\text{CO}_3} + K_w}, \quad (22)$$

где K_d и K_w – константа диссоциации угольной кислоты и константа ионного произведения воды при фактической температуре среды и концентрации угольной кислоты ($C_{\text{H}_2\text{CO}_3}$), моль/дм³.

Например, необходимо рассчитать pH_t для водного раствора угольной кислоты при концентрации (в пересчете на CO_2) 4,4 мг/л или $1 \cdot 10^{-4}$ моль/дм³ и температуре 200 °С. Запишем соответствующие уравнения диссоциации:



Из литературных источников при $t = 200$ °С, находим: $\text{p}K_d = 7,186$, $\text{p}K_w = 11,0$.

После подстановки получим

$$C_{\text{H}^+} = \frac{-K_d}{2} + \sqrt{\frac{K_d^2}{4} + K_d C_{\text{H}_2\text{CO}_3} + K_w} = 4,03 \cdot 10^{-6},$$

из этого следует $\text{pH}_{200}^{\text{CO}_2} = 5,39$ (для «чистой» воды $\text{pH}_{200} = 5,5$).

Выводы. Определение высокотемпературного показателя pH_t имеет важное практическое значение, особенно для блоков АЭС с ВВЭР. Полученные результаты показывают, что возможно контролировать этот показатель с помощью уже имеющихся

на станции приборов в рамках автоматического химического контроля. Значения термического pH , рассчитанные по предложенным алгоритмам, соразмерны с данными других авторов. Полученные результаты использованы при составлении усложненных алгоритмов расчета pH_t для промышленных условий. Расчет показателя pH_t по разработанной методике возможен как с использованием измерений электропроводности в охлажденных пробах анализатором «Лидер АПК», так и путем непосредственных измерений электропроводности при высоких температурах рабочей среды.

Список литературы

1. **Тяпков В.Ф.** Комплексный подход к выбору водно-химического режима II контура в проектах АЭС с ВВЭР-1200 // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 16–20.
2. **Электрофизические** методы исследования свойств теплоносителей / Б.П. Голубев, С.Н. Смирнов, Ю.М. Лукашов, Е.П. Свистунов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.
3. **Измерение** pH в условиях сверхчистой среды конденсата и питательной воды энергоблоков / А.Б. Ларин, Б.М. Ларин, А.Я. Сорокина, С.В. Киет // Теплоэнергетика. – 2018. – № 11. – С. 97–102.
4. **Мартынова О.И.** Международные таблицы и уравнения для ионного произведения воды и пара // Теплоэнергетика. – 1981. – № 1. – С. 74–75.
5. **Мусинова Ю.В., Смирнов С.Н.** Расчет удельной электропроводности водных растворов аммиака // Теплоэнергетика. – 2000. – № 10. – С. 944–945.
6. **Экспериментальные** исследования электрофизических свойств одно-одновалентных электролитов при высоких параметрах состояния / Ю.М. Лукашов, К.Б. Комиссаров, Б.П. Голубев и др. // Теплоэнергетика. – 1975. – № 12. – С. 76–79.
7. **Щербаков В.Н.** Электролитические свойства растворов угольной кислоты и инновационные методы оперативного контроля качества воды типа конденсата на ТЭС // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 24–30.
8. **Marshall W.L., Franck E.U.** Ion product of water substance, 0–1000 °C, 1–10,000 bars. New international formulation and its background // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1981. – Vol. 10. – P. 295.
9. **Wright J.M.** The behavior of electrolytic solutions at elevated temperatures as derived from conductance measurements // WAPD-TM-204. – June, 1961.
10. **Рыженко Б.Н.** О величинах констант диссоциации угольной кислоты при повышенных температурах // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 149, № 3. – С. 639–641.

References

1. Tyapkov, V.F. Kompleksnyy podkhod k vyboru vodno-khimicheskogo rezhima II kontura v proektakh NPPs s VVER-1200 [An integrated approach to the selection of the water-chemical regime of the II circuit in nuclear power plant projects with PWR-1200]. *Teploenergetika*, 2011, no. 5, pp. 16–20.
2. Golubev, B.P., Smirnov, S.N., Lukashov, Yu.M., Svistunov, E.P. *Elektrofizicheskie metody issledovaniya svoystv teplonositeley* [Electrophysical methods for studying the properties of heat carriers]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 184 p.
3. Larin, A.B., Larin, B.M., Sorokina, A.Ya., Kiet, S.V. Izmerenie pH v usloviyakh sverkhchistoy sredy kondensata i pitatel'noy vody energoblokov [Measurement of pH in ultrapure environment of condensate and feed water of power units]. *Teploenergetika*, 2018, no. 11, pp. 97–102.
4. Martynova, O.I. Mezhdunarodnye tablitsy i uravneniya dlya ionnogo proizvedeniya vody i para [International tables and equations for the ionic product of water and steam]. *Teploenergetika*, 1981, no. 1, pp. 74–75.
5. Musinova, Yu.V., Smirnov, S.N. Raschet udel'noy elektroprovodnosti vodnykh rastvorov ammiaka [Calculation of the specific electrical conductivity of aqueous ammonia solutions]. *Teploenergetika*, 2000, no. 10, pp. 944–945.
6. Lukashov, Yu.M., Komissarov, K.B., Golubev, B.P., Smirnov, S.N., Svistunov, E.P. Eksperimental'nye issledovaniya elektrofizicheskikh svoystv odno-odnovalentnykh elektrolitov pri vysokikh parametrah sostoyaniya [Experimental studies of the electrophysical properties of single-monovalent electrolytes at high state parameters]. *Teploenergetika*, 1975, no. 12, pp. 76–79.
7. Shcherbakov, V.N. Elektroliticheskie svoystva rastvorov ugol'noy kisloty i inno-vatsionnye metody operativnogo kontrolya ka-chestva vody tipa kondensata na TES [Electrolytic properties of carbonic acid solutions and innovative methods of operational quality control of condensate-type water at thermal power plants]. *Vestnik DGTU*, 2015, no. 4, pp. 24–30.
8. Marshall, W.L., Franck, E.U. Ion product of water substance, 0–1000 °C, 1–10,000 bars. New international formulation and its background. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1981, vol. 10, p. 295.
9. Wright, J.M. The behavior of electrolytic solutions at elevated temperatures as derived from conductance measurements. WAPD-TM-204, June, 1961.
10. Ryzhenko, B.N. O velichinakh konstant disotsiatsii ugol'noy kisloty pri povyshennykh temperaturakh [On the values of dissociation constants of carbonic acid at elevated temperatures]. *Doklady AN SSSR*, 1963, vol. 149, no. 3, pp. 639–641.

УДК 536.2.023:519:669:699.86

Анатолий Константинович Соколов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Николай Николаевич Смирнов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-89, e-mail: nsmimov@bk.ru

Наталья Николаевна Ярунина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: yarunina.ispu@yandex.ru

Метод комплексного определения зависимости теплофизических характеристик металла от температуры решением обратной задачи теплопроводности

Авторское резюме

Состояние вопроса. Температурные поля материалов, применяемых в теплоэнергетике, влияют на интенсивность передачи теплоты, качество оценки безопасности оборудования и технико-экономические показатели установок. Точность расчета температурных полей в материалах в значительной степени зависит от достоверности значений теплофизических характеристик материалов: температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$, коэффициента теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, и теплоемкости c , $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$. Методы определения теплофизических характеристик постоянно совершенствуются в целях снижения трудоемкости теплофизического эксперимента, упрощения процедур решения обратной задачи теплопроводности для комплексного определения нескольких теплофизических характеристик. В связи с этим разработка и исследование более эффективных методов остаются актуальными.

Материалы и методы. Теплофизические характеристики материалов определены путем решения обратной задачи теплопроводности аналитическими, численными или численно-аналитическими методами с использованием температурных полей, полученных в результате физического эксперимента.

Результаты. Предлагается численно-аналитический метод, который позволяет по результатам одного эксперимента определять зависимости от температуры теплофизических характеристик металла: λ , c и a . Выполнен расчет теплофизических характеристик по температурам поверхностей неограниченной пластины $T(R, \tau_i)$, $T(x=0, \tau_i)$ толщиной $2R$, симметрично нагретой постоянными потоками теплоты q , $\text{Вт}/\text{м}^2$. По простым алгебраическим формулам, полученным из уравнений баланса теплоты для каждого интервала времени $\Delta \tau_{i+1} = \tau_{i+1} - \tau_i$, определены теплофизические характеристики. Для оценки трудоемкости и погрешности метода выполнен численный эксперимент. Методом конечных разностей при $q = 60000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ для 30 моментов времени $0 \leq \tau \leq 2250 \text{ с}$ рассчитаны температуры $T(R, \tau_i)$ и $T(x=0, \tau_i)$ пластины $R = 0,02 \text{ м}$. Исходные зависимости $\lambda_{\text{и}}(T)$ и $a_{\text{и}}(T)$ описаны ломаными линиями. Установлено, что относительные погрешности восстановления $\lambda(T_{\text{ср}})$ не превысили 1 %, а погрешности восстановления $a_{\text{и}}(T_{\text{ср}})$ и $c_{\text{и}}(T_{\text{ср,и}})$ превысили 2 % только в области изменения знака первых производных функций $a_{\text{и}}(T_{\text{ср}})$ и $c_{\text{и}}(T_{\text{ср,и}})$.

Выводы. Предложенный метод позволяет по результатам одного эксперимента рассчитывать зависимости теплофизических характеристик от температуры по простым алгебраическим формулам.

Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, температуропроводность, коэффициент теплопроводности, теплоемкость, квазистационарный режим, численный эксперимент

Anatoly Konstantinovich Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Health and Safety Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-44, e-mail: aks2411@yandex.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Nikolay Nikolaevich Smirnov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-89, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Natalya Nikolaevna Yarinina

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: yarinina.ispu@yandex.ru

Method of complex determination of the dependence of the thermophysical characteristics of metal on temperature by solving the inverse problem of thermal conductivity

Abstract

Background. The temperature fields of materials used in thermal power engineering affect the intensity of heat transfer, the quality of safety assessment of equipment and technical and economic indicators of installations. The accuracy of calculating temperature fields in materials depends significantly on the reliability of the values of the thermophysical characteristics (TC) of materials: thermal diffusivity a , m^2/s , thermal conductivity coefficient λ , $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and heat capacity c , $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$. Methods to determine thermophysical characteristics are constantly being improved to reduce the labor intensity of a thermophysical experiment, simplify the procedures of solving the inverse problem of heat conductivity for complex determination of several thermophysical characteristics. In this regard, the development and study of more effective methods remain relevant.

Materials and methods. The thermophysical characteristics of materials are determined by solving the inverse problem of thermal conductivity using analytical, numerical, or numerical-analytical methods of the temperature field obtained as a result of a physical experiment.

Results. The authors have proposed a numerical and analytical method. Based on the results of one experiment, it allows us to determine the dependence of the metal TC: λ , c and a on the temperature. The calculation of thermophysical characteristics is performed considering the surface temperatures of an unlimited plate $T(R, \tau_i)$, $T(x=0, \tau_i)$ with a thickness of $2R$, symmetrically heated by constant heat fluxes q , W/m^2 . Thermophysical characteristics are determined by simple algebraic formulas derived from the heat balance equations for each time interval $\Delta\tau_{i+1} = \tau_{i+1} - \tau_i$. A numerical experiment is conducted to assess the complexity and error of the method. The temperatures $T(R, \tau_i)$ and $T(x=0, \tau_i)$ of the plate $R = 0,02$ m have been calculated by the finite difference method at $q = 60000$ W/m^2 for 30 time points $0 \leq \tau \leq 2250$ s. The initial dependencies $\lambda(T)$ and $a(T)$ are described by polygonal lines. The relative errors of $\lambda(T_m)$ have not exceeded 1 %, and the errors of $a(T_{m,int})$ and $c(T_{m,int})$ have exceeded 2 % only in the area of changing the sign of the first-order derivatives of the functions $a(T_{m,int})$ and $c(T_{m,int})$.

Conclusions. The proposed method allows us to calculate the dependence of TC on temperature using simple algebraic formulas based on the results of one experiment

Key words: inverse problem of thermal conductivity, thermal conductivity, coefficient of thermal conductivity, heat capacity, quasi-stationary mode, numerical experiment

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.023-030

Введение. В теплоэнергетических объектах широко используются металлы, огнеупорные и теплоизоляционные материалы.

Температурные поля в этих материалах влияют на интенсивность передачи теплоты, качество оценки безопасности оборудования и технико-экономических показателей установок.

Точность расчета температурных полей в материалах в значительной степени зависит от достоверности значений теплофизических характеристики (ТФХ) материалов:

температуропроводности a , $\text{м}^2/\text{с}$; коэффициента теплопроводности λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; теплоемкости c , $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$.

Значения теплофизических характеристик материалов и их зависимости от температуры в основном определяют путем решения обратных задач теплопроводности по параметрам температурных полей $T(x, y, z, \tau)$, полученных в результате теплофизических экспериментов (процессов нагрева или охлаждения материалов).

Разработкой методов решения обратных задач теплопроводности занимались многие научные коллективы. Однако проблема определения теплофизических характеристик материалов остается актуальной, поскольку создаются новые материалы, число которых непрерывно растет, изменяются свойства известных материалов в ходе их эксплуатации, совершенствуются способы формирования температурных полей и процедуры их математического моделирования. Особенно актуально определение зависимости ТФХ от температуры, которая, например, для сталей в области их применения может изменяться в 1,5–2,5 раза.

Обзор и анализ методов определения теплопроводности по нестационарным температурным полям предложены в [1, 2, 3, 4]. Цитирование многих работ с решениями обратных задач теплопроводности представлено в [4, 5].

Определение одной из ТФХ, например коэффициента теплопроводности λ [6], возможно даже для тонкопленочных материалов [6]. Комплексное одновременное определение нескольких ТФХ, например коэффициента теплопроводности λ и теплоемкости или λ и теплопроводности, более сложно и описано в [7–13]. В большей части упомянутых работ для оценки точности определения ТФХ используются численные, а не физические эксперименты.

В [14–17] применяются аналитические методы решения обратных задач теплопроводности, однако численные и численно-аналитические методы, по нашему мнению, более точны и универсальны, так как позволяют учитывать зависимости ТФХ от температуры.

В [7] отмечены недостатки известных методов определения ТФХ и сформулированы основные критерии оптимальности методов:

- удовлетворительная погрешность;
- малая трудоемкость теплофизического эксперимента;
- простота метода решения обратной задачи теплопроводности, доступная инженеру теплотехнику;
- возможность комплексного определения нескольких ТФХ по результатам обработки одного температурного поля.

Методы исследования. В [18, 19, 20] для определения величин температуропроводности a_T по известному температурному полю использован довольно простой (инженерный) метод численно-аналитического моделирования процессов теплопроводности, описанный в [21]. Для решения дифференциального уравнения теплопроводности этим методом предложены аналитические формулы в виде алгебраических выражений, полученных для расчетного интервала времени Δt .

В [7] приведена численно-аналитическая математическая модель температурного поля полуограниченного тела и пример расчета не только температуропроводности a_T , но и коэффициента теплопроводности λ_T , Вт/(м·К) и теплоемкости c , Дж/(м³·К). Комплекс ТФХ (a_T , λ_T , и c) определен по динамике температур на поверхностях пластины $T(x=R, \tau)$, $T(x=0, \tau)$ и потоку теплоты постоянной и заданной величины q , Вт/(м²).

Методика [7] имеет недостатки, которые ограничивают область ее применения:

- она может использоваться только для материалов с низкой теплопроводностью (огнеупорных и теплоизоляционных), так как для металлов период времени, когда их температурное поле можно считать полуограниченным, очень мал;
- ТФХ в результате одного физического эксперимента можно определить только для одной температуры (для нахождения зависимости ТФХ от температуры требуется проведение нескольких экспериментов);

- для вычисления ТФХ на каждом временном интервале необходимо решать систему из трех нелинейных уравнений.

Предлагаемая нами методика лишена отмеченных недостатков: для нахождения зависимости ТФХ металлов от температуры используется чрезвычайно простой алгоритм обработки результатов эксперимента.

ТФХ предполагается определять по динамике изменения двух температур $T(R, \tau)$ и $T(x=0, \tau)$ симметрично нагреваемой постоянным потоком теплоты q , Вт/м², неограниченной пластины толщиной $2R$.

Для того чтобы пластину в форме диска можно было считать неограниченной, предлагается использовать охранные нагреватели [22].

Схема симметричного нагрева пластины постоянными потоками теплоты показана на рис. 1. Охранные нагреватели в форме колец используются, как в патенте [22], для исключения потерь теплоты из зоны, ограниченной основными нагревателями 3. Тепловая изоляция для нагревателей и поверхностей материала условно не показана. Заданная величина потока теплоты q может быть обеспечена, как в патенте [23], с помощью охранных нагревателей, расположенных на наружных поверхностях основных нагревателей 3 (на рис. 1 условно не показаны).

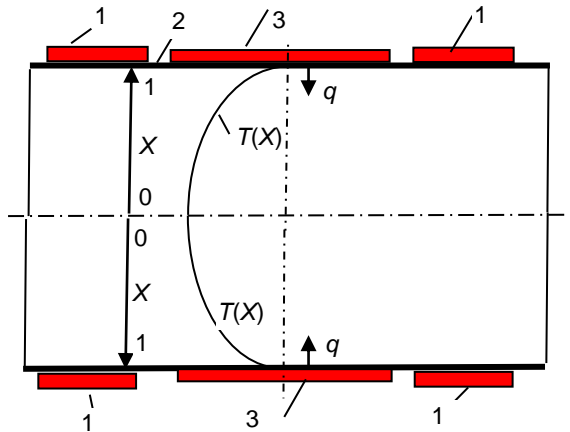


Рис. 1. Схема симметричного нагрева пластины основными и вспомогательными (охранными) нагревателями: 1 – нагреватели вспомогательные; 2 – пластина; 3 – нагреватели основные

Для определения взаимосвязи ТФХ с параметрами $T(R, \tau_i)$, $T(x=0, \tau_i)$ и q , значения которых получены экспериментально в моменты времени τ_i , используем численно-аналитическую модель температурного поля. Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности

$$c \frac{\partial T}{\partial \tau}(X, \tau) = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial X} \lambda \frac{\partial T}{\partial X}(X, \tau) \quad (1)$$

с начальным

$$T(X, \tau=0) = T_0, \quad 0 \leq X \leq 1, \quad X = x/R \quad (2)$$

и граничными условиями теплообмена на поверхностях $X = 1$ и $X = 0$ ($X = x/R$):

$$\frac{\partial T}{\partial X}(1, \tau) = \frac{R}{\lambda} q; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial X}(X=0, \tau) = 0. \quad (4)$$

При граничных условиях (3) и (4) и числе Фурье $Fo > 0,3$ наступит квазистационарный режим нагрева, для которого распределение температур по толщине пла-

стины $0 \leq X \leq 1$ в i -й момент времени τ_i можно описать уравнением параболы

$$T(X) = a_0 + a_1 X^2. \quad (5)$$

Тогда из уравнений баланса теплоты на поверхности $x = R$ ($X = 1$) для расчетного момента времени τ_{i+1} получим выражение для определения λ :

$$\lambda_{i+1} = 0,5 \cdot q R / (T_{1,i+1} - T_{0,i+1}), \quad (6)$$

где $T_{1,i+1} = T(R, \tau_{i+1})$; $T_{0,i+1} = T(X=0, \tau_{i+1})$.

Выражение для определения теплоемкости c получим из уравнения баланса теплоты для пластины толщиной R в расчетном интервале времени $\Delta \tau_{i+1} = \tau_{i+1} - \tau_i$:

$$c_{i+1} = q \Delta \tau_{i+1} / (R (T_{cp,i+1} - T_{cp,i})), \quad (7)$$

где $T_{cp,i+1}$ и $T_{cp,i}$ – среднемассовые по сечению пластины температуры в конце $T_{cp,i+1}$ и начале $T_{cp,i} = T_{cp,ни} = T_{cp,i-1}$ расчетного интервала времени $\Delta \tau_{i+1}$.

Величина $T_{cp,i+1}$ в конце интервала $\Delta \tau_{i+1}$ для распределения температур (5) найдется интегрированием [21]:

$$T_{cp,i+1} = T_{0,i+1} + (T_{1,i+1} - T_{0,i+1}) / 3. \quad (8)$$

Температуропроводности $a_{\tau,i}$ легко определить по известному соотношению:

$$a_{\tau,i+1} = \lambda_{i+1} / c_{i+1}. \quad (9)$$

Таким образом, по данным теплофизического эксперимента, значения λ , c и a_{τ} для каждого расчетного интервала времени можно рассчитать по простым формулам (6)–(9) и получить табличные зависимости $\lambda(T_{cp})$, $a_{\tau}(T_{cp})$ и $c(T_{cp,i})$, где $T_{cp,i}$ – среднеинтегральная температура в интервале времени $\Delta \tau = \tau_{i+1} - \tau_i$:

$$T_{cp,i} = (T_{cp,i} + T_{cp,i+1}) / 2. \quad (10)$$

Результаты исследования. Рассмотрим пример расчета теплофизических характеристик (ТФХ) по результатам экспериментального нагрева стальной неограниченной пластины толщиной $R = 0,02$ м с начальной температурой $T_0 = 300$ К. Теплофизические характеристики стальной пластины опишем ломаными линиями [21]:

$$\begin{aligned} \lambda_{и} &= 63,405 - 32,56 \cdot T / 1000, \quad T \leq 1142,72, \\ \lambda_{и} &= 16,228 + 8,721 \cdot T / 1000, \quad T > 1142,72; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} a_{и} &= (18,1 - 13,4 \cdot T / 1000) \cdot 10^{-6}, \quad T \leq 977,6, \\ a_{и} &= (3,378 + 1,1667 \cdot T / 1000) \cdot 10^{-6}, \quad T > 977,6; \end{aligned} \quad (12)$$

$$c_{и}(T) = \lambda_{и}(T) / a_{и}(T). \quad (13)$$

Пусть на поверхность пластины $x = R$ поступает поток теплоты $q = 60000 \text{ Вт/м}^2$, а поверхность $x = 0$ считается адиабатной (см. рис. 1 и граничные условия (3), (4)).

Покажем, как рассчитать теплофизические характеристики стали для моментов времени $\tau_i = 0, 75, 150 \text{ с}$, для которых известны экспериментальные температуры $T_1(\tau_i) = T(1, \tau_i) = 300, 366,1, 423,6 \text{ К}$ и $T_0(\tau_i) = T(0, \tau_i) = 300, 354,5, 411,6 \text{ К}$.

1. Определим $\lambda(T_{\text{ср}})$, $c(T_{\text{ср},i})$ и $a_{\text{т}}(T_{\text{ср}})$ для первого интервала времени $i+1=1$ ($\tau_1 = 75 \text{ с}$):

$$\lambda_{i+1} = \lambda_1 = 0,5 \cdot q R / (T_{1,i+1} - T_{0,i+1}) =$$

$$= 0,5 \cdot 60000 \cdot 0,02 / (366,1 - 354,5) = 51,7$$

($\lambda_{\text{и}} = 51,7$) (здесь и далее для сравнения ТФХ в скобках будут приведены исходные (истинные) значения ТФХ, соответствующие функциям (11)–(13));

$$T_{\text{ср},i} = T_{\text{ср},\text{ни}} = T_0 = 300,$$

$$T_{\text{ср},i+1} = T_{0,i+1} + (T_{1,i+1} - T_{0,i+1}) / 3 =$$

$$= 354,5 + (366,1 - 354,5) / 3 = 358,4;$$

$$T_{\text{ср},i} = (T_{\text{ср},i} + T_{\text{ср},i+1}) / 2 = (300 + 358,4) / 2 = 329,2;$$

$$c_{i+1} = q \Delta \tau_{i+1} / (R (T_{\text{ср},i} - T_{\text{ср},\text{ни},i})) =$$

$$= 60000 \cdot 75 / (0,02 (358,4 - 300)) = 3,855 \cdot 10^6$$

или

$$c(329,2) = 3,855 \cdot 10^6, (c_{\text{и}}(329,2) = 3,89 \cdot 10^6);$$

$$a_{\text{т}} = \lambda / c = 51,7 / 3,855 \cdot 10^6 = 1,342 \cdot 10^{-5}$$

($a_{\text{и}} = 1,33 \cdot 10^{-5}$).

2. Определим $\lambda(T_{\text{ср}})$, $a_{\text{т}}(T_{\text{ср}})$ и $c(T_{\text{ср},i})$ для второго интервала времени $i+1=2$ ($\tau_2 = 150 \text{ с}$), для которого $T_{\text{ср},\text{ни}} = T_{\text{ср},1} = 358,4$ (!):

$$\lambda_2 = 0,5 \cdot 60000 \cdot 0,02 / (423,6 - 411,6) = 50,0$$

($\lambda_{\text{и}} = 49,9$);

$$T_{\text{ср},2} = 411,6 + (423,6 - 411,6) / 3 = 415,6,$$

$$T_{\text{ср},i} = (T_{\text{ср},i} + T_{\text{ср},i+1}) / 2 = (358,4 + 415,6) / 2 = 387,$$

$$c = 60000 \cdot 75 / (0,02 (415,6 - 358,4)) = 3,93 \cdot 10^6$$

или

$$c(387) = 3,93 \cdot 10^6, c_{\text{и}}(387) = 3,98 \cdot 10^6;$$

$$a_{\text{т}} = 50,0 / (3,93 \cdot 10^6) = 1,27 \cdot 10^{-5} (a_{\text{и}} = 1,25 \cdot 10^{-5}).$$

Таким образом, даже в начале процесса нагрева расчетные (восстановленные) значения ТФХ практически совпали с истинными.

Для других интервалов времени расчеты проводятся по аналогичной методике.

Для более детального исследования возможностей и погрешности предлагаемого метода определены ТФХ пластины стали в диапазоне температур ее применения $300 \leq T \leq \sim 1700 \text{ К}$.

Температурное поле, которое использовалось для определения ТФХ, было получено в результате численного эксперимента.

Температуры поверхностей $T(R, \tau)$, $T(x=0, \tau)$, перепады их по сечению пластины $\Delta T = T(R, \tau) - T(x=0, \tau)$ и величины приращения температуры поверхности $T(R, \tau)$ на каждом временном интервале $\Delta T(\tau) = T(R, \tau_{i+1}) - T(R, \tau_i)$, рассчитанные по программе TRT [21] методом конечных разностей при $q = 60000 \text{ Вт/м}^2$, приведены в таблице.

Результаты расчета нагрева пластины для 31 момента времени

i	$\tau, \text{ с}$	$T(X=1)$	$T(X=0)$	ΔT	$\Delta T(\tau)$	i	$\tau, \text{ с}$	$T(X=1)$	$T(X=0)$	ΔT	$\Delta T(\tau)$
0	0	300	300			16	1200	1067,2	1046,5	20,7	39,2
1	75	366,1	354,5	11,6	66,1	17	1275	1108,8	1087	21,8	41,6
2	150	423,6	411,6	12	57,5	18	1350	1153	1130,2	22,8	44,2
3	225	479,8	467,3	12,5	56,2	19	1425	1198,2	1175,6	22,6	45,2
4	300	534,6	521,6	13	54,8	20	1500	1243,3	1221	22,3	45,1
5	375	587,9	574,5	13,4	53,3	21	1575	1288,3	1266,4	21,9	45
6	450	639,7	625,7	14	51,8	22	1650	1333,3	1311,7	21,6	45
7	525	689,9	675,4	14,5	50,2	23	1725	1378,4	1357	21,4	45,1
8	600	738,4	723,3	15,1	48,5	24	1800	1423,4	1402,3	21,1	45
9	675	785,2	769,6	15,6	46,8	25	1875	1468,4	1447,6	20,8	45
10	750	830,2	813,9	16,3	45	26	1950	1513,3	1492,8	20,5	44,9
11	825	873,3	856,4	16,9	43,1	27	2025	1558,2	1538	20,2	44,9
12	900	914,5	896,9	17,6	41,2	28	2100	1603,1	1583,2	19,9	44,9
13	975	953,6	935,4	18,2	39,1	29	2175	1648	1628,3	19,7	44,9
14	1050	990,8	971,8	19	37,2	30	2250	1692,9	1673,4	19,5	44,9
15	1125	1028	1008,2	19,8	37,2						

Для всех интервалов времени $\Delta\tau = 75$ с были определены (восстановлены) зависимости теплофизических характеристик $\lambda(T_{cp})$, $a_T(T_{cp})$ и $c(T_{cp,i})$ от температур и проведено их сравнение с исходными значениями, которые были заданы функциями (11)–(13).

На рис. 2 показаны исходные $a_i(T_{cp})$ и восстановленные $a_T(T_{cp})$ зависимости температуропроводности от температуры, а на рис. 3 приведены относительные погрешности восстановления теплофизических характеристик.

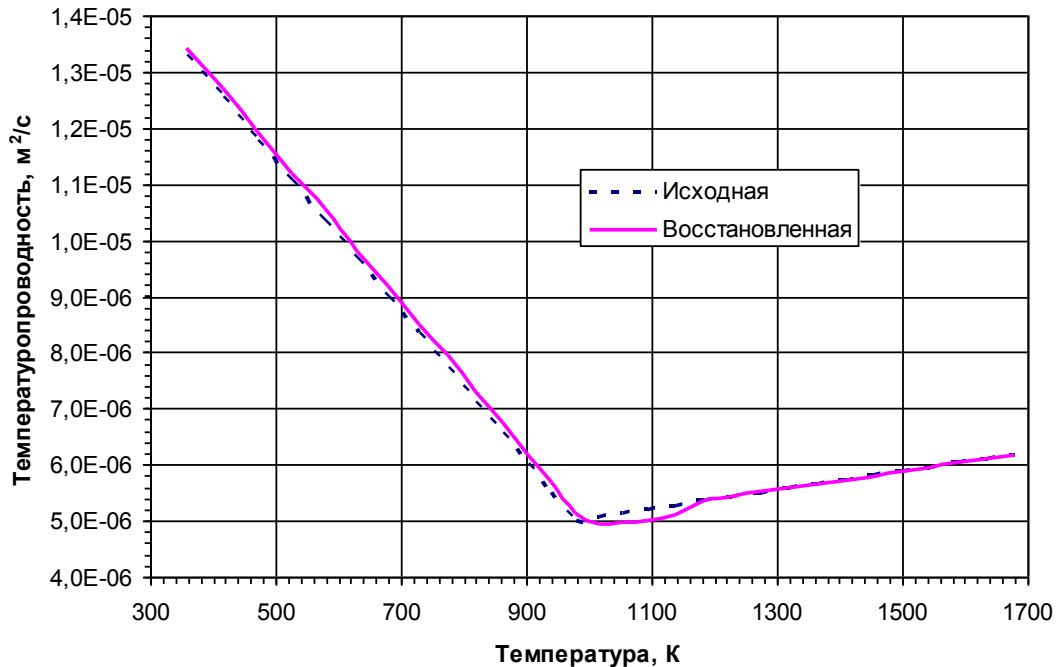


Рис. 2. Зависимости температуропроводности от температуры: 1 – исходные $a_i(T_{cp})$; 2 – восстановленные $a_T(T_{cp})$ численно-аналитическим методом

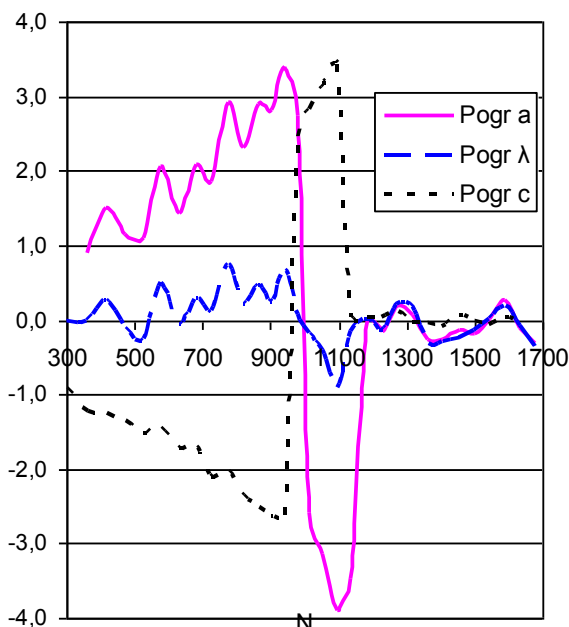


Рис. 3. Относительные погрешности восстановления температуропроводности a , коэффициента теплопроводности λ и теплоемкости c

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что погрешности восстановления $\lambda(T_{cp})$ не превышают 1 %, а погрешно-

сти восстановления $a_i(T_{cp})$ и $c_i(T_{cp,i})$ превышают 2 % только в области изменения знака первых производных функций $a_i(T_{cp})$ и $c_i(T_{cp,i})$.

При построении линий тренда вида (11) значения $a_T(T_{cp})$ в области изменения знака первых производных функций можно не учитывать и, таким образом, снизить погрешность аппроксимации.

В данном случае для табличной функции $a_T(T_{cp})$ в диапазоне расчетных температур $1183 \leq T_{cp} \leq 1680$ построена линия тренда $a_T = (3,378 + 1,667 \cdot T/1000) \cdot 10^{-6}$, $T > 977,6$ K, которая абсолютно совпала с исходной (12).

Выводы. Создание простых по реализации способов определения ТФХ материалов является актуальной задачей. Предложенный метод позволяет по результатам одного физического эксперимента рассчитывать зависимости ТФХ от температуры по простым алгебраическим формулам, при этом дает возможность комплексного определения ТФХ стали, зависимости которых от температуры описываются нелинейными функциями.

Список литературы

1. **Определение** теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин, О.Ю. Шешуков. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
2. **Фокин В.М., Чернышев В.Н.** Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 212 с.
3. **Жуков Н.П., Майникова Н.Ф.** Многомодельные методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов и изделий. – М.: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 288 с.
4. **Grysa Kr.** Inverse heat conduction problems // Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. URL: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.
5. **Review** of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials / I. Savija, J.R. Culham, M.M. Yovanovich, E.E. Marotta // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2003. – Vol. 17, No. 1. – P. 43–52.
6. **Measurement** Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials / D. Zhao, X. Qian, X. Gu, et al. Department of Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0427. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1605/1605.08469.pdf>
7. **Соколов А.К.** Метод определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности по температурам поверхности пластины как полуограниченного тела // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2022. – Vol. 65, No. 1. – С. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>
8. **Weizhen Pan, Fajun Yi, Songhe Meng.** Temperature-dependent thermal properties measurement by solving inverse heat transfer problems // Measurement Science and Technology. – 2016. – Vol. 27, No. 7. Article 075005.
9. **Rostamian M., Shahrezaee A.** Application of meshless methods for solving an inverse heat conduction problem // European Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2016. – Vol. 9, No. 1. – P. 64–83.
10. **Monde M., Kosaka M., Mitsutake Y.** Simple measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity using inverse solution for one-dimensional heat conduction // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – Vol. 53(23), No. 11. – P. 5343–5349.
11. **Kosaka M., Monde M.** Simultaneous measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by means of inverse solution for one-dimensional heat conduction (anisotropic thermal properties of CFRP for FCEV) // Int. J. Thermophys. – 2015. – Vol. 36. – P. 2590–2598.
12. **Alaili K., Ordonez-Miranda J., Ezzahri Y.** Simultaneous determination of thermal diffusivity and thermal conductivity of a thin layer using double modulated thermal excitations // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 126(14), No. 10. Article 145103.
13. **Cheng-Hung Huang, Chu-Ya Huang.** An inverse problem in estimating simultaneously the effective thermal conductivity and volumetric heat capacity of biological tissue // Applied Mathematical Modelling. – 2007. – Vol. 31(9), No. 9. – P. 1785–1797.
14. **Еремин А.В., Стефанюк Е.В., Абишева Л.С.** Идентификация источника тепла на основе аналитического решения задачи теплопроводности // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 5. – С. 339–346.
15. **Nedin R., Nesterov S., Vatulyan A.** On reconstruction of thermalphysic characteristics of functionally graded hollow cylinder // Appl. Math. Model. – 2016. – Vol. 40, issue 4. – P. 2711–2719. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.078>
16. **Nedin R., Nesterov S., Vatulyan A.** Identification of thermal conductivity coefficient and volumetric heat capacity of functionally graded materials // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 102. – P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.027>
17. **Ватульян А.О., Нестеров С.А.** Об особенностях решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности для двусоставного слоя // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2019. – Т. 19, вып. 4. – С. 409–423. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-4-409-423>
18. **Sokolov A.K.** Determination of Thermal Diffusivity of Material by the Numerical-Analytical Model of a Semi-Bounded Body // Steel in Translation. – 2020. – Vol. 50, No. 6. – P. 391–396.
19. **Соколов А.К.** Решение обратной задачи теплопроводности для симметричного температурного поля пластины, аппроксимированного степенными функциями // Известия Академии наук. Энергетика. – 2017. – № 6. – С. 108–118.
20. **Соколов А.К.** Определение температуропроводности материала по трем точкам несимметричного температурного поля пластины численно-аналитическим методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – Т. 83, № 11. – С. 35–40.
21. **Соколов А.К.** Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах. – Иваново, 2011. – 396 с.
22. **Пат. № 2247363** Российская Федерация МПК G01N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик изделий из металлополимеров / Б.Г. Варфоломеев, Н.П. Жуков, Д.Ю. Муромцев, З.М. Селиванова; опубл. 27.02.2005, бюл. № 6.
23. **Пат. № 2785084** Российская Федерация МПК G01N 25/18. Способ определения температуропроводности и коэффициента теплопроводности / А.К. Соколов, О.А. Якубина; опубл.: 02.12.2022, бюл. № 34.

References

1. Yur'ev, B.P., Gol'tsev, V.A., Matyukhin, V.I., Sheshukov, O.Yu. *Opredelenie teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: ООО «УИПЦ», 2014. 180 p.
2. Fokin, V.M., Chernyshev, V.N. *Nerazrushayushchiy kontrol' teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov* [Non-destructive testing of ther-

mophysical characteristics of building materials]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 212 p.

3. Zhukov, N.P., Maynikova, N.F. *Mnogomodel'nye metody i sredstva nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh svoystv materialov i izdeliy* [Multi-model methods and means of non-destructive testing of thermophysical properties of materials and products]. Moscow: Izdatel'stvo «Mashinostroenie-1», 2004. 288 p.

4. Grysa, Kr. Inverse heat conduction problems. Heat Conduction – Basic Research. Intech Open. Available at: <https://www.intechopen.com/books/heat-conduction-basic-research/inverse-heat-conduction-problems>.

5. Savija, I., Culham, J.R., Yovanovich, M.M., Marotta, E.E. Review of thermal conductance models for joints incorporating enhancement materials. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2003, vol. 17, no. 1, pp. 43–52.

6. Dongliang Zhao, Xin Qian, Xiaokun Gu, Saad Ayub Jajja, Ronggui Yang. Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials. Department of Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0427. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1605/1605.08469.pdf>

7. Sokolov, A.K. Metod opredeleniya temperaturoprovodnosti i koeffitsienta teploprovodnosti po temperaturam poverkhnosti plastiny kak poluograniченного tela [Method to determine thermal diffusivity and thermal conductivity coefficient based on surface temperatures of a plate as a semi-bounded body]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*, 2022, vol. 65, no. 1, pp. 57–65. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-57-65>

8. Weizhen Pan, Fajun Yi, Songhe Meng. Temperature-dependent thermal properties measurement by solving inverse heat transfer problems. *Measurement Science and Technology*, 2016, vol. 27, no. 7. Article 075005.

9. Rostamian, M., Shahrezaee, A. Application of meshless methods for solving an inverse heat conduction problem. *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 64–83.

10. Monde, M., Kosaka, M., Mitsutake, Y. Simple measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity using inverse solution for one-dimensional heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53(23), no. 11, pp. 5343–5349.

11. Kosaka, M., Monde, M. Simultaneous measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by means of inverse solution for one-dimensional heat conduction (anisotropic thermal properties of CFRP for FCEV). *Int. J. Thermophys.*, 2015, vol. 36, pp. 2590–2598.

12. Alaili, K., Ordóñez-Miranda, J., Ezzahri, Y. Simultaneous determination of thermal diffusivity and thermal conductivity of a thin layer using double modulated thermal excitations. *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 126(14), no. 10. Article 145103.

13. Cheng-Hung Huang, Chu-Ya Huang. An inverse problem in estimating simultaneously the effective thermal conductivity and volumetric heat ca-

capacity of biological tissue. *Applied Mathematical Modelling*, 2007, vol. 31(9), no. 9, pp. 1785–1797.

14. Eremin, A.V., Stefanyuk, E.V., Abisheva, L.S. Identifikatsiya istochnika tepla na osnove analiticheskogo resheniya zadachi teploprovodnosti [Identification of a heat source based on an analytical solution of the heat conduction problem]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2016, vol. 59, no. 5, pp. 339–346.

15. Nedin, R., Nesterov, S., Vatulyan, A. On reconstruction of thermalphysic characteristics of functionally graded hollow cylinder. *Appl. Math. Model.*, 2016, vol. 40, issue 4, pp. 2711–2719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.078>.

16. Nedin, R., Nesterov, S., Vatulyan, A. Identification of thermal conductivity coefficient and volumetric heat capacity of functionally graded materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 102, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.027>

17. Vatul'yan, A.O., Nesterov, S.A. Ob osobennostyakh resheniya koeffitsientnoy obratnoy zadachi teploprovodnosti dlya dvusostavnogo sloya [On the features of the solution of coefficient inverse problem of heat conductivity for a two-component layer]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Matematika. Mekhanika. Informatika*, 2019, vol. 19, issue 4, pp. 409–423. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2019-19-4-409-423>

18. Sokolov, A.K. Determination of Thermal Diffusivity of Material by the Numerical-Analytical Model of a Semi-Bounded Body. *Steel in Translation*, 2020, vol. 50, no. 6, pp. 391–396.

19. Sokolov, A.K. Reshenie obratnoy zadachi teploprovodnosti dlya simmetrichnogo temperaturnogo polya plastiny, approksimirovannogo stepennymi funktsiyami [Solution of the inverse problem of heat conduction for a symmetric temperature field of a plate approximated by power functions]. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika*, 2017, no. 6, pp. 108–118.

20. Sokolov, A.K. Opredelenie temperaturoprovodnosti materiala po trem tochkam nesimmetrichnogo temperaturnogo polya plastiny chislennanaliticheskim metodom [Determination of thermal diffusivity of material at three points of an asymmetric temperature field of a plate by a numerical-analytical method]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 11, pp. 35–40.

21. Sokolov, A.K. *Matematicheskoe modelirovanie nagreva metalla v gazovykh pechakh* [Mathematical modeling of metal heating in gas furnaces]. Ivanovo, 2011. 396 p.

22. Varfolomeev, B.G., Zhukov, N.P., Muromtsev, D.Yu., Selivanova, Z.M. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik izdeliy iz metallopolimerov* [Method of non-destructive testing of thermal characteristics of metal-polymer products]. Patent RF, no. 2247363, 2005.

23. Sokolov, A.K., Yakubina, O.A. *Sposob opredeleniya temperaturoprovodnosti i koeffitsienta teploprovodnosti* [Method to determine thermal diffusivity and thermal conductivity coefficient]. Patent RF, no. 2785084, 2022.

УДК 621.187.11

Андрей Борисович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Борис Михайлович Ларин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32

Елена Геннадьевна Ухалова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: lena.uxalova@mail.ru

Лариса Николаевна Хрипкова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат химических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-32, e-mail: lveco.67@mail.ru

Химический контроль органических веществ по водопаровому тракту энергоблока

Авторское резюме

Состояние вопроса. Применение аминоксодержащих реагентов обеспечивает защиту поверхностей нагрева энергетического оборудования, а также конденсаторов и паропроводов от протекания коррозии как в процессе эксплуатации оборудования, так и в стояночных режимах. В настоящее время на большинстве энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 России реализуется аммиачно-этанолламинный водный режим второго контура, который по сравнению с традиционным аммиачным водно-химическим режимом вызывает увеличение объема химического контроля и требует его оптимизации. В связи с этим исследование качества воды и пара энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 с использованием приборного автоматического и ручного химического контроля является актуальным.

Материалы и методы. Для контроля ведения водно-химического режима в период испытаний на двух энергоблоках ВВЭР-1000 модернизирована имеющаяся система автоматического химического контроля, установлены анализаторы «Лидер АПК» для автоматического химического контроля величины pH, электропроводности прямой и H-катионированной проб с расчетом концентрации подщелачивающего агента (аммиака, этаноламина). В целях исследования персоналом АЭС выполнены штатные измерения контролируемых параметров качества воды и пара, дополненные измерениями отдельных органических веществ на ионном жидкостном хроматографе IONEX.

Результаты. Выполнены приборный автоматический химический контроль и ручной химический контроль показателей качества воды и пара двух энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 (2-й контур), расчетное определение составляющих показателя «общий органический углерод» и анализ их изменения по водопаровому тракту блока №2. Предложено использование автоматического анализатора «Лидер АПК» для контроля аммиачно-этанолламинного водно-химического режима второго контура. Приведен пример расчетного определения суммарной концентрации подщелачивающих реагентов.

Выводы. Показана возможность поддержания pH питательной и котловой вод в нормируемых пределах дозирования этаноламина (или этаноламина или аммиака) в питательную воду по штатной схеме. Расчет обоснован возможность оперативного контроля показателя pH, суммарной концентрации аммиака и этаноламина в питательной воде второго контура энергоблока АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР, водно-химический режим второго контура, химический контроль этаноламинного водно-химического режима, удельная электропроводность, показатель pH питательной и котловой вод

Andrey Borisovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: yaandy_81@mail.ru

Boris Mikhailovich Larin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32

Elena Gennadievna Ukhlova

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: lena.uxalova@mail.ru

Larisa Nikolaevna Khripkova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: Iveco.67@mail.ru

Chemical control of organic substances along water steam path of the power unit

Abstract

Background. The use of amino-containing reagents protects the heating surfaces of power equipment, as well as condensate and steam pipelines against corrosion both during operation of the equipment and standby mode. Currently, the ammonia-ethanolamine water regime of the second circuit is being implemented at most power units of the VVER-1000 NPP in Russia, which, compared with the traditional ammonia-water-chemical regime, causes an increase of chemical control and requires its optimization. Thus, the study under consideration is relevant.

Materials and methods. To control the water chemistry regime during the testing period at two VVER-1000 power units, the existing AHK system has been upgraded. "Leader APK" analyzers have been installed for automatic chemical control of the pH value, and electrical conductivity of direct and N-cationized samples with calculation of the concentration of an alkalizing agent (ammonia, ethanolamine). At the same time, the NPP staff have performed regular measurements of controlled water and steam quality parameters, supplemented by measurements of discrete organic chemicals using the IONEX liquid chromatograph.

Results. The authors have conducted instrument and manual analysis of water and steam quality indicators of two NPP units with VVER-1000 (2nd circuit); have calculated the components of the "total organic carbon" indicator and have analyzed their changes along the water steam path of unit No. 2. The use of the automatic analyzer "Leader APK" to control ammonia-ethanolamine water chemistry regime of the second circuit is proposed. An example of the calculation of the total concentration of alkalizing reagents is given.

Conclusions. The possibility to maintain the pH of feed and boiler water within the normalized dosage limits of ethanolamine (or ethanolamine or ammonia) in feed water according to the standard scheme is shown. The calculation substantiates the possibility of operational control of the pH index, the total concentration of ammonia and ethanolamine in the feed water of the second circuit of the nuclear power plant unit with VVER.

Key words: nuclear power plants with VVER, water-chemical regime of the second circuit, chemical control of the ethanolamine water-chemical regime, specific electrical conductivity, pH of feed and boiler water

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.031-038

Введение. В настоящее время на большинстве энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 России реализуется аммиачно-этаноламинный водный режим второго контура [1, 2]. В условиях замены материала трубок конденсаторов паровых турбин на легированные стали или титановые сплавы основное назначение аммиака (NH_3) и этаноламина (ЭТА) состоит в поддержании pH питательной воды в диапазоне 9,5–9,7 и котловой воды солевого отсека – 9,2–9,6 единиц pH¹ [3]. Концентрация аммиака в питательной воде

должна быть на уровне 1500 мкг/дм³ и более, ЭТА – 400–600 мкг/дм³. Преимуществом такого водно-химического режима (ВХР) считается минимальная скорость коррозии стали конденсатно-питательного тракта, включая парогенератор, при сохранении высокой степени чистоты теплоносителя по показателю удельной электропроводности Н-катионированной охлажденной пробы ($\chi_{\text{H}} < 0,3$ мкСм/см).

Реализация названного режима, по сравнению с традиционным аммиачным ВХР, вызывает увеличение объема химического контроля, в частности по этаноламину, снижает фильтроцикл фильтров смешанно-

¹ СТО 1.1.1. 7.003.0818-2016. Водно-химический режим второго контура АЭС с ВВЭР-1000. Нормы качества рабочей среды и средства их обеспечения.

го действия обессоливающей установки очистки конденсата (ФСДБОУ), а также Н-катионитовых колонок кондуктометров при определении показателя χ_n . Увеличение плотности конденсаторов паровых турбин с присосами охлаждающей воды вызывает желание отключения фильтров БОУ, равно как оптимизации тепловой схемы регенеративного нагрева, например, за счет сброса выпара деаэратора в систему подогревателей низкого давления.

Методы исследования. Проведен анализ состояния аммиачно-этаноламинного водно-химического режима второго контура двух энергоблоков, один из которых (Блок-1) выполнен в традиционном варианте [4], а второй (Блок-2) – по схеме, представленной на рис. 1. Некоторые данные

химического контроля качества водного теплоносителя приведены в табл. 1. Блок-1 обеспечивает нормативные значения pH за счет дозирования аммиака в питательную воду до уровня 1100–1200 мкг/дм³, а Блок-2 работает без дозирования аммиака, минимальная концентрация которого обеспечивается дозированием гидразина и повышенными дозировками ЭТА. Следует обратить внимание на повышенные значения удельной электропроводности (χ_n), близкие к допустимому пределу, по точкам контроля водопарового тракта Блока-2. Углубленный лабораторный анализ водного теплоносителя Блока-2 показал повышенные концентрации кислорода (до 100 мкг/дм³) в конденсатном тракте и железа (до 5–7 мкг/дм³) в питательной воде.

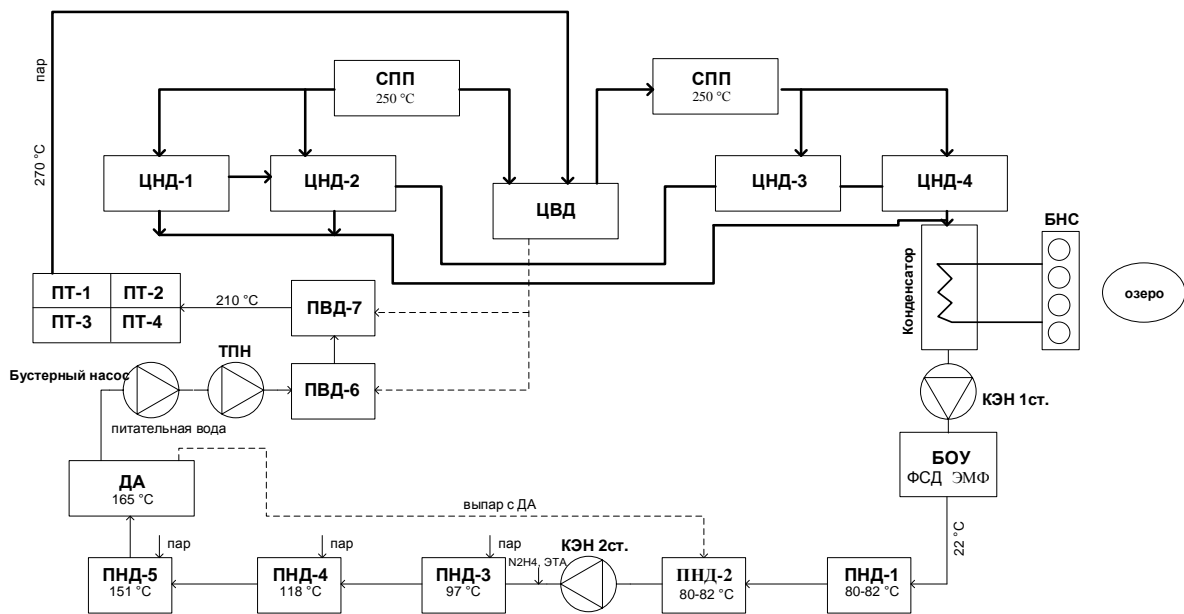


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема Блока №2: ПГ1-ПГ4 – парогенераторы энергоблока с ВВЭР-1000; ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давлений паровой турбины; КЭН-1, КЭН-2 – конденсатные насосы; БОУ – блочная обессоливающая установка; ПНД-1 – ПНД-5 – подогреватели низкого давления; ДА – деаэратор (7 ата); ПТН – питательный турбонасос; ПВД-6, ПВД-7 – подогреватели высокого давления

Таблица 1. Результаты химического контроля показателей ВХР второго контура по водопаровому тракту энергоблока АЭС (концентрации даны в мкг/дм³)

Точки контроля	Блок-1				Блок-2					
	χ_n , мкСм/см	pH	ЭТА, мкг/дм ³	NH ₃ , мкг/дм ³	χ_n , мкСм/см	pH	ЭТА, мкг/дм ³	NH ₃ , мкг/дм ³	Ac ⁻	Form
КЭН-1	0,210	9,45	–	–	0,290	8,72	320	< 40	16,4	0,77
ПВД	0,206	9,47	900	1117	0,27	9,08	1150	56	20,3	2,46
ПГ, с/о	0,785	9,58	60	< 40	0,82	9,58	5210	< 40	75,0	2,5
Пар ПГ	0,202	9,47	–	–	0,27	9,21	1770	< 40	30,7	2,0

Обозначенные отклонения качества питательной воды Блока-2 могут быть отнесены, в первую очередь, к изменению тепловой схемы, исключающей деаэрацию дренажей пара в конденсаторе и очистку их с потоком конденсата на БОУ.

Особенностью аммиачного-этанол-аминного ВХР, согласно данным табл. 1, является практическое отсутствие аммиака в котловой воде парогенераторов (ПГ) солевого отсека (с/о) Блоков-1,2 при значительном накоплении ЭТА (5–6 мг/дм³), что позволяет поддерживать оптимальные значения pH. Концентрация этаноламина в паре (Пар ПГ) равна или больше, чем его концентрация в питательной воде (ПВД). Последнее объясняется разными значениями коэффициента распределения аммиака и ЭТА [2, 5].

Материалы и методы. Химический контроль концентрации ЭТА и аммиака выполняется средствами лабораторного контроля отдельных проб, в частности, с использованием жидкостного хроматографа типа «Стайер», а также контроля ацетатов (Ac⁻) и формиатов (Form⁻) – с использованием хроматографа IONEX, общего органического углерода (ООУ), характеризующего содержание органических веществ в водном теплоносителе, – анализатором «ТОС» импортного производства.

ООУ – интегральный показатель, определяющий концентрацию углерода во всех формах присутствующих в воде органических веществ (ОВ) путем деструкции ОВ сильным УФ-излучением с индикацией кондуктометром по разности удельных электропроводностей «выход»–«вход». Расчет осуществлялся вычетом из концентрации общего углерода концентрации неорганического углерода (рис. 2).

Результаты исследований. Из анализируемых ОВ показатель ООУ, мкгС/дм³, включает:

- этаноламин (ЭТА);
- кислые продукты деструкции ОВ: ацетаты (Ac) и формиаты (Form);
- другие ОВ, например масла, фенолы, формальдегиды и др.:

$$\text{ООУ} = C_{\text{ЭТА}}^{\text{C}} + C_{\text{Ac}}^{\text{C}} + C_{\text{Form}}^{\text{C}} + C_{\text{др}}^{\text{C}},$$

где $C_{\text{ЭТА}}^{\text{C}}$ – концентрация углерода в ЭТА; C_{Ac}^{C} , $C_{\text{Form}}^{\text{C}}$ – концентрации углерода в ацетатах и форматах; $C_{\text{др}}^{\text{C}}$ – концентрация углерода в других, неопределяемых ОВ, присутствующих в анализируемой воде.

Концентрация углерода в ЭТА определяется следующим образом:

$$C_{\text{ЭТА}}^{\text{C}} = 393,4 \cdot \text{ЭТА}, \text{ мкг С/дм}^3,$$

где ЭТА – концентрация этаноламина, мг/дм³.

Тогда значение ЭТА 61 г/дм³ дает значение ООУ 24 г С/дм³. При измеренной концентрации ЭТА за КЭН-1 (табл. 1) 0,32 мг/дм³ будем иметь:

$$61 \text{ г/дм}^3 - 24 \text{ г С/дм}^3;$$

$$0,32 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3 - X \text{ С/дм}^3.$$

Из этого следует

$$X = C_{\text{ЭТА}}^{\text{C}} = \frac{0,32 \cdot 10^{-3} \cdot 24}{61} = 125,9 \text{ мкгС/дм}^3.$$

Концентрация углерода в ацетатах определяется аналогично в следующем виде:

$$C_{\text{Ac}}^{\text{C}} = 0,407 \cdot \text{Ac}, \text{ мкг С/дм}^3,$$

где Ac – концентрация ацетатов, мкг/дм³.

При значении Ac в воде за КЭН-1 (табл. 1), равном 16,4 мкг/дм³, получим

$$X = \frac{16,4 \cdot 24}{59} = 0,407 \cdot 16,4 = 6,67 \text{ мкгС/дм}^3.$$

Аналогично для формиатов получим

$$C_{\text{Form}}^{\text{C}} = 0,267 \cdot \text{Form}, \text{ мкг С/дм}^3,$$

где Form – концентрация формиатов, мкг/дм³.

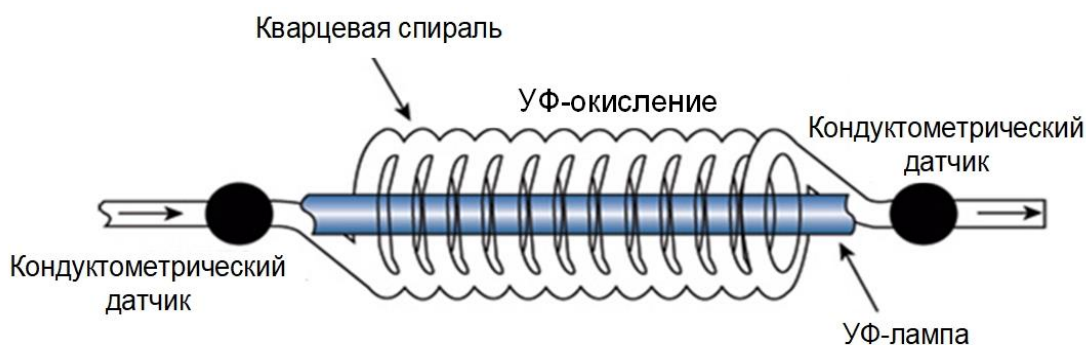


Рис. 2. Принципиальная схема измерения общего органического углерода анализатором ТОС

При концентрации формиатов в воде за КЭН-1 (табл. 1), равной $0,77 \text{ мкг/дм}^3$, получим

$$X = C_{\text{Form}}^C = \frac{0,77 \cdot 12}{45} = 0,205 \text{ мкгС/дм}^3.$$

Тогда получим

$$\text{ООУ} = 393,4 \cdot \text{ЭТА} + 0,407 \cdot \text{Ас} + 0,267 \cdot \text{Form} + C_{\text{др}}, \quad (1)$$

где ЭТА – концентрация этаноламина, мкг/дм^3 ; Ас – концентрация ацетатов, мкг/дм^3 ; Form – концентрация формиатов, мкг/дм^3 ; $C_{\text{др}}$ – концентрации других органических веществ, мкгС/дм^3 ; 393,4; 0,407; 0,267 – коэффициенты пересчета ЭТА, Ас, Form, мкгС/дм^3 .

Для конденсата за КЭН-1 (табл. 2) имеем

$$360 = 125,9 + 6,67 + 0,21 + C_{\text{др}}^C,$$

где $C_{\text{др}}^C = 227,2 \text{ мкгС/дм}^3$.

Таким образом, в конденсате за КЭН-1 на Блоке-2 вклад ЭТА в ООУ составляет около 35 %, вклад кислых продуктов (Ас^- и Form^-) – около 2 %, остальное – неопределяемые ОВ, в состав которых могут входить масла, смываемые с уплотнений КЭН-1, органические вещества, поступающие с присосами охлаждающей воды в конденсаторе, и др.

Результаты расчетного анализа составляющих ООУ по водопаровому тракту Блока-2, определяемых формулой (1), приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что содержание ЭТА в общем органическом углероде составляет от 35 % в конденсате паровой турбины (КЭН-1) до более чем 95 % в котловой воде солевого отсека парогенератора. Содержание ацетатов и формиатов – низкомолекулярных продуктов термолитиза органических веществ кислого характера – составляет в среднем 1,7 %. На долю других составляющих (нефтепродуктов, продуктов деструкции ионитов БОУ и др.) приходится от 2–3 % в котловой воде и сепарате сепаратора-пароперегревателя (сепарат СПП) до

63 % в конденсате паровой турбины. Отмеченное вполне укладывается в характеристику водно-химического режима водопарового тракта второго контура энергоблока АЭС.

Высокая затратность по времени и стоимости лабораторных химических анализов (с периодическим отбором проб теплоносителя в лабораторию) делает правомерным поиск автоматических анализаторов, способных заменить если не полностью, то частично большой объем химического контроля качества воды и пара на АЭС. Такими можно считать анализаторы фирмы SWAN типов FAM Deltacon pH и AMI Deltacon Power, способные по измерениям удельной электропроводности прямой и Н-катионированной проб расчетом определять pH и концентрацию аммиака [6]. Отечественным аналогом названных приборов автоматического химического контроля (АХК) является анализатор «Лидер-АПК», разработанный коллективом каф. ХХТЭ ИГЭУ и реализованный предприятием «НПП «Техноприбор» (г. Москва) [7].

Анализатор «Лидер-АПК» (рис. 3) предназначен для измерений водородного показателя, приведенного к значению 25°C (pH^{25}), и концентрации аммиака в питательной воде, паре и обессоленной воде (далее – пробе) в системах контроля технологических процессов на электростанциях и других производствах.

Анализатор состоит из трехканального трансмиттера серии ЛИДЕР-300 блока питания и трех измерительных каналов – двух каналов кондуктометра (первый и второй каналы) и одного канала анализатора примесей (третий канал)².

Принцип работы анализатора «Лидер-АПК» основан на косвенном определении концентраций основных примесей, содержащихся в питательной воде, конденсате, паре и обессоленной воде (pH^{25} , NH_3 , Cl^- и Na^+), по данным удельной электропроводности прямой (χ^{25}) и Н-катионированной (χ_{H}^{25}) проб.

Таблица 2. Составляющие показателя «общий органический углерод» (ООУ) (по результатам лабораторных анализов на Блоке-2)

Точки контроля	ООУ, мкг/дм^3	Составляющие ООУ, %		
		ЭТА	Ас^- , Form^-	Другие органические вещества
КЭН-1	360	35,0	2,0	63,0
ПВД	730	62,0	1,2	36,8
ПГ (с/о)	1700	>95	1,8	<3,2
Пар ПГ	930	42,6	1,4	56,0
Сепарат СПП	2360	85,7	1,9	2,4

² Каталог продукции ООО «НПП Техноприбор» (г. Москва): <http://www.tehnopribor.ru/product/>



Рис. 3. Анализатор «Лидер-АПК»

Анализатор «Лидер-АПК» работает в двух режимах измерения, выбор между которыми производится оператором:

1) режим без подщелачивания: средой является питательная вода и пар прямооточного котла СКД в условиях нейтрального ВХР, вода и пар блоков РБМК, перспективных блоков ВВЭР-СКД, а также конденсат паровой турбины и обессоленная вода (БЗК), т.е. $\chi^{25} \leq 1$ мкСм/см; $\text{pH} \leq 8,5$ (в общем случае, $\chi^{25} \leq 10$ мкСм/см);

2) режим с подщелачиванием: средой является питательная вода и пар барабан-

ных котлов, в том числе котлов-утилизаторов ПГУ с давлением $P > 7,0$ МПа и прямооточных котлов СКД, в условиях глубокой деаэрации и подщелачивания питательной воды аммиаком (или гидразином, или органическим амином, $\text{pH} \geq 7,5$) и восполнения потерь теплоносителя обессоленной водой ($\chi^{25} \leq 1$ мкСм/см).

Расчет концентраций примесей производится по специальному алгоритму, основанному на решении системы уравнений электронно-ионного баланса для модели ионного состава, соответствующего вышеуказанным рабочим средам, при известном значении удельной электропроводности среды до и после ионного обмена в Н-фильтре.

Возможность использования анализатора «Лидер-АПК» для контроля концентрации аммиака, этаноламина и раствора их смеси, приготовленных на глубокообессоленной воде ($\chi^{25}_{\text{H}_2\text{O}} < 0,1$ мкСм/см), проверялась в лабораторных условиях на мембранно-ионообменном стенде [8]. Некоторые результаты приведены в табл. 3.

Анализ полученных результатов (табл. 3) показывает, что в монорастворах аммиака и этаноламина и в растворе их смеси возможно косвенное (расчетное) определение их концентраций (для раствора смеси $\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$ в пересчете на аммиак) по измерениям удельной электропроводности прямой и Н-катионированной проб с ошибкой менее 10 %, что можно считать приемлемым для условий оперативного химического контроля.

Таблица 3. Расчетные определения pH и концентраций модельных растворов аммиака (NH_3), этаноламина (ЭТА) и их смеси ($\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$) в пересчете на NH_3 по измерениям электропроводности прямой (χ , мкСм/см) и Н-катионированной (χ_{H} , мкСм/см) проб с использованием расчетного алгоритма анализатора «Лидер АПК»

Вещество	Концентрация		Измерения		Расчет «Лидер-АПК»		
	мкг/дм ³	мкмоль/дм ³ (сумма)	χ^{25}	χ^{25}_{H}	pH	Концентрация	
						мкг/дм ³	мкмоль/дм ³ (сумма)
NH_3	305	17,9	2,85	0,308	8,96	301	17,7
	610	35,9	4,52	0,363	9,22	571	33,6
ЭТА	517	8,48	1,64	0,325	8,75	524	8,59
	1034	17,0	2,87	0,342	8,95	1087	17,8
	4136	67,8	7,13	0,409	9,42	4194	68,8
$\text{NH}_3 + \text{ЭТА}$	732+413	49,8	5,48	0,377	9,25	На NH_3	45,6
	1472+1664	113,9	9,98	0,398	9,58	770 1952	114,8

Возможность использования анализатора «Лидер-АПК» для контроля качества водного теплоносителя второго контура АЭС с ВВЭР проверялась на отмеченных выше энергоблоках Блок-1 и Блок-2. При отклонении значений удельной электропроводности, измеренных штатными

кондуктометрами и «Лидер-АПК», в пределах паспортной ошибки сопоставление аналитических измерений pH и суммарной концентрации ЭТА и аммиака (данные химического цеха (ХЦ) АЭС) с расчетными аналогами приведено в табл. 4.

Таблица 4. Результаты химических анализов и расчетов по программе «Лидер АПК» значений pH и суммарной концентрации ЭТА+NH₃ в точках контроля теплоносителя второго контура Блока ВВЭР-1000

Точка контроля	Данные химического цеха				Данные «Лидер-АПК»	
	χ , мкСм/см	χ_n , мкСм/см	pH	ЭТА+NH ₃ , мкг/дм ³	pH	ЭТА+NH ₃ , мкг/дм ³
КЭН-1	1,73	0,29	8,72	125	8,78	168
ПНД-5	2,87	0,35	9,08	357	9,01	322
ПВД	3,18	0,27	9,08	376	9,06	368
Пар ПГ-2	4,68	0,40	9,15	562	9,22	638
Котловая вода ПГ-1 с/о	7,8	0,82	9,58	1452	9,44	1408
Сепарат СПП	8,06	1,01	9,52	1432	9,45	1490
Концентрат СПП	2,99	0,28	9,03	320	9,03	338

Анализ данных табл. 4 показывает, что расчет по алгоритму «Лидер-АПК» на основе измерений χ и χ_n дает значения pH, в среднем не отличающиеся от данных химического цеха более чем на 0,06 ед. pH, т. е. в пределах паспортной ошибки pH-метра. Данные расчета суммарной концентрации (ЭТА+NH₃) в пересчете на концентрацию аммиака (мкг/дм³) в конденсате и питательной воде соответствуют данным расчета (ЭТА+NH₃) в пересчете на аммиак, полученным путем химического анализа в лаборатории химического цеха, в среднем в пределах 10 %-го расхождения.

Принимая во внимание практическое отсутствие аммиака в котловой воде солевого отсека парогенератора (ПГ_{с/о}) (см. табл. 1), можно расчетом определять концентрацию ЭТА (С_{ЭТА}) по измерению удельной электропроводности охлажденной пробы (ПГ_{с/о}). Основанием для расчета являются следующие уравнения:

– уравнение диссоциации

$$K_d = \frac{C_{\text{RNH}_3^+} C_{\text{OH}^-}}{(C_{\text{RNH}_3^+} - C_{\text{OH}^-})}; \quad (2)$$

– уравнение электропроводности

$$10^{-3} \cdot \chi = (\lambda_{\text{RNH}_3^+} + \lambda_{\text{OH}^-}) C_{\text{OH}^-}, \quad (3)$$

где $K_d = 1,80 \cdot 10^{-5}$ – константа диссоциации ЭТА [9]; $C_{\text{RNH}_3^+}$, C_{OH^-} , $C_{\text{RNH}_3\text{OH}}$ – концентрации, диссоциированной части гидроксида ЭТА, гидроксильных ионов и общая концентрация этаноламина, моль/дм³;

χ – удельная электропроводность охлажденной пробы (25 °С) котловой воды солевого отсека, определяемая концентрацией ЭТА, мкСм/см; $\lambda_{\text{RNH}_3^+}$, λ_{OH^-} – эквивалентные электропроводности ионов RNH_3^+ и OH^- , равные их предельным подвижностям, принимаемым $50 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^2\text{моль}^{-1}(\text{экв})^{-1}/\text{дм}^3$ и $198,3 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^2\text{моль}^{-1}(\text{экв})^{-1}/\text{дм}^3$ соответственно.

Совместное решение уравнений (2) и (3) дает:

$$C_{\text{OH}^-} = 4,03 \cdot \chi \cdot 10^{-6} \text{ моль / дм}^3; \quad (4)$$

$$C_{\text{RNH}_3\text{OH}} = 4,03 \cdot 10^{-6} \cdot \chi + 0,90 \cdot 10^{-6} \cdot \chi^2 \text{ моль / дм}^3; \quad (5)$$

$$C_{\text{ЭТА}} = 245,8 \cdot \chi + 55 \cdot \chi^2 \text{ мкг / дм}^3; \quad (6)$$

$$\text{pH} = 10 - \lg \left(\frac{24,8}{\chi} \right). \quad (7)$$

Так, для котловой воды солевого отсека Блока-2 (см. табл. 1) имеем: при 25 °С удельная электропроводность охлажденной пробы $\chi = 7,8 \text{ мкСм/см}$; $C_{\text{ЭТА}} = 5,21 \text{ мг/дм}^3$. В результате расчета по уравнениям (6), (7) получаем: $\text{pH} = 9,50$; $C_{\text{ЭТА}} = 5,26 \text{ мг/дм}^3$.

В заключение следует отметить, что неизученными остаются вопросы влияния больших концентраций ЭТА и аммиака на снижение обменной емкости (и времени работы) катионитов в фильтрах БОУ и Н-колонок кондуктометров. Вероятно, следует использовать для загрузки Н-колонок кондуктометров макропористые сильнокислотные катиониты.

Выводы. Показана возможность поддержания pH котловой воды солевого отсека парогенератора на уровне 9,2–9,6 дозировкой этаноламина в питательную воду. Концентрация ЭТА в солевом отсеке ПГ составляет 5–7 мг/дм³ при различных концентрациях его в питательной воде. Концентрация ЭТА в паре примерно равна концентрации в питательной воде и определяется концентрацией его в котловой воде.

Поддержание pH в конденсатно-питательном тракте на уровне 9,5–9,7 целесообразно обеспечивать дозированием аммиака и совместным дозированием аммиака и ЭТА. Можно отметить их равное влияние на значение pH.

Возможен оперативный контроль показателя pH, суммарной концентрации аммиака и ЭТА в питательной воде и паре ПГ и концентрации ЭТА в котловой воде парогенератора по измерениям удельной электропроводности охлажденных проб (прямой и H-катионированной). Такой контроль может выполняться автоматическим отечественным анализатором «Лидер-АПК», производимым «НПП «Техноприбор» (г. Москва). В питательной воде суммарная концентрация (ЭТА+NH₃) определяется в пересчете на мкг/дм³ аммиака, что и является значением pH в котловой воде солевого отсека ПГ.

Список литературы

1. **Тяпков В.Ф.** Ведение водно-химического режима II контура АЭС с ВВЭР на энергоблоках с отсутствием медьсодержащих сплавов // Теплоэнергетика. – 2014. – № 7. – С. 42–47.
2. **Тяпков В.Ф., Ерпылева С.Ф.** Водно-химический режим II контура АЭС с водо-водяным энергетическим реактором // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 48–55.
3. **Тяпков В.Ф.** Анализ ведения водно-химического режима на АЭС с ВВЭР 1000 до и после реконструкции трубной системы конденсаторов турбин // Теплоэнергетика. – 2021. – № 5. – С. 56–62.
4. **Воронов В.Н., Петрова Т.И.** Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. – М.: Изд. дом «МЭИ», 2009. – 240 с.
5. **Опыт** внедрения водно-химического режима второго контура на АЭС с ВВЭР 1000 с дозированием органических аминов / В.Ф. Тяпков, С.Ф. Ерпылева, В.В. Быкова, А.Л. Богданов // Труды научно-практической конференции МЭИ. – М., 2010.
6. **Wilfried Ruble.** Water chemistry I BWRanel PWR Nuclear Power Plants // Power Plants Chemistry. – 1999. – Vol. 1, No. 3. – P. 5–12.

7. **Пат. № 2573453 С1** Российская Федерация МПКG01N 21/27 (2006.01), G01N (2006.01). Способ определения pH малобufferных предельно разбавленных растворов типа конденсата / Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, А.Я. Сорокина, С.В. Кьет; опубл. 20.01.2016.

8. **Ларин Б.М., Власов Н.В.** Обессоливание воды методами обратного осмоса и ионного обмена: метод. указания к лабораторным работам. – Иваново, 2016. – 36 с.

9. **Лурье Ю.Ю.** Справочник по аналитической химии. – М.: Химия, 1971. – С. 254.

References

1. **Tyapkov, V.F.** Vedenie vodno-khimicheskogo rezhima II kontura AES s VVER na energoblokakh s otsutstviem med'soderzhashchikh splavov [Maintaining the water-chemical regime of the II circuit of nuclear power plants with VVER on power units with the absence of copper-containing alloys]. *Teploenergetika*, 2014, no. 7, pp. 42–47.
2. **Tyapkov, V.F., Erpyleva, S.F.** Vodno-khimicheskiy rezhim II kontura AES s vodo-vodyanym energeticheskim reaktorom [The water-chemical regime of the II circuit of an NPP with a water-water power reactor]. *Teploenergetika*, 2017, no. 5, pp. 48–55.
3. **Tyapkov, V.F.** Analiz vedeniya vodno-khimicheskogo rezhima na AES s VVER 1000 do i posle rekonstruktsii trubnoy sistemy kondensatorov turbin [Analysis of the water-chemical regime at nuclear power plants with VVER 1000 before and after the reconstruction of the turbine condenser pipe system]. *Teploenergetika*, 2021, no. 5, pp. 56–62.
4. **Voronov, V.N., Petrova, T.I.** *Vodno-khimicheskie rezhimy TES i AES* [Water-chemical regimes of thermal power plants and nuclear power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom «MEI», 2009. 240 p.
5. **Tyapkov, V.F., Erpyleva, S.F., Bykova, V.V., Bogdanov, A.L.** Opyt vnedreniya vodno-khimicheskogo rezhima второго контура на AES s VVER 1000 s dozirovaniem organicheskikh aminov [The experience of introducing the water-chemical regime of the second circuit at nuclear power plants with VVER 1000 with dosing of organic amines]. *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii MEI* [Proceedings of the scientific and practical conference of MEI]. Moscow, 2010.
6. **Wilfried Ruble.** Water chemistry I BWRanel PWR Nuclear Power Plants. *Power Plants Chemistry*, 1999, vol. 1, no. 3, pp. 5–12.
7. **Larin, B.M., Larin, A.B., Sorokina, A.Ya., Kiet, S.V.** *Sposob opredeleniya pH malobuffernykh predel'no razbavlenykh rastvorov tipa kondensata* [Method for determining the pH of low-buffer extremely dilute solutions of the condensate type]. Patent RF, no. 2573453, 2016.
8. **Larin, B.M., Vlasov, N.V.** *Obessolivanie vody metodami obratnogo osmosa i ionnogo obmena* [Desalination of water by reverse osmosis and ion exchange methods]. Ivanovo, 2016. 36 p.
9. **Lur'e, Yu.Yu.** *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of analytical chemistry]. Moscow: Khimiya, 1971, p. 254.

УДК 536.7

Валерий Николаевич Диденко

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики, Россия, Ижевск, e-mail: rsg07-9624@udm.net

Дмитрий Анатольевич Хворенков

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Россия, Ижевск, e-mail: d.a.khvorenkov@istu.ru

Ильшат Индусович Фахразиев

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», старший преподаватель кафедры теплоэнергетики, Россия, Ижевск, e-mail: i.i.fakhraziev@istu.ru

Расчетное определение доли воздуха, отводимого в осушительных установках на холодную регенерацию адсорбента

Авторское резюме

Состояние вопроса. Процесс холодной регенерации адсорбента в осушительных установках производится частью уже осушенного воздуха без его подогрева, что упрощает конструкцию, уменьшает стоимость, но снижает производительность установки. Эта часть (доля) при высокой температуре и влажности атмосферного воздуха может быть недопустимо большой, поэтому важно определить ее величину до начала проектных работ. Использование для этого I-d-диаграмм влажного воздуха ограничивается погрешностями графических построений. Таким образом, разработка метода предпроектного расчетного определения доли осушенного воздуха, отводимой на холодную регенерацию адсорбента, является актуальной задачей.

Материалы и методы. Создание метода, пригодного для предпроектных инженерных расчетов реального процесса холодной регенерации адсорбента, возможно лишь при упрощающих допущениях. Исследование проведено с использованием метода, базирующегося на теории «температуры мокрого термометра», рассматривающего тепло- и массообменные процессы в локальном пограничном слое у испаряющейся водяной пленки, омываемой плоскопараллельным и стационарным потоком ненасыщенного воздуха.

Результаты. Проведено детальное рассмотрение реальных процессов тепло- и массообмена при холодной регенерации гранулированного адсорбента осушенным воздухом. Выполнен расчет изменения влагосодержания и температуры воздуха в двух слоях адсорбента при допущении, что температура мокрого термометра одинакова во всех слоях адсорбента в течение всей фазы холодной регенерации. Температура и относительная влажность воздуха в конце фазы регенерации рассчитаны по начальному состоянию осушенного воздуха, идущего на регенерацию адсорбента. Разработанный алгоритм метода сопровождается численным примером.

Выводы. Полученные по представленной методике результаты позволяют сделать вывод об адекватности модели и достижении цели исследования. Достоверность результатов очевидна благодаря применению в методике базовых физически понятных термодинамических закономерностей. Методика может быть использована при выполнении предпроектных расчетов систем осушения воздуха компрессорных станций, к которым предъявляются определенные требования по влагосодержанию сжатого воздуха.

Ключевые слова: влажный воздух, осушение воздуха, фаза адсорбции, холодная регенерация, метод расчета холодной регенерации адсорбента

Valerij Nikolaevich Didenko

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering Department, Russia, Izhevsk, e-mail: rsg07-9624@udm.net

Dmitrij Anatolievich Khvorenkov

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Assistant Professor of Thermal Power Engineering Department, Russia, Izhevsk, e-mail: d.a.khvorenkov@istu.ru

Ilshat Indusovich Fakhraziev

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Senior Lecturer of Thermal Power Engineering Department, Russia, Izhevsk, e-mail: i.i.fakhraziev@istu.ru

Calculation of the portion of air in drying units used for cold regeneration of the adsorbent

Abstract

Background. The process of cold regeneration of the adsorbents in drying units is carried out by a portion of already dried air without heating it. It simplifies the design, reduces the cost, but reduces the productivity of the installation. At hot temperature and atmospheric air humidity, this part (portion) of the air can be unacceptably large, therefore it is important to determine its value before the design work starts. The use of an I-d humid air diagram is limited by the errors of graphical constructions. Thus, the development of a method for pre-design calculation of the portion of dehumidified air for cold regeneration of the adsorbent is an urgent task.

Materials and methods. The development of a method for engineering calculations of the real process of cold regeneration of an adsorbent is possible only with simplifying assumptions that make it possible to develop a method suitable for pre-design engineering calculations. The study is carried out using a method based on the theory of "wet-bulb temperature". It considers heat and mass transfer processes in a local boundary layer of an evaporating water film washed by a plane-parallel and stationary flow of unsaturated air.

Results. The authors have conducted a detailed study of the real processes of heat and mass transfer during cold regeneration of granular adsorbent with dried air. The calculation of the change in moisture content and air temperature in two layers of adsorbent has been performed under the assumption that the temperature of the wet-bulb thermometer is the same in all layers of the adsorbent during the entire cold regeneration phase. The temperature and relative humidity of the air at the end of the regeneration phase have been calculated based on the initial state of the dried air used for regeneration of the adsorbent. The developed algorithm of the method is illustrated by a numerical example.

Conclusions. The results obtained using the presented methodology allow us to conclude that the model is adequate and that the research goal has been achieved. The reliability of the results is evident due to the application of basic physically easy to understand thermodynamic patterns. The technique can be used when performing pre-design calculations of air dehumidification systems of compressor stations, which have certain requirements for the moisture content of compressed air.

Key words: humid air, air dehumidification, adsorption phase, cold regeneration, method of calculation of cold regeneration of adsorbent

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.039-050

Введение. Атмосферный воздух является влажным, поскольку содержит в своем составе водяной пар. Осушение сжатого влажного воздуха необходимо для использования его в ряде технологий: плазменная резка, покрасочные работы, применение пневматического инструмента, эксплуатация радиотехнического и электронного оборудования и т.д. Наиболее часто для осушения сжатого воздуха применяется адсорбционный способ [1–5]. Цикл любой адсорбционной установки осушения воздуха (УОВ) всегда включает фазы адсорбции и регенерации (десорбции, восстановления) адсорбента. Общее число фаз, их последовательность и тепловые режимы зависят от применяемого способа регенерации адсорбента. Так, после фазы горячей регенерации необходима фаза охлаждения адсорбента. На рынке УОВ наиболее представлены установки с двумя вертикальными емкостями (колоннами, адсорберами), содержащими неподвижный слой твердого адсорбента.

Актуальность задачи. Несколько лет назад, на кафедре «Теплоэнергетика»

ИжГТУ имени М.Т. Калашникова было предложено выполнять расчеты УОВ для атмосферного воздуха с температурой $t_{\text{атм}} = 35^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi_{\text{атм}} = 75\%$ (тропический вариант), сжатого в компрессоре до абсолютного давления 0,8 МПа. Осушение воздуха в УОВ должно было производиться до заданного значения температуры точки росы $t_p = +3^\circ\text{C}$. Давление осушенного воздуха на выходе из УОВ составляет 7,0 МПа. Особенностью технического задания являлось отсутствие сепарации и удаления конденсата влаги из промежуточных и конечных охладителей компрессора. Заказчик заранее отдавал предпочтение УОВ с холодной регенерацией адсорбента (ХРА), но без какого-либо обоснования осуществимости и эффективности такого технического решения. Известным недостатком ХРА является использование для десорбции части (доли) осушенного в УОВ воздуха, причем эта доля может быть весьма существенной. На момент согласования технического задания обе стороны не располагали расчетным методом предпроектного определения

затрат осушенного воздуха на ХРА, учитывающим заявленные особенности эксплуатации УОВ. Графические методы определения параметров влажного воздуха в УОВ по I-d-диаграммам не могут обеспечить нужную точность.

Целью настоящего исследования является разработка метода предпроектного расчетного определения доли осушенного воздуха, отводимой в УОВ для ХРА.

ХРА осуществляется продувкой слоя адсорбента «холодным» осушенным в УОВ воздухом, частично отводимым от потока без последующего подогрева. Такой способ регенерации является наиболее простым в техническом отношении и достаточно экономичным. Считается, что холодный осушенный воздух, продуваемый сквозь слой адсорбента, не удаляет влагу из пор, а лишь испаряет ее с поверхности гранул. Прикладная теории ХРА еще не завершена, поскольку необходимо решить, по сути, фундаментальную проблему достоверного расчетного моделирования процессов нестационарного тепло- и массообмена в слабо подвижном и продуваемом газом слое гранулированного вещества с высокой насыпной плотностью и открытой пористостью, выборочно поглощающего и отдающего компоненты потока. Решению этой проблемы посвящено множество работ [6–16]. Эмпирические методики производителей адсорбентов составляют коммерческую тайну и поэтому не обнародуются.

ХРА производится частью ($\alpha_{\text{хр}}$) воздуха, осушенного в фазе адсорбции. Обычно разработчики УОВ с ХРА указывают в характеристиках установок $\alpha_{\text{хр}} \leq 15\%$ (реже 20%) при «стандартных» параметрах атмосферы (например, $t_{\text{атм}} = 20^\circ\text{C}$ и барометрическое давление $B = 0,1$ МПа). Но уход от «стандартных» параметров в сторону увеличения $t_{\text{атм}}$ и $p_{\text{атм}}$ приводит к росту $\alpha_{\text{хр}}$, иногда неприемлемому для потребителя. Отбор уже осушенного воздуха снижает производительность УОВ по сжатому воздуху, поэтому подбор компрессора должен производиться с учетом значений $\alpha_{\text{хр}}$, соответствующих реальным условиям работы УОВ.

В настоящее время для термодинамического анализа процессов осушения сжатого воздуха с холодной и горячей регенерацией адсорбента используются I-d-диаграммы [17]. Методики точного аналитического определения $\alpha_{\text{хр}}$, доведенные до

уровня алгоритма, в доступной литературе не обнаружены.

Научная и техническая новизна нашего исследования состоит в теоретическом обосновании, разработке и алгоритмизации расчетного метода определения доли осушенного воздуха, отводимой от потока для холодной регенерации адсорбента в УОВ.

ХРА представляется как тепло- и массообменный процесс испарения конденсата влаги с поверхности адсорбента в поток осушенного воздуха, омывающего эту поверхность. Процесс рассматривается в локальном пограничном слое вблизи поверхности водяной пленки на грануле адсорбента. Поток ненасыщенного воздуха, омывающий поверхность испаряющейся пленки, полагается плоскопараллельным и стационарным. В пограничном слое у поверхности испаряющейся водяной пленки навстречу друг другу движутся потоки теплоты и массы двухкомпонентной системы, состоящей из водяного пара и осушенного воздуха.

Диффузия водяного пара в пограничном слое такой двухкомпонентной системы (бинарная диффузия) описывается известным уравнением [18]:

$$\overline{m}_n = -\frac{\mu_n}{\mu} \rho D \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{N_n}{N} \right) + \frac{k_T}{T} \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где \overline{m}_n – плотность массового потока пара в направлении y , кг/(м²·с); μ_n , μ – молекулярная масса водяного пара и смеси водяного пара и осушенного воздуха, кг/кмоль; ρ – плотность смеси, кг/м³; D – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в двухкомпонентной смеси, м²/с; N_n , N – число киломолей пара и смеси.

Теоретические выкладки, приводимые ниже, призваны показать все предположения, допущения и позволяют свести расчет тепло- и массообменных процессов при ХРА к определению температуры адиабатного насыщения воздуха, известной как «температура мокрого термометра».

Так как в рассматриваемом пограничном слое отсутствуют большие температурные перепады, то слагаемое $\frac{k_T}{T} \frac{\partial T}{\partial y}$, учитыва-

ющее термодиффузию, полагается равным нулю. Здесь k_T – термодиффузионное соотношение ($k_T D$ – коэффициент термодиффузии).

Как следует из молекулярно-кинетической теории газов, при $\mu_n \cong \mu$ имеет место

тройная аналогия – аналогия процессов переноса теплоты, количества движения и массы. При этом $\lambda \cong C_p \rho v \cong C_p \rho D$ или

$a \cong v \cong D$, где $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ – коэффициент тепло-

ратуропроводности смеси, м²/с; v – коэффициент кинематической вязкости смеси, м²/с.

При $a \cong v \cong D$ тепловое число Прандтля $Pr = \frac{v}{a}$ равно диффузионному числу

Шмидта $Sc = \frac{v}{D}$, т. е. поля температуры, скорости и концентрации смеси в пограничном слое у поверхности адсорбента подобны.

При движении смеси водяного пара и осушенного воздуха через слой регенерируемого адсорбента в пограничном слое у поверхности гранул происходит конвективный массообмен (конвективная диффузия). С учетом конвективного массообмена и в пренебрежении бародиффузией уравнение (1) приводится к виду

$$\vec{m}_n = -D \frac{\partial \rho_n}{\partial y} + \vec{\omega} \rho_n, \quad (2)$$

где $\vec{\omega}$ – вектор средней линейной скорости смеси.

Первое слагаемое в уравнении (2) соответствует молекулярному переносу, а второе – конвективному переносу пара смесью, движущейся со скоростью ω .

При небольших концентрациях пара в пограничном слое у поверхности жидкости уравнение (2) записывают по аналогии с уравнением Ньютона-Рихмана в виде

$$\dot{m}_n = \beta (\rho_{n\infty} - \rho_{nw}), \quad (3)$$

где β – коэффициент конвективной теплоотдачи, м/с; $\rho_{n\infty}$ и ρ_{nw} – плотность пара на поверхности жидкости и за пределами пограничного слоя, кг/м³.

В предположении равенства теплового (δ_T) и диффузионного (δ_m) пограничных слоев из известных соотношений $\alpha = \lambda / \delta_T$ и $\beta = D / \delta_m$ следует уравнение

$$\beta = \alpha \frac{D}{\lambda}. \quad (4)$$

Это уравнение позволяет определять β по известному α .

Один килограмм сухого насыщенного пара (СНП), образующегося при испарении водяной пленки на поверхности гранул,

переносит в поток смеси скрытую теплоту парообразования (r). Теплота от движущейся смеси к водяной пленке передается посредством конвективной теплоотдачи. При установившемся режиме тепло- и массопереноса температура на поверхности пленки равновесная и выполняется балансовое соотношение

$$\alpha (t_{n\infty} - t_{nw}) = \dot{m}_n r_{nw}, \quad (5)$$

которое с учетом (3) имеет вид

$$\alpha (t_{n\infty} - t_{nw}) = \beta (\rho_{n\infty} - \rho_{nw}) r_{nw}, \quad (6)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); t_{nw} и $t_{n\infty}$ – температуры на поверхности водяной пленки и за пределами пограничного слоя, °С.

Значения α и β определяются из критериальных уравнений вида

$$Nu = C_1 Pr^{n_1} Re^{m_1} \quad (7)$$

$$Nu_m = C_2 Sc^{n_2} Re^{m_2}, \quad (8)$$

где Nu и Nu_m – тепловое и диффузионное числа Нуссельта.

При $a \cong v \cong D$ из уравнений (6), (4) следует соотношение

$$t_{n\infty} - t_{nw} = \frac{\beta r_{nw}}{\alpha} (\rho_{n\infty} - \rho_{nw})$$

или

$$t_{nw} = t_{n\infty} - \frac{r_{nw}}{C_p \rho} (\rho_{nw} - \rho_{n\infty}). \quad (9)$$

При

$$\rho_{nw} = d_w \rho_{сyx} \approx \frac{P_{nw}}{R_n T}; \quad \rho_{n\infty} = d_{\infty} \rho_{сyx} \approx \frac{P_{n\infty}}{R_n T} \quad (10)$$

$$t_{nw} = t_{n\infty} - \frac{r_{nw} \rho_{сyx}}{C_p \rho} (d_w - d_{\infty}), \quad (11)$$

где d_w , d_{∞} – влагосодержание паровоздушной смеси у поверхности водяной пленки и за пределами пограничного слоя, кг/кг_{сух}; $\rho_{сyx}$ – плотность сухого воздуха, кг/м³; P_{nw} , $P_{n\infty}$ – парциальное давление водяного пара над поверхностью водяной пленки и за пределами пограничного слоя, Па; R_n – удельная газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг·К).

Так как $\rho = \rho_{сyx} + \rho_{n\infty} = \frac{P_{сyx}}{R_{сyx} T} + \frac{\varphi}{v''}$ и

$$\frac{P_{сyx}}{R_{сyx} T} \gg \frac{\varphi}{v''}, \quad \text{то} \quad \rho \approx \rho_{сyx}, \quad \text{где } P_{сyx} - \text{парциальное}$$

давление сухого воздуха в смеси, Па; $R_{сyx}$ – удельная газовая постоянная сухого воздуха,

Дж/(кг·К); φ – относительная влажность смеси; V' – удельный объем сухого насыщенного пара при температуре смеси T , м³/кг.

Окончательно получаем

$$t_{nw} = t_{n\infty} - \frac{r_{nw}}{c_p} (d_w - d_{\infty}). \quad (12)$$

Температура на поверхности водяной пленки t_{nw} в теории влажного воздуха t_{nw} [19–21] называется истинной температурой мокрого термометра.

Таким образом, с учетом формулы (12) детальное рассмотрение сложных реальных процессов тепло- и массообмена, протекающих при ХРА осушенным воздухом, можно свести к расчету изменения влагосодержания и температуры воздуха. Влагосодержание ненасыщенного воздуха при его движении через слои адсорбента увеличивается за счет поверхностного испарения водяной пленки на гранулах адсорбента. Если теплота, необходимая для испарения влаги, берется только из ненасыщенного воздуха и самой водяной пленки (адиабатное испарение), то температура воздуха при прохождении через слой адсорбента постепенно понижается вплоть до температуры мокрого термометра t_{nw} . Пар на поверхности испаряющейся водяной пленки является насыщенным, поэтому состояние воздуха при достижении им температуры t_{nw} также будет насыщенным ($\varphi = 100\%$). На этом основании t_{nw} называют еще температурой адиабатного насыщения воздуха. При достижении воздухом температуры t_{nw} процесс влагообмена прекратится, поскольку парциальное давление пара во влажном воздухе с температурой t_{nw} равно давлению насыщенного пара на поверхности водяной пленки с такой же температурой. Вопрос об изменении значений t_{nw} в различных слоях регенерируемого адсорбента оставался открытым. Но опытным путем было установлено [22], что при адиабатной сушке влажного материала потоком ненасыщенного воздуха его поверхность в начале процесса принимает температуру мокрого термометра, которая практически постоянна по направлению потока. На основании этих результатов полагалось, что температура адиабатного испарения воды t_{nw} не изменяется во всех слоях адсорбента в течение всей фазы ХРА. Принятие t_{nw} величиной постоянной по направлению потока позволяет определить ее значение по влаго-

держанию и температуре воздуха, известным для какого-либо состояния воздуха в регенерируемом слое. Далее по найденному значению t_{nw} уже несложно определить долю осушенного воздуха, отбираемого на ХРА (α_{xp}).

Методика нахождения α_{xp} реализована в разработанном нами алгоритме вычислений. Каждый этап алгоритма сопровождается численным примером при исходных данных, упомянутых выше: атмосферный воздух с температурой $t_{атм} = 35^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi_{атм} = 75\%$ сжимается в компрессоре до абсолютного давления 0,801 МПа и осушается в УОВ до заданного значения температуры точки росы $t_p = +3^\circ\text{C}$. Абсолютное давление осушенного воздуха на выходе из УОВ равно 0,701 Па. Принято, что гидравлические потери давления воздуха при движении через слой адсорбента составляют $\Delta P_{гидр} \cong 0,1$ МПа.

Определение параметров влажного воздуха в фазе адсорбции.

Этап 1. Определяется начальное влагосодержание атмосферного воздуха, кг/кг_{сух}:

$$d_{атм} = 0,622 \frac{\varphi_{атм} (P_{нас})_{t_{атм}}}{B - \varphi_{атм} (P_{нас})_{t_{атм}}}, \quad (13)$$

где $(P_{нас})_{t_{атм}}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара при $t_{атм}$, МПа; B – атмосферное давление, МПа.

Пример:

$$d_{атм} = 0,622 \frac{0,75 \cdot 0,005622}{0,101 - 0,75 \cdot 0,005622} = 0,0271 \text{ кг/кг}_{сух}.$$

Этап 2. Определяется максимальное влагосодержание сжатого насыщенного воздуха в начале фазы адсорбции:

$$\begin{aligned} (d_{нач.адс})_{\max} &= (d_{\max})_{t_{нач.адс}} = \\ &= 0,622 \frac{(P_{нас})_{t_{нач.адс}}}{P_{нач.адс} - (P_{нас})_{t_{нач.адс}}}, \end{aligned} \quad (14)$$

где $P_{нач.адс}$ и $t_{нач.адс}$ – абсолютные давление, МПа, и температура насыщенного воздуха, $^\circ\text{C}$, в начале фазы адсорбции: $P_{нач.адс} = P_{сж.кон}$ и $t_{нач.адс} = t_{рес} = t_{атм}$; $P_{сж.кон}$ – абсолютное давление конечного сжатия в компрессоре, МПа; $t_{рес}$ – температура сжатого воздуха в конечном охладителе или в ресивере, $^\circ\text{C}$.

Пример:

$$(d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} = 0,622 \frac{0,005622}{0,801 - 0,005622} = 0,004397 \text{ кг/кг}_{\text{сух}}.$$

Неравенство $(d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} < d_{\text{атм}}$ объясняется конденсацией водяного пара сжатого воздуха в промежуточных и концевых охладителях компрессора и сепарацией перед его подачей в УОВ.

Этап 3. Определяется энтальпия сжатого воздуха, кДж/кг_{сух}, в начале фазы адсорбции:

$$I_{\text{нач.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{нач.адс}}} + d_{\text{нач.адс}} (i_{\text{п}})_{t_{\text{нач.адс}}}, \quad (15)$$

где $(i_{\text{сух}})_{t_{\text{нач.адс}}}$ и $(i_{\text{п}})_{t_{\text{нач.адс}}}$ – удельная энтальпия сухого воздуха и водяного пара, кДж/кг, при температуре $t_{\text{нач.адс}}$, °C:

$$(i_{\text{сух}})_{t_{\text{нач.адс}}} = 1,0048 t_{\text{нач.адс}}. \quad (16)$$

Если конденсат из охладителей компрессора не попадает в поток сжатого воздуха, подаваемого в УОВ, то

$$d_{\text{нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}; \quad (17)$$

$$I_{\text{нач.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{нач.адс}}} + (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} (i_{\text{п}}^{\text{''}})_{t_{\text{нач.адс}}}, \quad (18)$$

где $(i_{\text{п}}^{\text{''}})_{t_{\text{нач.адс}}}$ – удельная энтальпия, кДж/кг,

СНП при температуре $t_{\text{нач.адс}}$, °C (принимается по таблицам насыщенного водяного пара со входом по $t_{\text{нач.адс}}$).

Пример:

$$I_{\text{нач.адс}} = 1,0048 \cdot 35 + 0,004397 \cdot 2565 = 46,445 \text{ кДж/кг}_{\text{сух}}.$$

Этап 4. Определяется влагосодержание сжатого воздуха в конце фазы адсорбции, т. е. влагосодержание осушенного воздуха, кг/кг_{сух}, при котором обеспечивается требуемая температура точки росы $t_{\text{р}}$:

$$d_{\text{кон.адс}} = (d_{\text{max}})_{t_{\text{р}}} = 0,622 \frac{(P_{\text{нас}})_{t_{\text{р}}}}{(P_{\text{сж.кон}} - \Delta P_{\text{гидр}}) - (P_{\text{нас}})_{t_{\text{р}}}}, \quad (19)$$

где $t_{\text{р}}$ – заданное значение температуры точки росы, °C, осушенного воздуха, сжатого до давления $P_{\text{кон.адс}}$, МПа; $(P_{\text{нас}})_{t_{\text{р}}}$ – парциальное давление насыщения водяного пара осушенного воздуха, МПа, при температуре $t_{\text{р}}$; $\Delta P_{\text{гидр}}$ –

гидравлические потери давления воздуха при движении через слой адсорбента, МПа.

Пример:

$$d_{\text{кон.адс}} = 0,622 \frac{0,000758}{(0,801 - 0,1) - 0,000758} = 0,0006734 \text{ кг/кг}_{\text{сух}}.$$

Этап 5. Определяется температура сжатого воздуха в конце фазы адсорбции $(t_{\text{кон.адс}})$.

Определение $t_{\text{кон.адс}}$ производится с использованием формулы для энтальпии сжатого воздуха, кДж/кг_{сух}, в конце фазы адсорбции:

$$I_{\text{кон.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{кон.адс}}} + d_{\text{кон.адс}} (i_{\text{п}})_{t_{\text{кон.адс}}}, \quad (20)$$

где $(i_{\text{сух}})_{t_{\text{кон.адс}}} \approx 1,0048 t_{\text{кон.адс}}$ – удельная энтальпия сухого воздуха, кДж/кг, в осушенном насыщенном воздухе при $t_{\text{кон.адс}}$; $(i_{\text{п}})_{t_{\text{кон.адс}}}$ – удельная энтальпия перегретого водяного пара, кДж/кг, в осушенном ненасыщенном воздухе при $t_{\text{кон.адс}}$:

$$(i_{\text{п}})_{t_{\text{кон.адс}}} = 4,19(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}} + (r_{\text{п}})_{(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}}} + 1,96[t_{\text{кон.адс}} - (t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}}], \quad (21)$$

где $P_{\text{п кон.адс}}$ – парциальное давление пара в сжатом до давления $P_{\text{кон.адс}}$ воздухе в конце фазы адсорбции, МПа; $(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}}$ – температура насыщения пара при его парциальном давлении в сжатом воздухе, °C; $(r_{\text{п}})_{(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}}}$ – скрытая теплота парообразования воды при температуре $(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}}$, кДж/кг.

Так как в насыщенном и ненасыщенном воздухе при одинаковом давлении $P_{\text{кон.адс}}$ и одинаковом влагосодержании $d_{\text{кон.адс}}$ парциальное давление пара одинаково, то выполняется следующее равенство:

$$P_{\text{п кон.адс}} = (P_{\text{нас}})_{t_{\text{р}}}, \quad (22)$$

соответственно:

$$(t_{\text{нас}})_{P_{\text{п кон.адс}}} = t_{\text{р}}; \quad (23)$$

$$I_{\text{кон.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{кон.адс}}} + d_{\text{кон.адс}} \times$$

$$\times [4,19 t_{\text{р}} + (r_{\text{п}})_{t_{\text{р}}} + 1,96(t_{\text{кон.адс}} - t_{\text{р}})], \text{ кДж/кг}_{\text{сух.в}},$$

где

$$(r_{\text{п}})_{t_{\text{кон.адс}}} \approx 2500 - 2,23 t_{\text{р}}, \text{ кДж/кг} [18]. \quad (25)$$

Теплообменом воздуха в адсорбере с внешней средой обычно пренебрегают, что позволяет считать процесс адсорбции изотальпным:

$$I_{\text{кон.адс}} \approx I_{\text{нач.адс}} \quad (26)$$

При условии (26) значение $t_{\text{кон.адс}}$ определяется из решения уравнения

$$I_{\text{нач.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{кон.адс}}} + d_{\text{кон.адс}} [4,19 t_p + (2500 - 2,23 t_p) + 1,96(t_{\text{кон.адс}} - t_p)], \text{ кДж/кг}_{\text{сух.в}} \quad (27)$$

Уравнение (27) при исходных данных примера и заданном значении $t_p = 3^\circ\text{C}$ имеет вид

$$46,445 = 1,0048 t_{\text{кон.адс}} + 0,0006734 \times [4,19 \cdot 3 + (2500 - 2,23 \cdot 3) + 1,96(t_{\text{кон.адс}} - 3)].$$

Из этого следует $t_{\text{кон.адс}} = 44,5^\circ\text{C}$.

Примечание. Величину $t_{\text{кон.адс}}$ можно найти более простым путем: без использования $(t_{\text{нас}})_{P_{\text{кон.адс}}}$ и уравнения (23). Для этого вместо развернутой («точной») формулы для удельной энтальпии перегретого водяного пара (21) используется приближенная формула:

$$(i_p)_{t_{\text{кон.адс}}} = 2500 + 1,96 t_{\text{кон.адс}}, \text{ кДж/кг}. \quad (28)$$

Тогда

$$I_{\text{нач.адс}} = (i_{\text{сух}})_{t_{\text{кон.адс}}} + d_{\text{кон.адс}} (2500 + 1,96 t_{\text{кон.адс}}). \quad (29)$$

При исходных данных примера получаем

$$46,445 = 1,0048 t_{\text{кон.адс}} + 0,0006734(2500 + 1,96 t_{\text{кон.адс}}),$$

Из этого следует $t_{\text{кон.адс}} \approx 44,5^\circ\text{C}$.

Этап 6. Определяется относительная влажность сжатого воздуха в конце фазы адсорбции (относительная влажность осушенного воздуха на выходе из УОВ):

$$\phi_{\text{кон.адс}} = \frac{d_{\text{кон.адс}} (P_{\text{сж.кон}} - \Delta P_{\text{гидр}})}{(P_{\text{нас}})_{t_{\text{кон.адс}}} (0,622 + d_{\text{кон.адс}})}. \quad (30)$$

Пример:

$$\phi_{\text{кон.адс}} = \frac{0,0006734(0,801 - 0,1)}{0,00933(0,622 + 0,0006734)} = 0,0813.$$

Определение параметров влажного осушенного воздуха в фазе регенерации.

Этап 7. Определение влагосодержания, температуры и относительной влажности осушенного воздуха в начале фазы регенерации.

Для холодной регенерации адсорбента часть уже осушенного воздуха в УОВ отводится от потока и дросселируется от давления $P_{\text{кон.адс}}$ до $P_{\text{нач.рег}}$, близкого к атмосферному:

$$P_{\text{нач.рег}} = B + \Delta P_{\text{гидр}}. \quad (31)$$

Как известно, общее влагосодержание воздуха – это количество воды в килограммах во всех ее агрегатных состояниях, приходящееся на 1 кг сухого воздуха в составе влажного воздуха:

$$d_{\text{общ}} = d + d_{\text{ж}} + d_{\text{л}}, \text{ кг/кг}_{\text{сух.в}},$$

$$\text{где } d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{сух}}}; d_{\text{ж}} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{сух}}}; d_{\text{л}} = \frac{m_{\text{л}}}{m_{\text{сух}}}; m_{\text{п}}, m_{\text{ж}},$$

$m_{\text{л}}$, $m_{\text{сух}}$ – массы водяного пара, жидкой воды, льда и сухого воздуха во влажном воздухе, кг.

В осушенном воздухе $m_{\text{ж}} = 0$ и $m_{\text{л}} = 0$, поэтому его общее влагосодержание определяется отношением $d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{сух}}}$.

В процессе дросселирования массообмен потока с окружающей средой и внутри потока отсутствует ($m_{\text{п}} = \text{Const}$ и $m_{\text{сух}} = \text{Const}$), поэтому влагосодержание воздуха d при дросселировании не изменяется. На этом основании при дросселировании осушенного воздуха в УОВ выполняется равенство

$$d_{\text{нач.рег}} = d_{\text{кон.адс}}. \quad (32)$$

Принято допущение о примерном равенстве температур осушенного воздуха до и после его дросселирования в условиях УОВ:

$$t_{\text{нач.рег}} = t_{\text{кон.адс}}. \quad (33)$$

Это допущение легко обосновывается, если считать осушенный воздух в процессе дросселирования идеальным газом. Следует отметить, что на другие термодинамические процессы в УОВ это допущение не распространялось. Как известно, при дросселировании идеального газа его температура до и после местного сопротивления не изменяется, следовательно, температура осушенного воздуха, отобранного на регенерацию адсорбента, до и после дросселирования также практически не изменяется: $t_{\text{нач.рег}} \approx t_{\text{кон.адс}}$.

Далее обосновывается принятие осушенного воздуха идеальным газом.

Сухой воздух и перегретый водяной пар осушенного воздуха находятся при дросселировании в газообразном состоянии, при невысоком давлении ($P_2 < P_1 < 3$ МПа) и достаточно высокой температуре ($T_{\text{нач.рег}} \gg 273,15$ К). В таком состоянии любой газ считается идеальным.

С другой стороны, парциальное давление водяного пара в осушенном воздухе много меньше парциального давления сухого воздуха. Вследствие этого, термодинамическое состояние осушенного воздуха при дросселировании почти полностью определяется параметрами преобладающего компонента – сухого воздуха. В расчетах влажного воздуха его основной компонент (сухой воздух) обычно считается идеальным газом, поэтому осушенный воздух в процессе дросселирования в УОВ также допустимо считать идеальным газом.

Допущение о примерном равенстве температур осушенного воздуха до и после его дросселирования также можно обосновать, записав уравнение дросселирования $I_{\text{нач.рег}} \approx I_{\text{кон.адс}}$ в развернутом виде с использованием приближенной формулы $I \approx 1,0048t + d(2500 + 1,96t)$.

Если распространить эту формулу для энтальпии ненасыщенного воздуха на весь диапазон давления воздуха в УОВ, то уравнение дросселирования осушенного воздуха записывается в следующем развернутом виде:

$$1,0048t_{\text{нач.рег}} + d_{\text{нач.рег}}(2500 + 1,96t_{\text{нач.рег}}) \approx 1,0048t_{\text{кон.адс}} + d_{\text{кон.адс}}(2500 + 1,96t_{\text{кон.адс}}).$$

Так как $d_{\text{нач.рег}} = d_{\text{кон.адс}}$, то это уравнение выполняется лишь при условии $t_{\text{нач.рег}} \approx t_{\text{кон.адс}}$.

Обосновать допущение $t_{\text{нач.рег}} \approx t_{\text{кон.адс}}$ можно также с использованием Т-S-диаграмм сухого воздуха с нанесенными изоэнтальпиями. Такие диаграммы обычно применяются в криогенной технике. На этих диаграммах при типичных для УОВ давлениях и начальной температуре дросселирования осушенного воздуха (в рассматриваемом примере $t_1 \approx 40$ °С, $P_1 \approx 0,7$ МПа, $P_2 \approx 0,2$ МПа) изоэнтальпы идут почти параллельно изотермам. Это означает, что сухой воздух (компонент

осушенного воздуха) до и после дросселирования в условиях УОВ имеет практически одинаковую температуру, т. е. ведет себя почти как идеальный газ. В то же время дросселирование водяного пара (второго компонента осушенного воздуха) в области инверсионной кривой всегда сопровождается понижением температуры пара. Но в осушенном воздухе главным компонентом является сухой воздух, а водяной пар, содержащийся в малом количестве, практически не влияет на температурное состояние осушенного воздуха. Таким образом, можно считать, что температура осушенного воздуха в начале и конце процесса дросселирования в УОВ остается примерно одинаковой:

$$t_{\text{нач.рег}} \approx t_{\text{кон.адс}}.$$

При этом относительная влажность осушенного воздуха после дросселирования уменьшается:

$$\varphi_{\text{нач.рег}} = \frac{d_{\text{нач.рег}} P_{\text{нач.рег}}}{(P_{\text{нас}})_{t_{\text{нач.рег}}}(0,622 + d_{\text{нач.рег}})}. \quad (34)$$

Пример:

$$\varphi_{\text{нач.рег}} = \frac{0,0006734(0,101 + 0,1)}{0,00933(0,622 + 0,0006734)} = 0,023.$$

Этап 8. Определение температуры, влагосодержания и влажности воздуха в конце фазы регенерации.

Осушенный воздух конце фазы холодной регенерации адсорбента становится влажным насыщенным ($\varphi_{\text{кон.рег}} = 100\%$), а его давление понижается практически до атмосферного ($P_{\text{кон.рег}} \approx B$). В конце фазы ХРА парциальное давление СНП в насыщенном воздухе ($(P_{\text{нас}})_{t_{\text{кон.рег}}}$) равно давлению насыщенного пара на поверхности испаряющейся водяной пленки ($(P_{\text{нас}})_{t_{\text{п w}}}$), поэтому

$$t_{\text{кон.рег}} = t_{\text{п w}}. \quad (35)$$

Значение $t_{\text{п w}}$ полагается постоянным в течение всего процесса поглощения насыщенного пара движущимся воздухом. Температура и влажность воздуха в конце фазы ХРА ($t_{\text{кон.рег}}$ и $d_{\text{кон.рег}}$) определяются по значениям этих параметров в начале ХРА ($t_{\text{нач.рег}}$ и $d_{\text{нач.рег}}$). Методом последовательных приближений по $t_{\text{кон.рег}}$ решается следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} t_{\text{кон.рег}} &= t_{\text{нач.рег}} - \frac{(r_p)_{t_{\text{кон.рег}}}}{(c_p)_{\text{нач.рег}}} (d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}), \\ (r_p)_{t_{\text{кон.рег}}} &\approx 2500 - 2,23 t_{\text{кон.рег}}, \\ (c_p)_{\text{нач.рег}} &\approx 1,0048 + 1,96 d_{\text{нач.рег}}, \\ d_{\text{кон.рег}} &= 0,622 \frac{(P_{\text{нас}})_{t_{\text{кон.рег}}}}{B - (P_{\text{нас}})_{t_{\text{кон.рег}}}}, \\ (P_{\text{нас}})_{t_{\text{кон.рег}}} &\approx 950167 \frac{2224,2}{(t_{\text{кон.рег}} + 273,15)}. \end{aligned} \right. \quad (36)$$

Пример:

$$t_{\text{кон.рег}} = 16,2 \text{ } ^\circ\text{C}; d_{\text{кон.рег}} = 0,0123 \text{ кг/кг}_{\text{сух}}.$$

Этап 9. Определение минимальной доли осушенного воздуха для ХРА.

Массовая доля осушенного воздуха, отбираемая на холодную регенерацию ($\alpha_{\text{хр}}$), определяется из баланса влаги:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{адс}} G_{\text{сух}} (d_{\text{нач.адс}} - d_{\text{кон.адс}}) &= \\ = \tau_{\text{рег}} \alpha_{\text{хр}} G_{\text{сух}} (d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}). \end{aligned} \quad (37)$$

Из этого следует

$$\alpha_{\text{хр}} = \frac{\tau_{\text{адс}} (d_{\text{нач.адс}} - d_{\text{кон.адс}})}{\tau_{\text{рег}} (d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}})}, \quad (38)$$

где $\tau_{\text{адс}}$, $\tau_{\text{рег}}$ – продолжительность фаз адсорбции и регенерации, мин.

В УОВ с горячей регенерацией адсорбента выполняется соотношение

$$\tau_{\text{адс}} \leq \tau_{\text{рег}} + \tau_{\text{охл}}, \quad (39)$$

где $\tau_{\text{охл}}$ – продолжительность фазы охлаждения адсорбента после его регенерации.

В УОВ с холодной регенерацией адсорбента $\tau_{\text{охл}} = 0$, поэтому циклограмма автоматики УОВ упрощается и при $\tau_{\text{рег}}/\tau_{\text{адс}} = 1$ доля отбираемого осушенного воздуха ($\alpha_{\text{хр}}$) имеет минимальное значение:

$$\alpha_{\text{хр min}} = \frac{d_{\text{нач.адс}} - d_{\text{кон.адс}}}{d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}}. \quad (40)$$

Для рассматриваемого примера при

$$d_{\text{нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} \text{ получаем}$$

$$\alpha_{\text{хр min}} = \frac{0,004397 - 0,0006734}{0,01227 - 0,0006734} = 0,321.$$

Таким образом, не менее 32,1 % от массового расхода осушенного воздуха

необходимо без охлаждения отвести от потока и после дросселирования направить для ХРА в другую колонну УОВ.

Величина $\alpha_{\text{хр min}}$ существенно зависит от начальной температуры атмосферного воздуха.

Так, для рассматриваемого примера при $t_{\text{атм}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} d_{\text{нач.адс}} &= 0,622 \frac{0,002337}{0,801 - 0,0005622} = \\ &= 0,00182 \text{ кг/кг}_{\text{сух}} \end{aligned}$$

и

$$\alpha_{\text{хр min}} = \frac{(0,00182 - 0,0006734)}{(0,0123 - 0,0006734)} = 0,099.$$

Как видно, понижение $t_{\text{атм}}$ на $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ привело к уменьшению $\alpha_{\text{хр min}}$ в 3,25 раза.

Изменение $\varphi_{\text{атм}}$ не влияет на значение $\alpha_{\text{хр min}}$. Согласно (40), $\alpha_{\text{хр min}}$ определяется величиной $d_{\text{нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}$, которая, по (14), зависит лишь от давления конечного сжатия $P_{\text{сж.кон}}$ ($P_{\text{сж.кон}} = P_{\text{нач.адс}}$) и температуры воздуха в конечном охладителе или в ресивере компрессора ($t_{\text{нач.адс}} = t_{\text{рес}} \approx t_{\text{атм}}$).

Этап 10. Определение массовой доли осушенного воздуха для ХРА в случае попадания в адсорбер конденсата влаги из концевых охладителей компрессора.

Выше полагалось, что из компрессора в адсорбер подается сжатый воздух с влагосодержанием $d_{\text{нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}$, не содержащий конденсат влаги из концевых охладителей компрессора.

Если же конденсат влаги из концевых охладителей компрессора удаляется не полностью (или вообще не удаляется, как в упомянутом выше техническом задании), то в адсорбер подается механическая смесь насыщенного воздуха и конденсата влаги с общим влагосодержанием

$$\begin{aligned} d_{\text{общ.нач.адс}} &= \frac{m_{\text{снп}}}{m_{\text{сух}}} + \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{сух}}} = \\ &= (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} + \xi_{\text{ж}} d_{\text{ж}}, \end{aligned} \quad (41)$$

где $d_{\text{общ.нач.адс}}$ – общее влагосодержание «тумана» – смеси насыщенного воздуха и конденсата влаги, кг/кг_{сух}; $m_{\text{снп}}$ и $m_{\text{ж}}$ – масса влаги в виде СНП и жидкого конденсата, кг; $\xi_{\text{ж}}$ – массовая доля конденсата влаги из охладителей компрессора, попадающая в адсорбер (задается или определяется опытным путем);

$$d_{\text{ж}} = d_{\text{атм}} - (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}; \quad (42)$$

$$d_{\text{общ.нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} + \xi_{\text{ж}} (d_{\text{атм}} - (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}). \quad (43)$$

Вся влага «тумана» с влагосодержанием $d_{\text{общ.нач.адс}}$ должна быть полностью поглощена пористой поверхностью гранул адсорбента в адсорбере УОВ, находящемся в фазе адсорбции.

Конденсат влаги захватывается из «тумана» и полностью удерживается пористой поверхностью гранул адсорбента главным образом во фронтальных слоях его насыпки. Водяной пар насыщенного воздуха из «тумана» поглощается пористой поверхностью гранул адсорбента при движении воздуха через все слои адсорбента.

Таким образом, осушенный воздух получается лишь из одного компонента «тумана» – насыщенного воздуха с начальным влагосодержанием $(d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}$, определяемым по формуле (14).

Соответственно, начальная энтальпия воздуха в фазе его осушения также принимается равной энтальпии насыщенного воздуха, определяемой по формуле (18).

Так, все формулы этапов 1–10, включая изменение энтальпии, являются общими для любых потоков осушаемого воздуха: с удаленным, частично удаленным или неудаленным конденсатом влаги атмосферного воздуха.

Наличие капельного конденсата в «тумане», поступающем из компрессорной установки на адсорбцию, учитывается величиной $d_{\text{общ.нач.адс}}$, влияющей лишь на массу насыпки адсорбента и количество осушенного воздуха, отбираемого на регенерацию адсорбента.

Знания энтальпии «тумана» для расчета параметров воздуха регенерации не требуется, поскольку на регенерацию адсорбента в УОВ с ХРА отбирается уже осушенный («товарный») воздух, получаемый путем адсорбции влаги из главного компонента «тумана» – насыщенного воздуха с фиксированными для $t_{\text{нач.адс}}$ и $P_{\text{нач.адс}}$ величинами влагосодержания $(d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}$ и энтальпии $l_{\text{нач.адс}}$.

Если в адсорбер попадает капельный конденсат влаги из концевых охладителей компрессора, то на регенерацию адсорбента

необходимо будет отбирать увеличенное количество осушенного воздуха:

$$\alpha_{\text{хр}} > \alpha_{\text{хр min}},$$

где

$$\alpha_{\text{хр}} = \frac{d_{\text{общ.нач.адс}} - d_{\text{кон.адс}}}{d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}} = \frac{(d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} + \xi_{\text{ж}} (d_{\text{атм}} - (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}}) - d_{\text{кон.адс}}}{d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}}. \quad (44)$$

Для рассматриваемого примера получаем

$$d_{\text{общ.нач.адс}} = 0,004397 + \xi_{\text{ж}} (0,0271 - 0,004397), \text{ кг/кг}_{\text{сух}}.$$

При $\xi_{\text{ж}} = 1$ (случай, когда конденсат из компрессора и ресивера полностью попадает в адсорбер) получаем:

$$d_{\text{общ.нач.адс}} = d_{\text{атм}} = 0,0271 \text{ кг/кг}_{\text{сух}};$$

$$d_{\text{нач.адс}} = (d_{\text{нач.адс}})_{\text{max}} = 0,004397 \text{ кг/кг}_{\text{сух}};$$

$$d_{\text{кон.рег}} = 0,0123 \text{ кг/кг}_{\text{сух}};$$

$$\alpha_{\text{хр}} = \frac{d_{\text{общ.нач.адс}} - d_{\text{кон.адс}}}{d_{\text{кон.рег}} - d_{\text{нач.рег}}} = \frac{0,0271 - 0,0006734}{0,0123 - 0,0006734} = 2,273.$$

Получается, что при $d_{\text{общ.нач.адс}} = d_{\text{атм}} = 0,0271 \text{ кг/кг}_{\text{сух}}$ и $\xi_{\text{ж}} = 1$ величина $\alpha_{\text{хр}}$ должна превышать единицу, что совершенно нереально.

Таким образом, при исходных данных примера и $\xi_{\text{ж}} = 1$ применение ХРА исключено.

Выводы. Полученные по представленной методике результаты позволяют сделать вывод об адекватности модели и достижении цели исследования. Достоверность результатов очевидна благодаря применению в методике базовых физически понятных термодинамических закономерностей. Научная и техническая новизна исследования состоит в теоретическом обосновании, разработке и алгоритмизации расчетного метода определения доли осушенного воздуха, отводимой от потока для холодной регенерации адсорбента в УОВ. Методика может быть использована при выполнении предпроектных расчетов систем осушения воздуха компрессорных станций, к которым предъявляются определенные требования по влагосодержанию сжатого воздуха. Дальнейшим развитием исследования будет

разработка компьютерных программ, реализующих разработанную методику.

Список литературы

1. **Автономова И.В.** Компрессорные станции и установки. Ч. 2. Методы очистки газа на компрессорных станциях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. **Ветошкин А.Г.** Процессы и аппараты газоочистки: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пензен. гос. ун-та, 2006. – 228 с.
3. **Тарабонов М.Г.** Кондиционирование воздуха. Ч. 1. – М.: Авок-пресс, 2015.
4. **Вагин Е.В., Петухов С.С.** Адсорбционные методы очистки воздуха и продуктов его разделения // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1984. – № 7. – С. 18.
5. **Кельцев Н.В.** Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984.
6. **Козлов В.В., Шадрин В.С., Рахманов М.А.** Метод и программа расчета процессов тепло- и массопереноса при адсорбционном осушении сжатого воздуха // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2017. – № 3.
7. **Мозговой С.В.** Исследование процессов тепло- и массообмена при очистке газовых смесей в адсорбционных установках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2001. – 133 с.
8. **Математическое моделирование** процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема / В.Г. Матвейкин, С.Б. Путин, С.А. Скворцов, С.С. Толстошеин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2011. – № 3(34). – С. 64–71.
9. **Моделирование** динамических эффектов в слоях адсорбентов. Простой метод оценки теплопроводности слоя композитного адсорбента воды (CaCl_2 , импрегнированный в поры силикагельной матрицы) / Л.И. Хейфец, Д.М. Предтеченская, Ю.В. Павлов, Б.Н. Окунев // Вестник Моск. ун-та. Сер. Химия. – 2006. – Т. 47, № 4. – С. 274–277.
10. **Богославская Н.С., Устинов Е.А., Себалло А.А.** Динамика десорбции воды из цеолита нагретым потоком инертного газа // ЖПХ. – 1987. – № 12. – С. 2676–2680.
11. **Жибер А.В., Цирельман Н.М.** Точное решение задачи динамики адсорбции-десорбции с нелинейной изотермой сорбции // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1989. – № 5. – С. 107–112.
12. **Золотарев П.П.** Динамика адсорбции одного вещества в неподвижном слое зерен адсорбента // Физическая адсорбция в микропористых адсорбентах. – М.: Наука, 1979. – С. 59–66.
13. **Золотарев П.П., Дубинин М.М.** Об уравнениях, описывающих внутреннюю диффузию в гранулах адсорбентов // ДАН СССР. – 1973. – Т. 210, № 1. – С. 136–139.
14. **Моделирование** динамики адсорбции паров в неподвижных слоях микропористых адсорбентов и расчет основных характеристик кинетики адсорбции / Е.А. Устинов, Н.С. Поляков, К.М. Нико-

лаев, М.М. Дубинин // Изв. АН СССР. Сер. Химия. – 1981. – С. 49–55.

15. **Моделирование** сорбционных процессов разделения смесей / А.А. Себалло, В.А. Шиббаев, О.Л. Иванова и др. // ЖПХ. – 1988. – Т. 61, № 10. – С. 2244–2252.

16. **Новиков В.С.** Задачи и методы теории переноса (обзор) // Промышленная теплотехника. – 1989. – Т. 11, № 4. – С. 11–23.

17. **Руднева Е.С., Иншакова А.С.** Термодинамический анализ процессов осушения сжатого воздуха с холодной и горячей регенерацией адсорбента // Политехнический молодежный журнал № 08. – М.: МГТУ им. Н.Э. Бауман, 2019.

18. **Луканин В.Н.** Теплотехника. – М.: Высш. шк., 1999.

19. **Шпаковский Р.П.** Некоторые замечания к теории температуры «мокрого» термометра // Проблемы энергетики. – 2015. – № 7–8.

20. **Шпаковский Р.П.** Тепломассоперенос при испарении в газовый поток. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013.

21. **Лукашов В.В.** К определению температуры поверхности испаряющейся жидкости // Теоретические основы химической технологии. – 2003. – Т. 37, № 4. – С. 351.

22. **Krischer O.** Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. – Berlin: Springer-Verlag, 1956.

References

1. Avtonomova, I.V. *Kompressornye stantsii i ustanovki. Ch. 2. Metody ochistki gaza na kompressornykh stantsiyakh* [Compressor stations and installations. Part 2. Methods of gas purification at compressor stations]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman, 2011.
2. Vetoshkin, A.G. *Protsessy i apparaty gazoochistki* [Gas purification processes and apparatus]. Penza: Izdatel'stvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2006. 228 p.
3. Tarabonov, M.G. *Konditsionirovanie vozdukh. Ch. 1* [Air conditioning. Part 1]. Moscow: Avokpress, 2015.
4. Vagin, E.V., Petukhov, S.S. Adsorbtsionnye metody ochistki vozdukh i produktov ego razdeleniya [Adsorption methods for purifying air and its separation products]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 1984, no. 7, p. 18.
5. Kel'tsev, N.V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Basics of adsorption technology]. Moscow: Khimiya, 1984.
6. Kozlov, V.V., Shadrin, V.S., Rakhmanov, M.A. Metod i programma rascheta protsessov teplo- i massopere-nosa pri adsorbtsionnom osushenii szhatogo vozdukh [Method and program for calculating heat and mass transfer processes during adsorption drying of compressed air]. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2017, no. 3.
7. Mozgovoy, S.V. *Issledovanie protsessov teplo- i massoobmena pri ochistke gazovykh smesey v adsorbtsionnykh ustanovkakh*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Study of heat and mass transfer processes during

the purification of gas mixtures in adsorption units. Cand. Phys.-Math. Sci. Diss.]. Moscow, 2001. 133 p.

8. Matveykin, V.G., Putin, S.B., Skvortsov, S.A., Tolstoshein, S.S. Matematicheskoe modelirovanie protsessa adsorbtsionnogo kontsentrirvaniya uglekislogo gaza v sisteme zhizneobespecheniya uslovno-zamknutogo ob"ema [Mathematical modeling of the process of adsorption concentration of carbon dioxide in the life support system of a conditionally closed volume]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2011, no. 3(34), pp. 64–71.

9. Kheyfets, L.I., Predtechenskaya, D.M., Pavlov, Yu.V., Okunev, B.N. Modelirovanie dinamicheskikh effektiv v sloyakh adsorbentov. Prostoy metod otsenki teploprovodnosti sloya kompozitnogo adsorbenta vody (CaCl_2 , impregnirovannyy v pory silikagel'noy matritsy) [Modeling of dynamic effects in adsorbent layers. A simple method for assessing the thermal conductivity of a layer of composite water adsorbent (CaCl_2 , impregnated into the pores of a silica gel matrix)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Khimiya*, 2006, vol. 47, no. 4, pp. 274–277.

10. Bogoslavskaya, N.S., Ustinov, E.A., Seballo, A.A. Dinamika desorbtsii vody iz tseolita nagretyy potokom inertnogo gaza [Dynamics of water desorption from zeolite by a heated inert gas flow]. *ZhPKh*, 1987, no. 12, pp. 2676–2680.

11. Zhiber, A.V., Tsirel'man, N.M. Tochnoe reshenie zadachi dinamiki adsorbtsii-desorbtsii s nelineynoy izotermoy sorbtsii [Exact solution to the problem of adsorption-desorption dynamics with a nonlinear sorption isotherm]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1989, no. 5, pp. 107–112.

12. Zolotarev, P.P. Dinamika adsorbtsii odnogo veshchestva v nepodvizhnom sloe zeren adsorbenta [Dynamics of adsorption of one substance in a fixed layer of adsorbent grains]. *Fizicheskaya adsorbtsiya v mikroporistykh adsorbentakh* [Physical adsorption in microporous adsorbents]. Moscow: Nauka, 1979, pp. 59–66.

13. Zolotarev, P.P., Dubinin, M.M. Ob uravneniyakh, opisyyayushchikh vnutrennyuyu diffuziyu v granulakh adsorbentov [On the equations describing internal diffusion in adsorbent granules]. *DAN SSSR*, 1973, vol. 210, no. 1, pp. 136–139.

14. Ustinov, E.A., Polyakov, N.S., Nikolaev, K.M., Dubinin, M.M. Modelirovanie dinamiki adsorbtsii parov v nepodvizhnykh sloyakh mikroporistykh adsorbentov i raschet osnovnykh kharakteristik kinetiki adsorbtsii [Modeling the dynamics of vapor adsorption in fixed layers of microporous adsorbents and calculating the main characteristics of adsorption kinetics]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya: Khimiya*, 1981, pp. 49–55.

15. Seballo, A.A., Shibaev, V.A., Ivanova, O.L., Rybkina, L.A., Plachenov, T.G. Modelirovanie sorbtsionnykh protsessov razdeleniya smesey [Modeling of sorption processes for separation of mixtures]. *ZhPKh*, 1988, vol. 61, no.10, pp. 2244–2252.

16. Novikov, B.C. Zadachi i metody teorii perenosu (obzor) [Problems and methods of transfer theory (review)]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 1989, vol. 11, no. 4, pp. 11–23.

17. Rudneva, E.S., Inshakova, A.S. Termodinamicheskiy analiz protsessov osusheniya szhatogo vozdukha s kholodnoy i goryachey regeneratsiyey adsorbenta [Thermodynamic analysis of compressed air drying processes with cold and hot regeneration of the adsorbent]. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal № 08*. Moscow, 2019.

18. Lukanin, V.N. *Teplotekhnika* [Heat engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 1999.

19. Shpakovskiy, R.P. Nekotorye zamechaniya k teorii temperatury «mokrogo» termometra [Some comments on the theory of “wet” thermometer temperature]. *Problemy energetiki*, 2015, no. 7–8.

20. Shpakovskiy, R.P. *Teplomassoperenos pri isparenii v gazovyy potok* [Heat and mass transfer during evaporation into a gas flow]. N. Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva, 2013.

21. Lukashov, V.V. K opredeleniyu temperatury poverkhnosti isparayushcheyasya zhidkosti [To determine the surface temperature of an evaporating liquid]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2003, vol. 37, no. 4, pp. 351.

22. Krischer, O. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1956.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3+534.87+608.2

Максим Викторович Вечеркин

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Россия, Магнитогорск, e-mail: vecherkin@inbox.ru

Андрей Юрьевич Леднов

ООО «ДМА», инженер, Россия, Магнитогорск, e-mail: lednov@mail.ru

Анвар Сабулханович Сарваров

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: anvar@magtu.ru

Денис Михайлович Долгушин

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Россия, Магнитогорск, e-mail: denisdolgushin@mail.ru

Математическая модель для выбора границ диапазонов частот при регистрации акустических сигналов частичных разрядов в высоковольтных трансформаторах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Повреждение изоляции является одной из основных причин неисправностей в высоковольтных трансформаторах. Информативными характеристиками, отражающими состояние изоляции, являются характеристики частичных разрядов. Одним из эффективных способов мониторинга технического состояния высоковольтных трансформаторов является регистрация и анализ акустических сигналов частичных разрядов. Однако в настоящее время отсутствуют общепризнанные методики диагностирования трансформаторов, основанные на анализе таких сигналов. Это обусловлено рядом недостаточно исследованных проблем, одна из которых – неопределенность границ частотного диапазона для практического измерения акустических сигналов частичных разрядов. В связи с этим разработка математической модели для выбора границ диапазонов частот при регистрации акустических сигналов частичных разрядов в высоковольтных трансформаторах является актуальной задачей.

Материалы и методы. Исследование импедансной математической модели, учитывающей основные акустические свойства маслонаполненного трансформатора как многослойного объекта, проведено с использованием характерного параметра – коэффициента пропускания, определяющего долю амплитуды акустического сигнала, прошедшего через объект.

Результаты. Получены зависимости коэффициента пропускания от частоты акустического сигнала для различных толщин стальной стенки бака трансформатора. Показано, что эти зависимости для разных толщин существенно различаются лишь в высокочастотной области.

Выводы. При анализе частотных зависимостей коэффициента пропускания акустических сигналов можно выделить достаточно узкий диапазон частот, содержащий максимальные значения этого коэффициента. Этот частотный диапазон можно рекомендовать в качестве рабочей полосы частот при выборе или создании средств измерений акустических сигналов частичных разрядов, а также при поиске диагностических признаков состояния изоляции в маслонаполненном высоковольтном оборудовании.

Ключевые слова: частичный разряд, высоковольтный трансформатор, акустический сигнал, акустический импеданс, коэффициент пропускания

Maksim Viktorovich Vecherkin

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Physics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: vecherkin@inbox.ru

Andrey Yuryevich Lednov

"DMA" LLC, Engineer, Russia, Magnitogorsk, e-mail: lednov@mail.ru

Anvar Sabul Khanovich Sarvarov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: anvar@magtu.ru

Denis Mikhailovich Dolgushin

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor of Physics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: denisdolgushin@mail.ru

Mathematical model for selection of frequency range boundaries when recording acoustic signals of partial discharges in high-voltage transformers

Abstract

Background. Insulation damage is one of the main causes of faults in high-voltage transformers. Partial discharge characteristics are informative characteristics reflecting the state of insulation. One of the effective ways to monitor the technical condition of high-voltage transformers is to record and analyze acoustic signals of partial discharges. However, at present there are no generally recognized methods of transformer diagnostics based on the analysis of such signals. It is due to several understudied problems, one of which is the uncertainty of the boundaries of the frequency range for practical measurement of acoustic signals of partial discharges. Thus, the development of a mathematical model to select the boundaries of frequency ranges when recording acoustic signals of partial discharges in high-voltage transformers is an urgent task.

Materials and methods. The study of the impedance mathematical model, which considers the basic acoustic properties of an oil-filled transformer as a multilayer object, has been carried out using a characteristic parameter, i.e. the transmission coefficient. It determines the fraction of the amplitude of the acoustic signal that has passed through the object.

Results. The dependences of the transmittance coefficient on the frequency of the acoustic signal for different thicknesses of the steel wall of the transformer tank have been obtained. It is shown that these dependences for different thicknesses differ significantly only in the high-frequency region.

Conclusions. When analyzing the frequency dependences of the acoustic signal transmission coefficient, it is possible to identify a rather narrow frequency range containing the maximum values of this coefficient. This frequency range can be recommended as an operating frequency band when selecting or creating measuring instruments for acoustic signals of partial discharges, as well as when searching for diagnostic signs of insulation in oil-filled high-voltage equipment.

Key words: partial discharge, high-voltage transformer, acoustic signal, acoustic impedance, transmittance

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.051-057

Введение. Мониторинг технического состояния высоковольтных силовых трансформаторов является важной задачей, решение которой обеспечивает безаварийную работу энергоёмких потребителей во всех отраслях промышленности.

Одной из основных причин возникновения неисправностей в высоковольтных трансформаторах является повреждение изоляции. Наиболее информативными характеристиками, отражающими состояние изоляции, являются характеристики ча-

стичных разрядов (ЧР). Появление и увеличение интенсивности ЧР является достоверным признаком повреждения изоляции и сигналом зарождающейся неисправности [1, 2]. Анализ характеристик ЧР является эффективным средством оценки текущего технического состояния высоковольтного оборудования.

Электрические параметры ЧР, а также методики испытаний высоковольтных силовых трансформаторов нормируются специальными документами¹. Способы регистрации и обработки электрических сигналов ЧР многократно описаны в литературе [1, 2, 3]. Направление, связанное с анализом электрических сигналов ЧР, продолжает развиваться. Имеются исследования, связанные с реализацией метода применительно к современным цифровым трансформаторам тока и напряжения [4].

Основной проблемой, возникающей при проведении измерений электрических сигналов ЧР в высоковольтных трансформаторах, является очень сложная отстройка от многочисленных электромагнитных помех [3]. Помехи могут быть обусловлены грозовыми разрядами, коронными разрядами на вводах трансформатора, ЧР, возникающими в других устройствах, которые могут по соединительным линиям наводиться в исследуемом трансформаторе, и другими причинами.

Перспективным направлением мониторинга высоковольтных силовых трансформаторов является регистрация и анализ акустических сигналов ЧР [5]. Считается, что метод акустической регистрации ЧР позволяет избавиться от влияния электромагнитных помех, возникающих в высоковольтных трансформаторах. Кроме этого, акустический метод обеспечивает оперативное выявление и локализацию неисправностей трансформаторов без снятия напряжения [6, 7].

Для высоковольтных трансформаторов в настоящее время отсутствуют нормируемые характеристики акустических сигналов ЧР и общепризнанные методики диагностирования неисправностей, основанные на анализе таких сигналов. Это обусловлено рядом недостаточно исследованных проблем, одна из которых – неопределенность границ частотного диапа-

зона для измерения акустических сигналов ЧР. Как следствие, выпускаемые серийно акустические регистраторы ЧР имеют существенный разброс рабочих диапазонов частот (табл. 1).

Таблица 1. Акустические регистраторы частичных разрядов

Фирма-производитель	Название прибора	Частотный диапазон
НПО «Техносервис-Электро» (Russia)	Система «СПЕКТР»	40–160 кГц
HVPD (Great Britain)	HVPD Longshot	0–200 МГц
ООО DIMRUS (Russia)	«AR-700»	30–300 кГц
UE SYSTEMS INC. (USA)	«Ultraprobe»	20–100 кГц
Doble Engineering Company (USA)	«DFA-100»	1,0 кГц–1,0 МГц

При этом все приборы позиционируются как универсальные, предназначенные для обследования трансформаторов всех конструкций и мощностей.

Частичный разряд представляет собой локальный лавинный разряд в газовой поре диэлектрика или пробой малых объемов твердого или жидкого диэлектрика [8]. Большое разнообразие влияющих факторов и условий возникновения определяет широкий диапазон частот электромагнитных и акустических сигналов, сопровождающих ЧР.

Акустические сигналы ЧР охватывают звуковой и ультразвуковой диапазоны частот.

Звуковой диапазон до 1 кГц неприемлем для использования, поскольку в нем имеется множество акустических помех, обусловленных вибрацией электромагнитной системы трансформатора на гармониках промышленной частоты, а также работой вспомогательных устройств, например маслонасосов и вентиляторов системы охлаждения².

Верхнюю границу частотного диапазона при практических измерениях определяют в пределах от 500 до 700 кГц³. Ти-

¹ IEC 60270(2000) High-voltage test techniques. Partial discharge measurements.

² Вибродиагностика трансформаторов [Сайт]: <http://vibropoint.ru/vibrodiagnostika-transformatorov/>

³ Частотный диапазон для регистрации частичных разрядов [Сайт]: <https://dimrus.ru/texts/freqpd.html>

повым значением верхней границы считается 600 кГц [9].

Для систем мониторинга, использующих внутренние, встроенные в бак трансформатора датчики [10], такое значение верхней границы частотного диапазона может быть оправданным. Однако большинство приборов используют датчики, устанавливаемые на внешней стороне бака трансформатора [5, 6, 7]. При этом высокочастотные ультразвуковые сигналы испытывают сильное затухание вследствие рассеяния, отражения и поглощения в многослойной конструкции [11]. Завышенное значение верхней границы частотного диапазона измерений ведет к неоправданному усложнению и удорожанию измерительной аппаратуры, резко повышает требования к качеству акустического контакта датчика и поверхности бака трансформатора.

Задачей настоящего исследования является обоснованное определение верхней f_1 и нижней f_2 границ частотного диапазона для практического измерения акустических сигналов ЧР в реальных условиях.

Определение четких границ частотного диапазона позволит выработать единые требования к метрологическим характеристикам измерительной аппаратуры, минимизировать ее стоимость и сосредоточить внимание исследователей на разработке методик диагностирования высоковольтных силовых трансформаторов.

Методы исследования. Маслонаполненные высоковольтные силовые трансформаторы имеют различную конструкцию и толщину стенок бака. Стальные стенки бака покрываются слоем краски, внутри – маслостойкой, снаружи – антикоррозийной. Толщина слоев может варьироваться в некоторых пределах. Таким образом, трансформатор с точки зрения распространения акустического сигнала представляет собой многослойную структуру. Каждый из слоев имеет акустический импеданс, определяемый его геометрией и физическими свойствами. Импеданс каждого отдельного слоя и всей многослойной структуры зависит от частоты сигнала.

Для теоретических исследований был выбран коэффициент пропускания, который определяет долю амплитуды акустического сигнала, прошедшего через многослойную структуру:

$$W = \frac{A_1}{A_0},$$

где A_0 – амплитуда падающего акустического сигнала; A_1 – амплитуда прошедшего акустического сигнала.

Коэффициент пропускания W является функцией частоты акустического сигнала f . Получив зависимость $W(f)$, можно выделить диапазон частот, в которых ЧР могут регистрироваться с наибольшей эффективностью. Для получения зависимости $W(f)$ использовалась импедансная математическая модель [12] многослойной структуры.

В модели приняты следующие допущения:

- 1) источник ЧР является точечным и находится в изотропной среде с известными акустическими свойствами (ближнее полупространство);
- 2) стенка бака трансформатора представляется бесконечной плоскостью;
- 3) каждый из слоев стенки бака однороден по толщине и акустическим свойствам;
- 4) для регистрации сигнала используется измерительный преобразователь, имеющий идеальный акустический контакт с поверхностью (дальнее полупространство).

Исходными данными для расчета являются:

- количество слоев n ;
- толщины слоев d_i ;
- скорости акустических колебаний в каждом слое c_i ;
- плотность каждого слоя ρ_i ;
- скорость акустических колебаний в ближнем полупространстве c_0 ;
- плотность ближнего полупространства ρ_0 ;
- скорость акустических колебаний в дальнем полупространстве c_{n+1} ;
- плотность дальнего полупространства ρ_{n+1} .

Коэффициент пропускания по амплитуде для колебаний с частотой f рассчитывается в следующем порядке.

1. Задаются численные значения исходных данных для расчета.

2. Рассчитывается импеданс ближнего полупространства:

$$Z_{\text{вх}}^0 = \rho_0 c_0.$$

3. Рассчитывается входной акустический импеданс каждого слоя от 1 до n :

$$Z_{BX}^j = \frac{Z_{BX}^{j-1} - i Z_j \operatorname{tg}(k_j d_j)}{Z_j - i Z_{BX}^{j-1} \operatorname{tg}(k_j d_j)} Z_j,$$

где $Z_j = \rho_j c_j$ – акустический импеданс j -го слоя; $k_j = (2\pi f)/c_j$ – волновое число j -го слоя.

4. Рассчитывается коэффициент пропускания по амплитуде для фиксированной частоты f :

$$W = \prod_{j=1}^n \frac{Z_{BX}^j + Z_j}{Z_{BX}^j + Z_{n+1}} e^{i k_j d_j},$$

где $Z_{n+1} = \rho_{n+1} c_{n+1}$ – акустический импеданс дальнего полупространства.

Для получения зависимости $W(f)$ расчет коэффициента пропускания повторяется для набора частот из исследуемого диапазона 0–600 кГц.

Результаты исследования. На рис. 1 графически отображены результаты расчета коэффициента пропускания для различных толщин стальной стенки бака от 4 до 10 мм. В расчетах принималось, что толщина слоев маслостойкой и антикоррозийной краски одинакова и составляет 1 мм.

На зависимостях рис. 1 можно условно выделить две области: низкочастотную

и высокочастотную. В низкочастотной области (до 200 кГц) расположены первые максимумы зависимостей $W(f)$, в высокочастотной области (свыше 200 кГц) находятся второй и последующие максимумы. При этом максимумы коэффициента пропускания в низкочастотной области имеют существенно меньший разброс по частоте, чем в высокочастотной области.

Опыт практических измерений показывает, что при конструировании или выборе измерительной аппаратуры для диагностирования действующего оборудования рационально ориентироваться на низкочастотную область. Это связано с тем, что при измерениях в высокочастотной области резко повышаются требования к качеству акустического контакта датчика с поверхностью бака. В реальных условиях при измерениях на действующем оборудовании обеспечить такой контакт чрезвычайно сложно, в том числе по условиям безопасности. Многие промышленно выпускаемые регистраторы ЧР предполагают использование магнитных креплений датчиков, особенностью которых является сильное демпфирование акустических колебаний на высоких частотах.

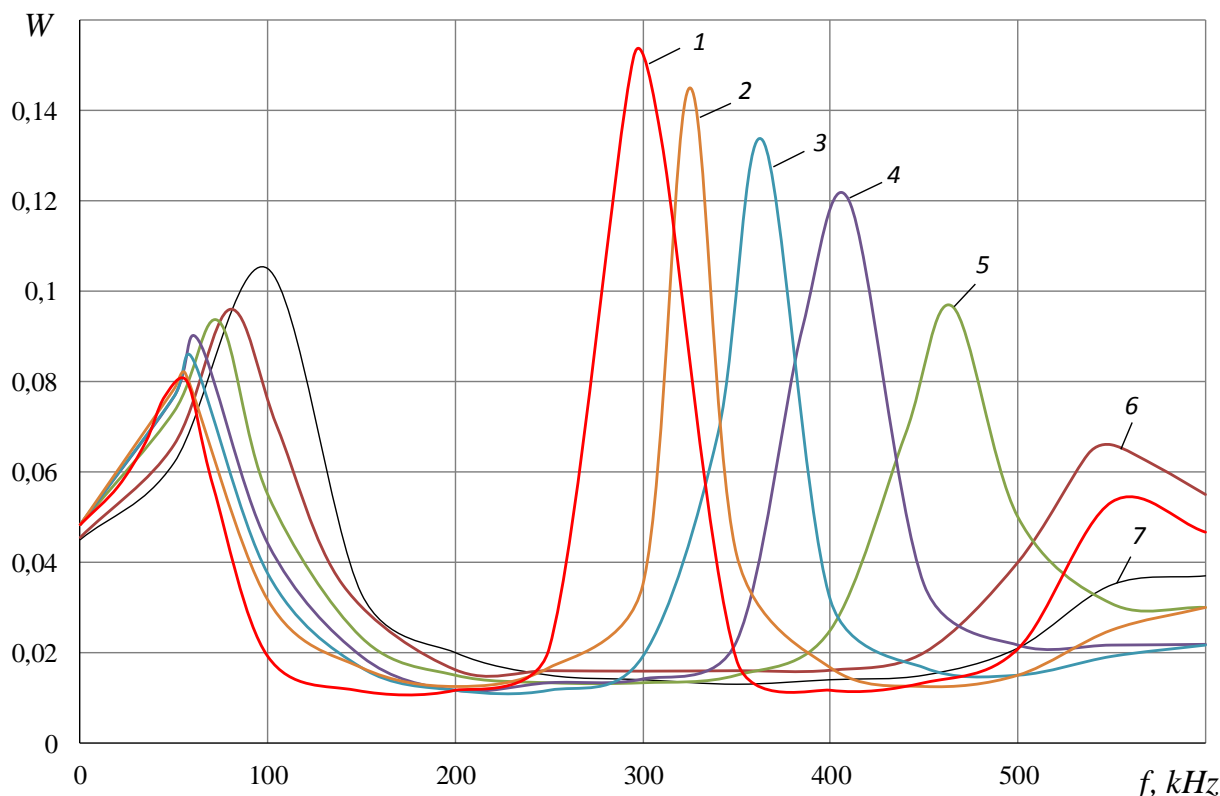


Рис. 1. Расчетные зависимости коэффициента пропускания по амплитуде от частоты при разных толщинах стали бака: 1 – 10 мм; 2 – 9 мм; 3 – 8 мм; 4 – 7 мм; 5 – 6 мм; 6 – 5 мм; 7 – 4 мм

Другим значимым фактором является то, что с ростом частоты возрастает затухание акустического сигнала в жидком диэлектрике – трансформаторном масле [11]. Анализ спектральных распределений, полученных в реальных условиях, показывает, что при использовании внешних датчиков уровень сигнала в высокочастотной области достаточно мал и соизмерим с уровнем помех [7].

Используем общепринятое определение полосы пропускания как диапазона частот, в котором изменения исследуемой величины W не превышают $\sqrt{2}/2$ от ее максимального значения W_m (рис. 2).

В табл. 2 приведены границы f_1 и f_2 , а также ширина полосы пропускания Δf для различных толщин стали стенок бака исследуемой модели в низкочастотной области.

Исходя из данных табл. 2, в качестве нижней границы выделяемого диапазона можно принять наименьшее значение частоты $f_1 = 21$ кГц, а в качестве верхней границы – наибольшее значение частоты $f_2 = 112$ кГц.

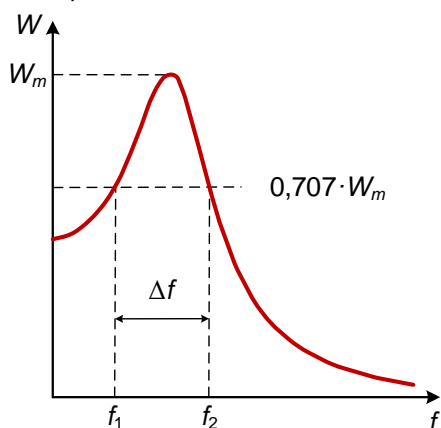


Рис. 2. Полоса пропускания в низкочастотной области: f_1 – нижняя граница; f_2 – верхняя граница; Δf – ширина полосы пропускания

Таблица 2. Результаты расчета границ и диапазона частот в зависимости от толщины стали стенки бака

Толщина стали бака, мм	f_1 , кГц	f_2 , кГц	Δf , кГц
4	60	112	52
5	51	102	51
6	43	93	50
7	35	85	50
8	31	80	49
9	24	76	52
10	21	68	47

Исследования модели показали, что вариация толщины слоев краски оказывает малое влияние на характер зависимости $W(f)$ в низкочастотной области и значительное влияние в высокочастотной области. Этот факт является еще одним аргументом в пользу выбора низкочастотной области.

С учетом вариации толщины слоев краски и стенки бака для измерений можно рекомендовать расширенный диапазон частот с $f_1 = 20$ кГц и $f_2 = 120$ кГц. Ширина полосы пропускания при этом составляет $\Delta f = 100$ кГц.

Выводы. Низкочастотная область более предпочтительна для измерения акустических сигналов ЧР внешними датчиками в целях контроля технического состояния высоковольтного оборудования.

Диапазон 20–120 кГц можно рекомендовать в качестве рабочей области частот при выборе или создании средств измерений акустических сигналов ЧР, а также при поиске диагностических признаков состояния изоляции в маслонаполненном высоковольтном оборудовании.

Выбор рекомендованного диапазона позволяет исключить влияние звуковых помех, минимизировать возможную вариацию геометрических параметров трансформатора на прохождение акустического сигнала, повысить эффективность измерения за счет учета акустических свойств объекта.

С учетом принятых в модели допущений рекомендованные границы частотного диапазона являются начальным приближением и могут служить основой для дальнейшего, более глубокого исследования вопроса с учетом конструктивных особенностей высоковольтных силовых трансформаторов, режимов их работы, локализации дефектов изоляции и других факторов.

Список литературы

1. Barnikas R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2002. – Vol. 9, No. 5. – P. 763–808.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007.
3. Rusov V.A. Measurement of partial discharges in insulation of high-voltage equipment. – Yekaterinburg, 2011. – 368 p.

4. **Экспериментальное** определение частичных разрядов в макете цифрового измерительного трансформатора дифференциальным методом / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, С.Н. Литвинов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 2. – С. 32–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.032-042.

5. **Sikorski W., Walczak K.** Power transformer diagnostics based on acoustic emission method // Acoustic emission—research and applications. – 2013. – Vol. 1. – P. 1–13. DOI: 10.5772/55211.

6. **Markalous M., Tenbohlen S., Feser K.** Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2008. – Vol. 15, No. 6. – P. 1576–1583.

7. **Николаев Ан.А., Храмшина Е.А., Николаев Ар.А.** Локализация неисправностей трансформатора средствами акустической локализации частичных разрядов // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. – № 1(38). – С. 48–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

8. **Коробейников С.М., Вечеркин М.В.** Физика возникновения, характеристика и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании // Электротехнические системы и комплексы. – 2010. – № 18. – С. 204–212.

9. **ShuJin Steven Tsai.** Power Transformer Partial Discharges (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis, Modeling and Simulation. – Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2002.

10. **Alison K. Lazarevich.** Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor. – Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2003.

11. **Голямина И.П.** Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

12. **Бреховских Л.М.** Волны в слоистых средах. – 2-е изд. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

References

1. Barnikas, R. Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2002, vol. 9, no. 5, pp. 763–808.

2. **Vdoviko, V.P.** *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovol'nogo oborudovaniya* [Partial discharges in diagnostics of high-voltage equipment]. Novosibirsk: Nauka, 2007.

3. **Rusov, V.A.** Measurement of partial discharges in insulation of high-voltage equipment. Yekaterinburg, 2011. 368 p.

4. **Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D., Litvinov, S.N.** Eksperimental'noe opredelenie chastichnykh razryadov v makete tsifrovogo izmeritel'nogo transformatora differentsial'nym metodom [Experimental determination of partial discharges in a digital measuring transformer layout by differential method]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 32–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.2.032-042.

5. **Sikorski, W., Walczak, K.** Power Transformer Diagnostics Based on Acoustic Emission Method. *Acoustic emission—research and applications*, 2013, vol. 1, pp. 1–13. DOI: 10.5772/55211.

6. **Markalous, M., Tenbohlen, S., Feser, K.** Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signals. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, vol. 15, no. 6, pp. 1576–1583.

7. **Nikolaev, An.A., Khramshina, E.A., Nikolaev, Ar.A.** Lokalizatsiya neispravnostey transformatora sredstvami akusticheskoy lokatsii chastichnykh razryadov [Transformer Fault Location by Means of Partial Discharges Acoustic Radar]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2018, no. 1(38), pp. 48–54. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-48-54](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-48-54)

8. **Korobeynikov, S.M., Vecherkin, M.V.** Fizika vznikhoveniya, kharakteristika i klassifikatsiya chastichnykh razryadov v vysokovol'tnom oborudovanii [Physics of occurrence, characteristics and classification of partial discharges in high-voltage equipment]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2010, no. 18, pp. 204–212.

9. **ShuJin Steven Tsai.** Power Transformer Partial Discharges (PD) Acoustic Signal Detection using Fiber Sensors and Wavelet Analysis, Modeling, and Simulation. Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2002.

10. **Lazarevich, Alison K.** Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor. Blacksburg, Virginia, U.S.A., 2003.

11. **Golyamina, I.P.** *Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya* [Ultrasound. A little encyclopedia]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1979. 400 p.

12. **Brekhovskikh, L.M.** *Volny v sloistyykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow: Nauka, 1973. 343 p.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры физики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: aitispu@mail.ru

Владислав Евгеньевич Розин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Марина Сергеевна Фадеева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: fadeeva-mc@yandex.ru

Евгений Русланович Соловьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: s.er-k@mail.ru

Наталья Владимировна Прохорова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-27, e-mail: klen7308@mail.ru

Разработка системы проектирования электрических реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности

Авторское резюме

Состояние вопроса. В современных САПР электротехнических устройств определяющую роль играет оптимизация, основанная на использовании поисковых методов решения нелинейных задач с дискретной или даже разрывной областью определения и областью решений. Растет также роль универсальных наукоемких моделей, позволяющих избавиться от необходимости проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции, что положительно сказывается на конкуренции в условиях мелкосерийного и штучного производства. При этом на производстве снижается количество опытных специалистов, способных лично разрабатывать методики проектирования устройств нетипового исполнения. В то же время мощные САПР остаются недоступными для предприятий малого и среднего бизнеса в сфере трансформаторостроения. Целью настоящего исследования является разработка доступного программного продукта, способного адаптироваться к изменяющейся номенклатуре конкретного предприятия.

Материалы и методы. Используются методы теории САПР трансформаторов, методы моделирования физических процессов в трансформаторах, дросселях и реакторах с использованием электрических схем замещения, поисковые методы решения нелинейных задач.

Результаты. Разработана САПР трансформаторов малой мощности, дросселей и реакторов с ферромагнитным сердечником. Для учебной версии САПР использованы пакеты MSExcel и MatLab, для коммерческой версии – MSExcel и математическая библиотека Python. Осуществлен поиск решения методом штрафных функций с использованием генетического алгоритма. Выполнены поверочные расчеты готового изделия с использованием единой научной базы, основанной на построении электрических схем замещения физических процессов произвольной природы. Построены цепные модели на основе авторской библиотеки моделирования электрических цепей.

Выводы. САПР реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности прошла апробацию на трех предприятиях РФ, специализирующихся на изготовлении трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов. Результаты исследования могут быть использованы при создании аналогичных систем проектирования электротехнических устройств.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, трансформаторы малой мощности, электрический реактор, дроссели, цепные модели физических процессов, генетические алгоритмы

Andrei Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Physics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: aitispu@mail.ru

Vladislav Evgenievich Rozin

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Marina Sergeevna Fadeeva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: fadeeva-mc@yandex.ru

Evgeny Ruslanovich Soloviev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: s.er-k@mail.ru

Natalya Vladimirovna Prokhorova

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-27, e-mail: klen7308@mail.ru

Development of design system for electrical reactors, chokes and low-power transformers

Abstract

Background. Optimization based on the use of search methods for solving nonlinear problems with a discret or even discontinuous domain of definition and solution domain plays a crucial role in modern CAD systems of electrical devices. The role of universal science-intensive models is also growing, allowing us to get rid of the need to conduct R&D and develop prototypes of products, which has a positive effect on competition in the conditions of small-scale and individual production. At the same time, the number of experienced specialists at production sites who can personally develop design methods for non-standard devices is decreasing. In the meantime, powerful CAD systems remain inaccessible for small and medium-sized businesses in the field of transformer engineering. The purpose of this study is to develop an accessible software product capable of adapting to the changing range of manufacture of a particular enterprise.

Materials and methods. The authors have used the methods of the theory of CAD of transformers, methods of modeling physical processes in transformers, chokes and reactors using electrical equivalent circuits, and search methods for solving nonlinear problems.

Results. A CAD system for low-power transformers, chokes and reactors with a ferromagnetic core has been developed. MSExcel and MatLab packages have been used for the educational version of the CAD system, while MSExcel and the Python mathematical library have been used for the commercial version. A genetic algorithm has been used to find a solution using the penalty function method. A single scientific base based on the construction of electrical equivalent circuits for physical processes of arbitrary nature has been used to verify the calculations of the finished product. The author's library for modeling electrical circuits has been used to develop chain models.

Conclusions. The CAD system of reactors, chokes and low-power transformers has been tested at three Russian enterprises specializing in the manufacture of low-power transformers, as well as chokes and reactors. The results of the work can be used to develop similar systems for designing electrical devices.

Key words: computer-aided design, low-power transformers, electric reactor, chokes, chain models of physical processes, genetic algorithms

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.058-066

Введение. Развитие компьютерных технологий в 70–80-е годы XX в. привело к идее создания САПР технических устройств,

в которых определяющую роль играет оптимизация, основанная на использовании поисковых методов решения нелинейных

задач с дискретной или даже разрывной областью определения и областью решений. В частности, в плане автоматизированного проектирования трансформаторов можно отметить пособие [1], где предлагается не только одна из самых востребованных на сегодня в России и в мире методик проектирования силовых трансформаторов, но и предлагается обобщенный метод расчета трансформаторов с использованием оптимизации на непрерывной модели.

Определенную роль в развитии теории оптимизации трансформаторов сыграла и школа САПР, созданная в эти годы в ИГЭУ [2, 3]. Материал, наработанный данной школой, был положен в основу современной версии САПР силовых трансформаторов класса напряжения до 35 кВ, разработанной и развиваемой в настоящее время в ИГЭУ на основе современных математических пакетов [4].

Ниже представлены результаты разработки облегченной версии расчетной подсистемы САПР однофазных и трехфазных трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов с ферромагнитным сердечником, потребность в которых постоянно растет. Соответственно, растет и количество малых предприятий, специализирующихся на изготовлении данных устройств.

Главная особенность таких предприятий состоит в отсутствии специалистов, способных не только спроектировать устройство с заданными техническими характеристиками по известной методике, но и адаптировать данную методику и расчетную систему к особенностям исполнений конкретных устройств, количество которых значительно, а апробированные методики либо недоступны, либо вообще отсутствуют. И это с учетом ограниченных возможностей в плане проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции.

При разработке системы автоматизированного проектирования реакторов, дросселей и трансформаторов малой мощности (САПР РДТ ММ) был использован как опыт советских времен [1, 2, 3, 5], так и рекомендации, адаптированные к настоящему времени [5, 6]. Отличительной особенностью разработанной системы является использование генетических алгоритмов при поиске оптимального решения, а также современных наукоемких методов имитационного моделирования трансформатора на основе теории нелинейных цепей.

Методы исследования. Дроссели и электрические реакторы с ферромагнитным сердечником можно рассматривать как трансформаторы, работающие в режиме холостого хода (ХХ). То есть основные положения методики их проектирования основываются на одинаковых с трансформаторами методах и допущениях.

В частности, наличие ферромагнитного магнитопровода позволяет использовать для магнитного расчета модель нелинейной магнитной цепи. Схема магнитной цепи для однофазного устройства приведена на рис. 1,а, для трехфазного устройства со стержневым магнитопроводом – на рис. 1,б.

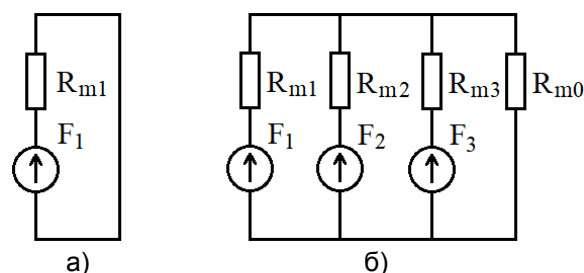


Рис. 1. Схема магнитной цепи однофазного (а) и трехфазного (б) устройств

Магнитное сопротивление магнитной цепи однофазного устройства или одной магнитной ветви трехфазного устройства может быть вычислено по формуле

$$R_{mk} = \sum_{j=1}^{N_k} v(B_{kj}) \frac{\ell_{kj}}{S_{kj}} + \sum_{j=1}^{N_{3k}} \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta_{kj}}{S_{3kj}}, \quad (1)$$

где k – номер ветви магнитной цепи; N_k , N_{3k} – количество ферромагнитных участков и количество зазоров в k -й магнитной ветви соответственно; $v(B_k)$ – зависимость удельного магнитного сопротивления $v = \frac{1}{\mu_0 \mu}$ от ам-

плитуды магнитной индукции на j -м участке k -й ветви B_{kj} (под участком в данном случае понимается фрагмент магнитопровода, имеющий постоянное активное сечение S_{kj}); μ – относительная магнитная проницаемость электротехнической стали магнитопровода; μ_0 – магнитная постоянная; ℓ_{kj} – длина средней линии магнитного поля на j -м участке k -й ветви; δ_{kj} , S_{3kj} – величина и расчетное сечение j -го зазора k -й ветви соответственно.

Если магнитопровод однофазного устройства имеет Ш-образную конструкцию, то его можно рассматривать как 2 параллельных П-образных магнитопровода, приведенных к схеме, показанной на рис. 1,а.

При построении кривой намагничивания электротехнической стали в форме $v(B)$ используется табличная кривая, которая берется из каталогов в форме $B(H)$ и пересчитывается по формуле

$$v = \frac{H}{B}, \quad (2)$$

где H, B – табличные значения напряженности и индукции магнитного поля в кривой намагничивания $B(H)$.

При этом индуктивность однофазного дросселя/реактора или одной (k -й) фазной обмотки трехфазного дросселя/реактора вычисляется по формуле

$$L_k = \frac{w_k^2}{R_{mk}} + L_{\sigma k}, \quad (3)$$

где w_k – количество витков в обмотке, охватывающей k -ю магнитную ветвь; $L_{\sigma k}$ – индуктивность k -й обмотки от потоков за пределами магнитопровода.

Величина R_{m0} (магнитное сопротивление нулевой последовательности) может быть рассчитана только с использованием результатов расчета магнитного поля. В то же время достаточная для инженерных расчетов точность может быть получена при допущении о равенстве величины R_{m0} бесконечности (отсутствие ветви R_{m0}) или достаточно большому значению, например $10^6 \text{ A/(Тл}\cdot\text{м}^3)$.

Индуктивность от потоков за пределами магнитопровода $L_{\sigma k}$ пренебрежительно мала по сравнению с потоком в магнитопроводе, поэтому ей можно пренебречь или рассчитать приблизительно при допущении об отсутствии в катушке ферромагнитного сердечника. При этом для цилиндрических обмоток справедлива формула

$$L_{\sigma k} = \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} L_{\sigma ij}, \quad (4)$$

где N_k – количество витков в k -й обмотке (с учетом того, что эффективный проводник может состоять из нескольких параллельных элементарных проводников); $L_{\sigma ij}$ – собственная (при $i = j$) индуктивность круглого витка, расположенного в воздухе, рассчитываемая по формуле Максвелла

$$L_{\sigma ii} = \mu_0 R_i \left(\ln \left(\frac{8R_i}{r} \right) - \frac{7}{4} \right), \quad (5)$$

или взаимная (при $i \neq j$) индуктивность, рассчитываемая по формулам:

$$L_{\sigma ij} = \mu_0 \sqrt{R_i R_j} \left[\left(k - \frac{2}{k} \right) K(k) + \frac{2}{k} E(k) \right]; \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{4R_i R_j}{(R_i + R_j)^2 + (z_j - z_i)^2}}, \quad (7)$$

где R_i, R_j – радиусы средних линий i -го и j -го витков; $E(k)$ – полный нормальный эллиптический интеграл Лагранжа 2-го рода; $K(k)$ – модуль эллиптического интеграла; z_i, z_j – координаты центров i -го и j -го витков по оси катушки [8].

В случае катушек прямоугольной формы можно воспользоваться одной из приближительных формул [9, 10], которые выведены из условия о том, что каждый виток катушки имеет форму идеального прямоугольника без учета скруглений углов:

$$L_{\sigma k} = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\begin{aligned} & -2 \cdot (a + b) + 2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} - \\ & -b \cdot \ln \left(\frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right) - \\ & -a \cdot \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right) + \\ & + b \cdot \ln \left(\frac{2b}{r} \right) + a \cdot \ln \left(\frac{2a}{r} \right) \end{aligned} \right]; \quad (8)$$

$$L_{\sigma k} = \frac{\mu_0}{\pi} \left[\begin{aligned} & a \cdot \ln \left(\frac{2ab}{r(a + \sqrt{a^2 + b^2})} \right) + \\ & + b \cdot \ln \left(\frac{2ab}{r(b + \sqrt{a^2 + b^2})} \right) + \\ & + 2 \cdot (r + \sqrt{a^2 + b^2} - (a + b)) \end{aligned} \right], \quad (9)$$

где a, b – длины сторон прямоугольного витка по средней линии; d – диаметр круглого проводника или толщина прямоугольного проводника.

Величина S_{3kj} может быть принята равной геометрической площади зазора (допущение об отсутствии выпячиваний линий магнитного поля в зазоре, величина которого обычно существенно меньше линейных размеров его сечения). Данное допущение тем оправданней, чем меньше величина зазора δ , тем более что технологические факторы оказывают, как правило, гораздо большее влияние на точность параметров изготовленного устройства, чем обозначенные неточности проектного расчета.

В итоге на практике любые неточности в плане несоответствия индуктивности изготовленного устройства результатам расчета компенсируются путем соответствующей коррекции величины зазоров при сборке устройства.

Расчет числа витков фазных обмоток трансформатора и дросселей осуществляется по известной формуле

$$w_k = \frac{U_k}{4,44 \cdot f \cdot B \cdot S}, \quad (10)$$

где U_k – фазное напряжение k -й обмотки; f – частота; B – амплитуда магнитной индукции в стержне, на котором располагается обмотка; S – активное сечение стержня.

Величина U_k в трансформаторах равна фазному напряжению первичной обмотки. В дросселях и реакторах U_k – это расчетная величина, равная падению напряжения в индуктивном сопротивлении, которая рассчитывается по формуле

$$U_k = 2\pi f L_n I_n, \quad (11)$$

где L_n , I_n – номинальная индуктивность и номинальный ток, заданные техническим заданием на проектирование.

Для теплового расчета проектируемых устройств используется метод электрических схем замещения тепловых процессов [11]. Это позволяет достаточно быстро корректировать алгоритм теплового расчета, при необходимости ввести изменения в САПР РДТ ММ, например при изменении тепловой схемы устройства. Для этого сначала разрабатывается тепловая цепь устройства, затем строится ее электрическая схема замещения, например, в среде MatLab Simulink SimPowerSystems [12].

Так, на рис. 2 приведена электрическая схема устройства с двумя охлаждающими каналами: один – между магнитопроводом и внутренней обмоткой, другой – внутри обмотки.

Данная модель может быть использована только для имитационного моделирования спроектированного устройства в произвольных режимах работы. В функции проектного расчета, которая вызывается многократно непосредственно в процессе оптимизации, такую модель использовать нельзя, так как обращение к модели MatLab Simulink на каждом шаге оптимизации сильно тормозит процесс поиска решения.

В связи с этим при оптимизации в САПР РДТ ММ используется модель тепловой цепи, реализованная с помощью библиотеки ECLib [13]. Для этого сначала в произвольном порядке нумеруются узлы и элементы электрической цепи (рис. 2), затем строятся матрица соединений данной цепи и матрица номиналов. Эти матрицы являются исходными данными для функции формирования и расчета цепной модели с использованием функционала ECLib.

Номиналы элементов модели тепловой цепи, приведенной на рис. 2, рассчитываются по формулам:

1) тепловые сопротивления теплопроводности

$$R_{\text{тп}} = \frac{1}{\lambda} \frac{b}{S}, \quad (12)$$

где λ – удельная теплопроводность материала; b – толщина участка тепловой цепи; S – площадь, пронизываемая тепловым потоком, на данном участке тепловой цепи;

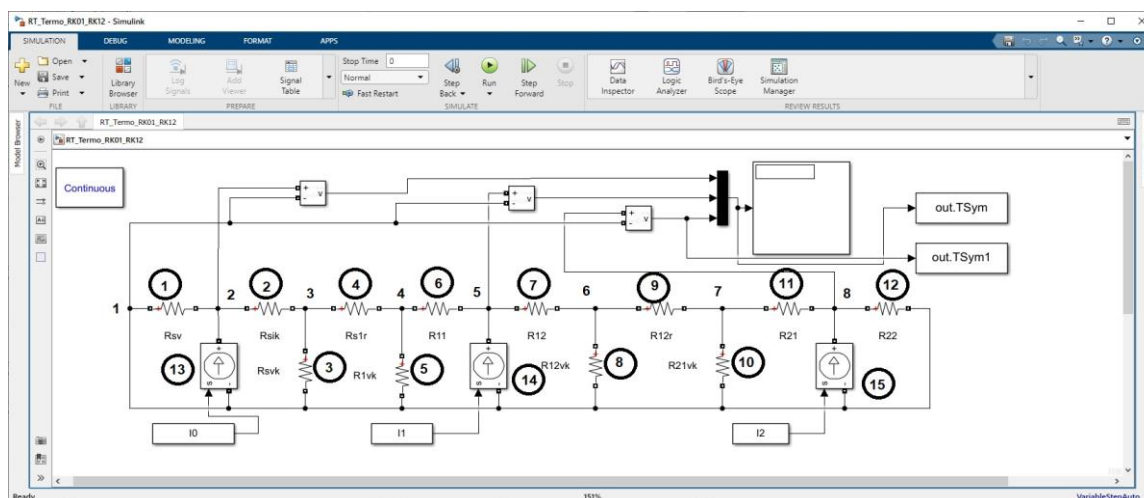


Рис. 2. Электрическая схема замещения теплового состояния устройства с двумя охлаждающими каналами (между магнитопроводом и обмоткой и внутри обмотки) в MatLab Simulink SimPowerSystems

2) тепловые сопротивления теплоотдачи

$$R_{\text{пто}} = \frac{1}{\alpha S}, \quad (13)$$

где α – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Удельные теплопроводности узлов устройства, которые имеют неоднородную структуру, рассчитываются по формуле теплоемкости комбинированной среды, например, для обмотки, изготовленной из изолированных прямоугольных проводников, расположенных в нескольких слоях:

$$\lambda = \frac{n_s(a_p + \delta_{\text{ип}}) + (n_s - 1)\delta_{\text{ис}}}{\frac{n_s a_p}{\lambda_m} + \frac{n_s \delta_{\text{ип}} + (n_s - 1)\delta_{\text{ис}}}{\lambda_{\text{и}}}}, \quad (14)$$

где n_s – количество слоев в концентре обмотки; a_p – толщина (в радиальном направлении) голого проводника; $\delta_{\text{ип}}$ – двусторонняя толщина изоляции провода; $\delta_{\text{ис}}$ – толщина межслоевой изоляции; λ_m , $\lambda_{\text{и}}$ – удельная теплопроводность материала металла проводника и материала изоляции.

Коэффициент теплоотдачи можно принять приблизительно равным:

1) $\alpha_k = 4 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$ при естественной конвективной теплоотдаче в охлаждающий канал;

2) $\alpha_p = 10 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$ при радиационном теплообмене между противоположными стенками охлаждающего канала;

3) $\alpha = 10\text{--}14 \text{ Вт/(К·м}^2\text{)}$ при естественной теплоотдаче от поверхности обмотки или магнитопровода в открытое пространство.

В настоящее время ведется работа по созданию уточненной методики расчета коэффициентов теплоотдачи с использованием соответствующих критериев подобия [14, 15].

Результатом теплового расчета являются значения температур обмоток и магнитопровода, рассчитываемые из допущения о равенстве температуры во всех точках соответствующего узла устройства.

В качестве функции цели процесса оптимизации проекта принимается стоимость активных материалов C_a , которая суммируется с системой штрафных функций:

$$F(\{X\}) = C_a(\{X\}) + \sum_{i=1}^{N_s} \begin{cases} (Y_{i\max} - Y_i(\{X\}))K_i, & \text{при } Y_i(\{X\}) > Y_{i\max}, \\ (Y_i(\{X\}) - Y_{i\min})K_i, & \text{при } Y_i(\{X\}) < Y_{i\min}, \\ 0, & \text{при } Y_{i\min} \leq Y_i(\{X\}) \leq Y_{i\max}, \end{cases} \quad (15)$$

где $\{X\}$ – вектор аргументов функции цели; $Y_i(\{X\})$ – значение i -го критерия (величина, вычисляемая в подсистеме проектного расчета на данном шаге поиска), на которое накладывается штраф при выходе данного значения за допустимые пределы, определяемые величиной $Y_{i\text{доп}}$; K_i – штрафной коэффициент, значение которого выбирается на основе субъективных оценок таким образом, чтобы соответствующий критерий заметно влиял на значение целевой функции.

Вектор аргументов функции цели можно условно разложить на два вектора:

$$\{X\} = \{X\}_{\text{const}} + \{X\}_{\text{var}}, \quad (16)$$

где $\{X\}_{\text{const}}$ – вектор аргументов, численные значения которых не изменяются в процессе поиска оптимального решения (как правило, это величины, имеющие справочный характер, например характеристики материалов, допустимые изоляционные расстояния, толщина изоляционного материала и т.п.); $\{X\}_{\text{var}}$ – вектор варьируемых величин, значения которых изменяются на каждом шаге оптимизации.

На варьируемые величины из вектора $\{X\}_{\text{var}}$ накладываются параметрические ограничения вида

$$X_{i\min} \leq X_i \leq X_{i\max}. \quad (17)$$

Так, в разработанной версии САПР РДТ ММ в качестве варьируемых параметров были использованы следующие величины:

- 1) магнитная индукция в магнитопроводе;
- 2) немагнитный зазор в магнитной ветви;
- 3) ширина стержня;
- 4) глубина стержня;
- 5) высота окна;
- 6) ширина (или диаметр) провода обмотки, в трансформаторах – каждой из обмоток (выбирается из таблицы проводов, имеющихся на складе);
- 7) толщина провода обмотки/обмоток (в случае использования прямоугольных проводников).

Ядром функции цели является функция проектного расчета. Алгоритм проектного расчета включает в себя следующие проектные процедуры:

- 1) расчет фазных и линейных токов (для трансформатора) и напряжений;
- 2) выбор количества параллелей обмотки (по оси и по радиусу); расчет сечения

элементарных и эффективных проводников; расчет размеров изолированных проводников;

3) расчет числа витков обмоток, раскладка обмоток по слоям, расчет геометрических размеров обмоток (с учетом наличия каналов), длины и массы провода, активного сопротивления, напряжения и потерь короткого замыкания;

4) расчет геометрических размеров и массы магнитопровода, средних силовых линий магнитного поля в магнитных ветвях, магнитных сопротивлений ветвей при заданной индукции по (1), индуктивности фазных обмоток (для дросселя и реактора) потерь и тока холостого хода;

5) тепловой расчет устройства;

6) расчет стоимости активных материалов C_a , являющейся основным критерием оптимальности найденного решения.

В качестве дополнительных критериев оптимальности найденного решения принимаются некоторые величины Y_i , вычисляемые в функции проектного расчета. На эти величины накладываются ограничения вида

$$Y_{i \min} \leq Y_i \leq Y_{i \max} \quad (18)$$

в виде штрафов в функции цели (15).

В качестве таких дополнительных критериев, на которые накладываются ограничения вида (18), в САПР РДТ ММ используются следующие расчетные величины:

- 1) температуры обмоток;
- 2) плотность тока;
- 3) отношение сторон прямоугольного сечения стержня магнитопровода;
- 4) потери холостого хода;
- 5) потери короткого замыкания;
- 6) ток холостого хода;
- 7) напряжение короткого замыкания;
- 8) высота устройства;
- 9) ширина устройства;
- 10) глубина устройства;
- 11) масса устройства;
- 12) число слоев внутренней обмотки;
- 13) число витков в слое внутренней обмотки.

Следует отметить, что итоговая индуктивность дросселя/реактора определяется не только числом витков, найденным по (10), но и геометрическими размерами магнитопровода, особенно величиной зазора. Поэтому величина индуктивности спроектированного устройства, рассчитанная по (3), может существенно отличаться

от требуемого значения. В связи с этим при оптимизации дросселей и реакторов еще одним (причем основным) критерием оптимальности текущего варианта расчета является именно итоговая индуктивность L_t , рассчитанная по (3) на t -й итерации поиска при текущих значениях составляющих вектора $\{X\}_{var\ t}$, т. е. в (15):

$$\begin{aligned} Y_1 &= L_t, \\ Y_{1 \min} &= L_H - \Delta L_{\text{доп}}, \\ Y_{1 \max} &= L_H + \Delta L_{\text{доп}}, \end{aligned} \quad (19)$$

где L_H – индуктивность обмотки, заданная техническим заданием на проектирование; $\Delta L_{\text{доп}}$ – допустимое отклонение расчетной индуктивности от технического задания.

Таким образом, формулируется задача оптимизации, которая в итоге приводит к решению с минимальной стоимостью активных материалов, для которого выполняются условия критериальных ограничений.

На рис. 3 приведена схема поиска решения в САПР РДТ ММ.

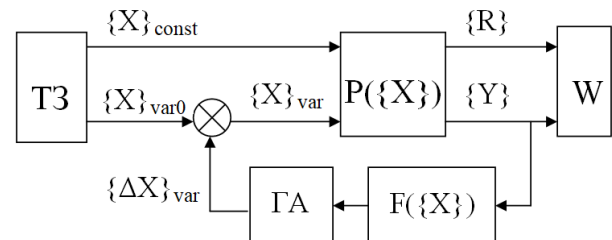


Рис. 3. Схема поиска решения в САПР РДТ ММ

В блоке ТЗ формулируется техническое задание, состоящее из двух векторов $\{X\}_{const}$ и $\{X\}_{var0}$. В последнем векторе содержатся начальные значения варьируемых переменных (стартовая точка оптимизации). Поиск решения осуществляется с использованием генетического алгоритма, реализованного в пакете MatLab, или математической библиотеки `scipy.optimize` на языке Python. Это не гарантирует нахождения глобального экстремума функции цели, но позволяет достаточно уверенно за несколько попыток находить приемлемое решение, близкое к оптимальному, для которого выполняются все требования технического задания.

Генетический алгоритм (рис. 3, блок ГА) меняет значения варьируемых переменных на каждом шаге поиска. Проектный расчет устройства осуществляется в блоке $P(\{X\})$. Результаты расчета выдаются в виде двух

векторов: $\{Y\}$ – вектор критериев, составляющие которого используются при построении функции цели $F(\{X\})$ по (15); $\{R\}$ – вектор результатов проектного расчета. Оба этих вектора передаются в подсистему выдачи результатов W .

Результаты исследований. В качестве интегрированной среды для создания и функционирования САПР РДТ ММ был использован табличный процессор MS Excel (рис. 4).

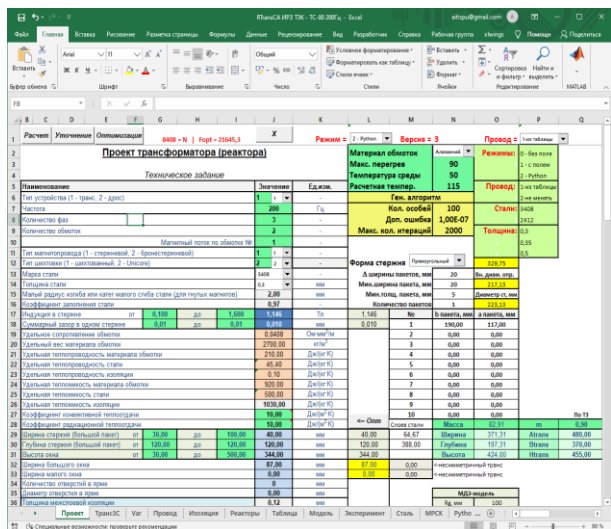


Рис. 4. Интерфейс расчетной подсистемы САПР РДТ ММ

Сервисные процедуры написаны на языке VBA во встроенной в MS Excel системе программирования. В учебной версии системы необходимый для функционирования САПР РДТ ММ математический аппарат заимствован из математического процессора MatLab, связанного с MS Excel посредством приложения SpreadsheetLink, позволяющего осуществлять двусторонний обмен данными между MS Excel и MatLab [14]. В коммерческой версии системы математический аппарат реализуется с использованием функций математических библиотек, написанных на языке Python.

Для оценки принятых проектных решений в случае проектирования устройств не типовых конструкций используется метод имитационного моделирования в среде MatLab Simulink, разработанный в [17]. Ведется работа по созданию авторской системы имитационного моделирования физических процессов в технических устройствах с использованием электрических схем замещения.

Выводы. В условиях современного производства велик удельный вес мелкосерийной и штучной продукции. При этом количество опытных специалистов, способных решать задачи проектирования подобных устройств неуклонно снижается. В связи с этим возрастает роль наукоемких методов, которые могут быть использованы в имитационных моделях технических устройств, способных адекватно отразить особенности функционирования данных устройств даже при отсутствии апробированных инженерных методик. Предложенный пример создания расчетной подсистемы САПР РДТ ММ, которая относительно легко адаптируется под различные исполнения проектируемых устройств, позволяет отказаться от необходимости проведения НИОКР и создания опытных образцов продукции.

Реализованная в двух версиях: учебной (с использованием математического аппарата MatLab) и коммерческой (с использованием математических библиотек на языке Python), система в последнем случае может быть развернута на любом малом предприятии с соблюдением требований лицензионной чистоты.

Представленная САПР РДТ ММ прошла апробацию на трех предприятиях РФ, специализирующихся на изготовлении трансформаторов малой мощности, а также дросселей и реакторов.

Результаты исследования и разработки могут быть использованы при создании аналогичных систем проектирования электротехнических устройств.

Список литературы

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. Бородулин Ю.Б., Попов Г.В. Математические методы в САПР электрических машин: учеб. пособие / Иван. гос. ин-т; Иван. энерг. ин-т. – Иваново, 1986. – 80 с.
3. Автоматизированное проектирование электрических машин: учеб. пособие / Ю.Б. Бородулин, В.С. Мостейкис, Г.В. Попов, В.П. Шишкин / под ред. Ю.Б. Бородулина. – М.: Высш. шк., 1989. – 280 с.
4. Тихонов А.И. САПР силовых трансформаторов до 35 кВ // Актуальные проблемы науки и техники: материалы II Междуна. науч.-техн. конф., посвященной 70-летию ИМИ – ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Сарапул, 19–21 мая 2022 г. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022. – С. 716–720.
5. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности. – Л.: Энергия, 1969. – 192 с.

6. Стародубцев Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

7. Баранов Д.С., Никитин К.К. Простейшие рекомендации инженеру по расчету дросселей и трансформаторов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 9. – С. 64–68.

8. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism // Art. 701. To find M by Elliptic Integrals. – 1954. – Vol. 2. – P. 338–340.

9. Grover F.W. Inductance Calculations: Working Formulas and Tables, 1946 and 1973. Dover Phoenix Edition 2004. ISBN: 0 486 49577 9. 2009 reprint ISBN13: 9780486474403 (<https://coil32.net/ru/loop.html>)

10. Paul C.R. Inductance: Loop and Partial. – New-York: Wiley, 2011. – 379 p. (<https://cyberleninka.ru/article/n/induktivnost-pryamougolnyh-konturov/viewer>)

11. Стулов А.В., Тихонов А.И., Корнев И.А. Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 96 с.

12. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

13. Тихонов А.И., Стулов А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка автономной библиотеки моделирования электрических цепей для создания виртуальных лабораторий численного исследования моделей электрических машин // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 1. – С. 34–39.

14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

15. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения). – Иваново, 2007. – 40 с.

16. Spreadsheet Link (for Microsoft Excel) // MathWorks. – URL: <https://www.mathworks.com/products/spreadsheet-link.html>

17. Создание цифровых двойников силовых трансформаторов на основе имитационных моделей и их использование в САПР / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитко, А.В. Подобный. – Иваново, 2023. – 124 с.

tehniki», Sarapul, 19–21 maya 2022 g. [Materials of the II Int. scientific-technical conf., dedicated to the 70th anniversary of IMI – ISTU and the 60th anniversary of SPI (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “ISTU named after M.T. Kalashnikov”: “Actual problems of science and technology”, Sarapul, May 19–21, 2022]. Izhevsk: Izdatel'stvo UIR IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, pp. 716–720.

5. Ermolin, N.P. *Raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Calculation of low-power transformers]. Leningrad: Energiya, 1969. 192 p.

6. Starodubtsev, Yu.N. *Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Theory and calculation of low-power transformers]. Moscow: IP RadioSoft, 2005. 320 p.

7. Baranov, D.S., Nikitin, K.K. Prosteyshie rekomendatsii inzheneru po raschetu drossелей i transformatorov [The simplest recommendations for an engineer on calculating chokes and transformers]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2018, no. 9, pp. 64–68.

8. Maxwell, J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Art. 701. To find M by Elliptic Integrals, 1954, vol. 2, pp. 338–340.

9. Grover, F.W. Inductance Calculations: Working Formulas and Tables, 1946 and 1973. Dover Phoenix Edition 2004. ISBN: 0 486 49577 9. 2009 reprint ISBN13: 9780486474403. Available at: <https://coil32.net/ru/loop.html>

10. Paul, C.R. Inductance: Loop and Partial. New-York: Wiley, 2011. 379 p. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/induktivnost-pryamougolnyh-konturov/viewer>

11. Stulov, A.V., Tikhonov, A.I., Kornev, I.A. *Razrabotka mnogourovnevnoy podsystemy teplovykh raschetov SAPR aktivnoy chasti raspredelitel'nykh transformatorov* [Development of a multi-level subsystem for thermal calculations of the CAD system for the active part of distribution transformers]. Ivanovo, 2014. 96 p.

12. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMC Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

13. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Dryazgov, D.E. *Razrabotka avtonomnoy biblioteki modelirovaniya elektricheskikh tsepey dlya sozdaniya virtual'nykh laboratoriy chislennogo issledovaniya modeley elektricheskikh mashin* [Development of an autonomous library for modeling electrical circuits to create virtual laboratories for numerical study of electrical machine models]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 1, pp. 34–39.

14. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of heat transfer]. Moscow: Energiya, 1977. 344 p.

15. Bukhmirov, V.V. *Raschet koeffitsienta konvektivnoy teplootdachi (osnovnye kriterial'nye uravneniya)* [Calculation of the convective heat transfer coefficient (main criterial equations)]. Ivanovo, 2007. 40 p.

16. Spreadsheet Link (for Microsoft Excel) // Math-Works. Available at: <https://www.mathworks.com/products/spreadsheet-link.html>

17. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Snit'ko, I.S., Podobnyy, A.V. *Sozdanie tsifrovyykh dvoynikov silovykh transformatorov na osnove imitatsionnykh modeley i ikh ispol'zovanie v SAPR* [Creation of digital twins of power transformers based on simulation models and their use in CAD]. Ivanovo, 2023. 124 p.

References

1. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p.
2. Borodulin, Yu.B., Popov, G.V. *Matematicheskie metody v SAPR elektricheskikh mashin* [Mathematical methods in CAD of electrical machines]. Ivanovo, 1986. 80 p.
3. Borodulin, Yu.B., Mosteykis, V.S., Popov, G.V., Shishkin, V.P. *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektricheskikh mashin* [Automated design of electrical machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 280 p.
4. Tikhonov, A.I. *SAPR silovykh transformatorov do 35 kV* [CAD of power transformers up to 35 kV/V collection]. *Materialy II Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu IMI – IzhGTU i 60-letiyu SPI (filial) FGBOU VO «IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova»*: «Aktual'nye problemy nauki i

УДК [621.314.26+621.316.94+621.317.757]:621.311.1

Александр Аркадьевич Николаев

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Ильдар Галиевич Гилемов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

Михаил Викторович Буланов

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Владимир Сергеевич Ивекеев

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Россия, Магнитогорск, e-mail: vivekeev@yandex.ru

Анализ эффективности способов обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов с активными выпрямителями в условиях реального производства¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. При эксплуатации электроприводов на базе преобразователя частоты с активным выпрямителем возможно существенное ухудшение качества напряжения во внутривзаводской сети в случае наложения высокочастотных гармоник тока электропривода на резонансную область частотной характеристики сети. В связи с активным внедрением в последние десятилетия таких электроприводов на металлургических заводах используются различные способы обеспечения электромагнитной совместимости преобразователей частоты с питающей сетью. Целью настоящего исследования является анализ эффективности способов обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов с активными выпрямителями в условиях реального производства.

Материалы и методы. Проверка эффективности различных способов улучшения показателей качества электроэнергии в распределительной системе электроснабжения предприятия осуществлена на разработанной комплексной имитационной модели системы электроснабжения и электроприводов прокатного стана, которая учитывает параметры основных элементов электротехнического комплекса, а также данные экспериментальных исследований, полученные с помощью анализаторов качества электроэнергии Fluke 435 и ELSPEC G4430.

Результаты. Рассмотрены два способа обеспечения электромагнитной совместимости преобразователя частоты с активным выпрямителем. Установлено, что применение усовершенствованных алгоритмов широтно-импульсной модуляции активного выпрямителя позволяет снизить величину суммарного коэффициента гармонических составляющих в точке общего присоединения K_U на 40,1 % (до 8,08 %), установка специализированного пассивного фильтра мощностью 9000 кВАр позволяет достичь значительно большего технического эффекта ($K_U = 0,42$ %).

Выводы. Полученные результаты показывают, что для рассматриваемого предприятия оптимальным вариантом обеспечения требуемых показателей качества электроэнергии является применение специализированного пассивного фильтра. Однако данный вариант потребует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Адекватность имитационной модели подтверждена экспериментальными данными и предыдущими исследованиями.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, резонанс токов, специализированный пассивный фильтр

¹ Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-20069).

The project is supported by the Grant of the Russian Research Foundation (project no. 22-19-20069).

Alexander Arkadyevich Nikolaev

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: aa.nikolaev@magtu.ru

Il'dar Galievich Gilemov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: gilemov.ig@outlook.com

Mikhail Viktorovich Bulanov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: bulanovv.m.v@gmail.ru

Vladimir Sergeevich Ivekееv

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Automatic Electric Drive and Mechatronics Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: vivekeev@yandex.ru

Analysis of the effectiveness of methods for ensuring electromagnetic compatibility of electric drives with active rectifiers in real production conditions

Abstract

Background. A significant degradation of voltage quality of the in-plant network is possible during operation of electric drives based on a frequency converter with an active rectifier, due to the superposition of high-frequency harmonics of the electric drive current on the resonance region of the network frequency response. Due to the active introduction of such electric drives recently at metallurgical plants, various methods are implemented to ensure electromagnetic compatibility of the frequency converter and the power supply network. The purpose of this study is to analyze the efficiency of methods to ensure electromagnetic compatibility of electric drives and active rectifiers under industrial production.

Materials and methods. The effectiveness of various methods to improve the power quality in the power distribution system of the enterprise has been evaluated using the developed complex simulation model of the power supply system and electric drives of the hot strip mill. It considers the parameters of the main elements of the electrical complex, as well as the data of experimental studies obtained using the Fluke 435 and ELSPEC G4430 power quality analyzers.

Results. Two methods of ensuring electromagnetic compatibility of the frequency converters with active rectifiers are considered. The use of improved algorithms of the active rectifier PWM allows us to reduce the value of the total harmonics distortions at the point of common coupling THD_U by 40,1 % to 8,08 %. The installation of a specialized passive filter 9000 kVAr allows us to achieve a significantly greater technical effect ($THD_U = 0,42$ %).

Conclusions. The obtained results show that for the enterprise under consideration the optimal option for ensuring the required power quality is the use of specialized passive filter. However, this option will require significant capital and operating costs. The adequacy of the simulation model has been previously confirmed by experimental data and previous studies.

Key words: electromagnetic compatibility, frequency converter, active rectifier, pulse wide modulation, current resonance, specialized passive filter

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.067-074

Введение. Активное внедрение мощных частотно-регулируемых электроприводов на металлургических предприятиях в последние десятилетия выявило наличие существенных проблем с электромагнитной совместимостью (ЭМС) таких электроприводов с внутризаводской питающей сетью [1–3]. Наложение высших гармонических составляющих токов, потребляемых преобразователями частоты (ПЧ), на резонансную область частотной характеристики питающей сети приводит к существенному

искажению напряжения на шинах точки общего присоединения. В результате этого возможны ухудшение режимов работы, аварийные отключения и выходы из строя чувствительных электроприемников.

Особенно остро проблема ЭМС ПЧ с питающей сетью проявляется при наличии в составе преобразователя активного выпрямителя (АВ). Применение АВ позволяет обеспечить возможность рекуперации электрической энергии в питающую сеть, работу с единичным коэффициентом мощности и

удаление или подавление ряда гармонических составляющих токов при использовании специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [4–6]. В силу наличия данных особенностей преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) вытесняют традиционные ПЧ с неуправляемыми выпрямителями в электроприводах значительной мощности с частыми динамическими режимами. Современные главные электроприводы прокатных станов выполняются на базе ПЧ-АВ.

Применение в АВ специальных алгоритмов ШИМ, например ШИМ с удалением выделенных гармоник, позволяет улучшить гармонический состав потребляемого ПЧ тока. Однако при пуско-наладочных работах инженеры компаний, производящих преобразовательную технику, как правило, не учитывают наличие резонансных явлений в питающей сети и производят настройку контроллеров ШИМ на обеспечение максимального технического эффекта в отношении снижения величины суммарного коэффициента гармонических составляющих K_U (или THD_U) в соответствии с действующими стандартами, т.е. до 40-й (50-й) гармоники². При этом происходит значительное усиление оставшихся в гармоническом спектре составляющих, попадающих в более высокочастотную область.

Расположение экстремума основного резонанса частотной характеристики относительно шин главной заводской подстанции зависит в основном от величин индуктивности сетевых понизительных трансформаторов и суммарной емкости кабельных линий, подключенных к данным шинам. В случае наличия реакторов в фидерах подстанции частотная характеристика приобретает более сложный характер – с наличием множества дополнительных резонансов с меньшей величиной экстремума [10].

В случае попадания даже относительно небольших гармонических составляющих токов ПЧ-АВ на такие участки частотной характеристики питающей сети величины падения напряжения на шинах секций заводской подстанции на данных частотах достигают существенных значений. Это приводит к искажению формы напряжения, что отражается на работе остальных электроприемников.

Для улучшения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью и исключения проблем с работой чувствительных потребителей электроэнергии в условиях производства возможны следующие варианты:

1) применение и корректная настройка специальных алгоритмов ШИМ АВ для исключения или минимизации величин гармоник, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети;

2) применение специальных пассивных фильтров (СПФ) для коррекции частотной характеристики внутризаводской распределительной сети;

3) создание отдельной «грязной» секции для питания ПЧ-АВ;

4) изменение конфигурации системы внутризаводского электроснабжения – подключение кабельных линий к другим секциям для коррекции частотной характеристики питающей сети.

В условиях уже действующего производства целесообразно использовать в первую очередь варианты 1 и 2 из-за меньшей величины капитальных вложений. Варианты 3 и 4 необходимо использовать при проектировании новых предприятий.

Методы исследования. С описанной проблемой столкнулись на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), где при эксплуатации ПЧ-АВ электроприводов стана горячей прокатки происходили многочисленные выходы из строя чувствительных электроприемников, отключения источников бесперебойного питания систем автоматизации. Коллектив авторов был привлечен к данным исследованиям для устранения проблем ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью.

На рис. 1 показана однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки.

Первый этап работы включал в себя экспериментальные исследования качества электроэнергии. Для исключения аварийных ситуаций во внутризаводской сети 34,5 кВ питание секции D главной понизительной подстанции (ГПП) 51EDM, от которой получают питание ПЧ-АВ электроприводов стана, осуществляется от отдельного трансформатора 380/34,5 кВ.

² ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.; EN 50160-2011, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. – 2010; Std. IEEE-519-2022, 1992, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. – 2022.

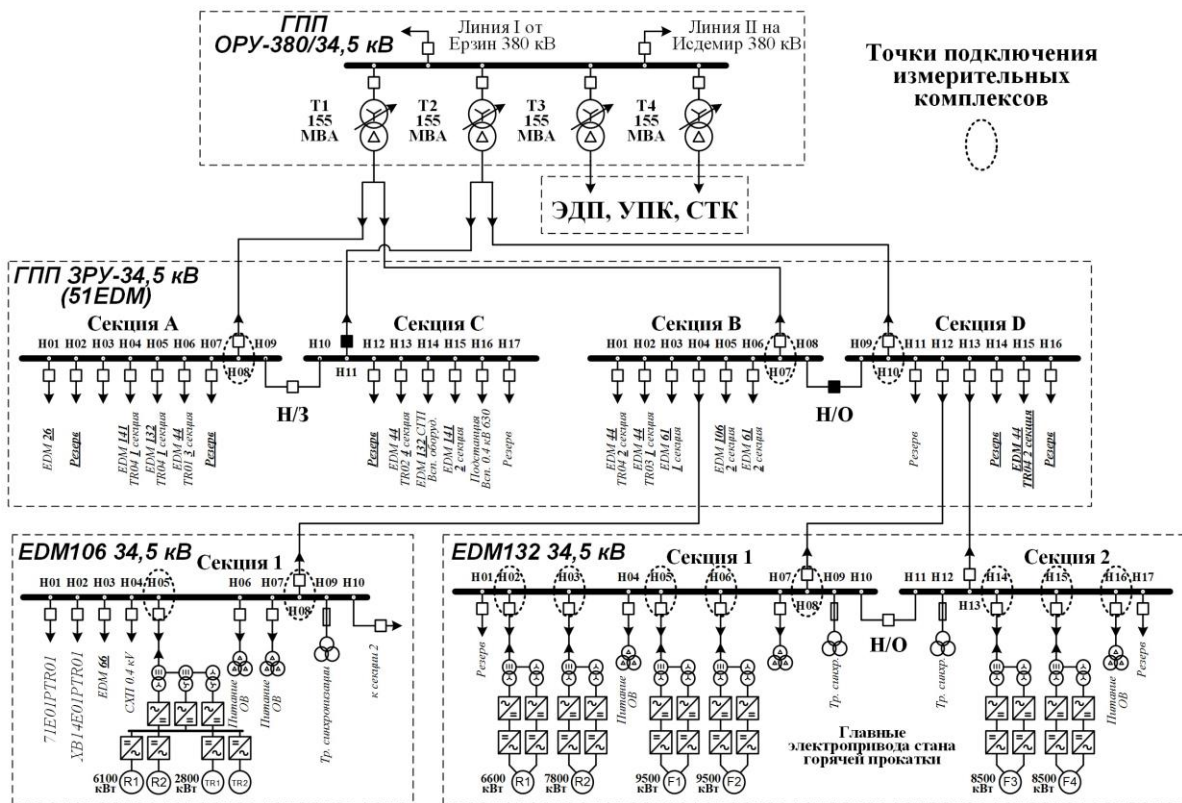


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки MMK Metalurji

Для экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии (ПКЭ) использовались следующие измерительные комплексы: 1) анализатор качества напряжения Fluke 435 с токовыми клещами Fluke i5s (частота дискретизации до 5 кГц); 2) анализатор качества электроэнергии ELSPEC G4430 (частота дискретизации для каждого канала: напряжение – 1024 измерений/цикл 52 кГц, ток – 512 измерений/цикл 12 кГц); 3) сервер быстрых архивов IBA (с периодом дискретизации менее 10 мс).

Для формирования научно-обоснованных рекомендаций и проверки эффективности различных вариантов улучшения ПКЭ была разработана комплексная имитационная модель системы электроснабжения завода и электроприводов стана на базе ПЧ-АВ. При ее разработке учитывались параметры сетевых трансформаторов, главных электроприводов стана горячей прокатки, кабельных линий, значения токов короткого замыкания по линиям 380 кВ, а также экспериментальные данные. Проверка адекватности имитационной модели осуществлялась путем сравнения полученных на ней частотных характеристик с расчетными экспериментальными данными, а также путем сравнения значений K_U на

секциях заводской подстанции. Величина допустимых отклонений составила 5 %.

Результаты исследования. Одним из менее затратных способов обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с питающей сетью является применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ. На рис. 2 показаны осциллограмма (а) и гармонический состав (в) напряжения на секции D заводской подстанции, а также частотная характеристика для данной точки системы электроснабжения, полученные при проведении экспериментальных исследований. Анализ частотной характеристики показывает, что область подъема импеданса расположена в значительном диапазоне частот ($f_{рез} = 2450\text{--}4850$ Гц).

Анализ токов ПЧ-АВ [11] показал, что в АВ применяется алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ), настроенный на отсутствие в гармоническом спектре потребляемого тока гармоник с номерами 11, 13, 23, 25. Из-за этого усиливаются гармонические составляющие с более высокими номерами 35, 37, 47, 49 и т.д. Их наложение на область подъема импеданса вызывает существенные искажения формы напряжения на шинах секции D (рис. 2, в), величина K_U при расчете до 200-й гармоники достигает 13,49 %.

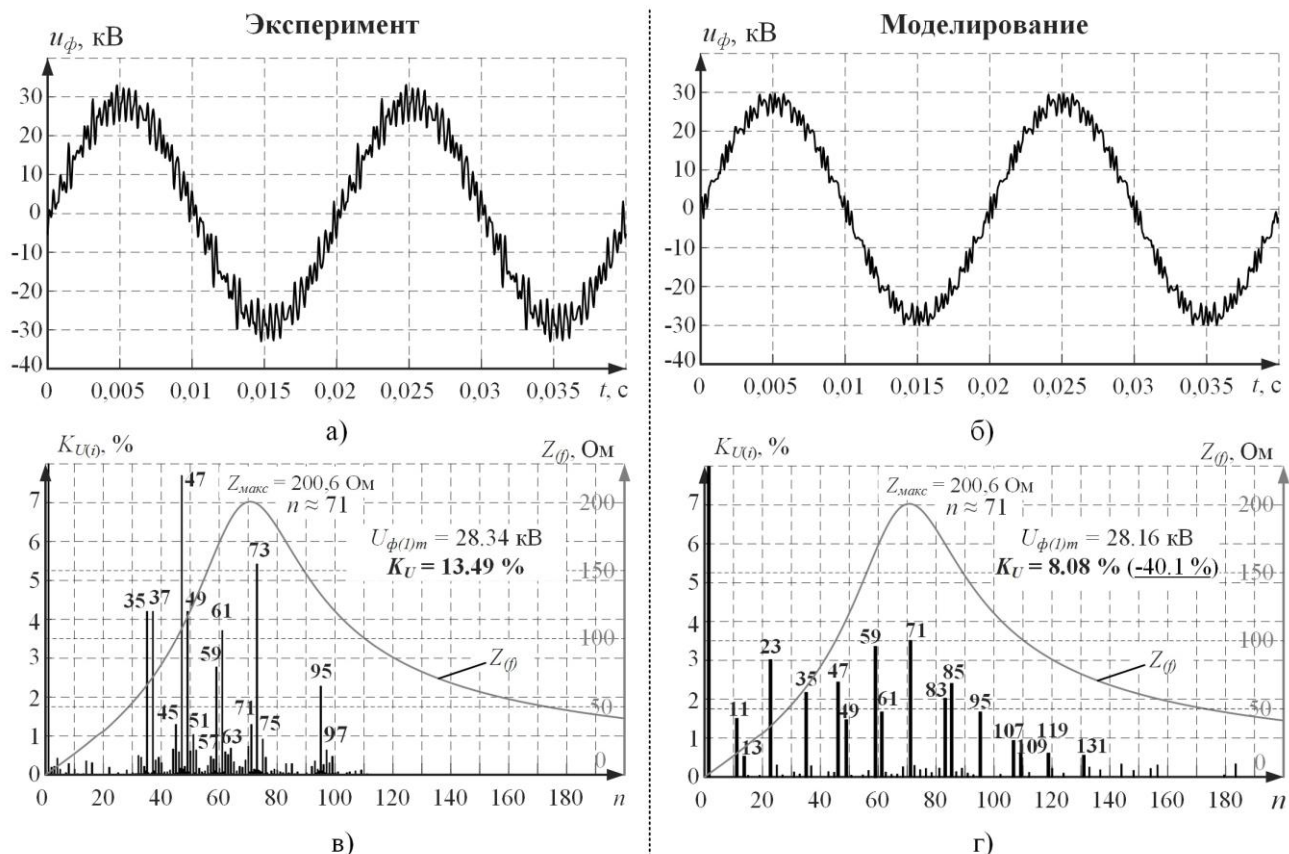


Рис. 2. Сравнительный анализ эффективности применения усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ в отношении ПКЭ в точке общего присоединения

В подобных случаях целесообразно применение ШИМ с подавлением выделенных гармоник (ШИМ с ПВГ) [5, 12, 13]. Данный алгоритм, в отличие от ШИМ с УВГ, позволяет воздействовать на величины большего числа гармонических составляющих токов ПЧ-АВ, что в условиях широкого резонанса позволяет достичь большего технического эффекта (рис. 2,б,г). Имитационное моделирование с применением в АВ ШИМ с ПВГ, настроенным на подавление гармоник в области подъема импеданса, позволило снизить величину K_U на 40,1 %. Проблемы с работой чувствительных электроприемников на предприятиях возникают при превышении величины K_U при расчете до 200-й гармоники значения в 5 % [10]. Поэтому данное решение в условиях рассматриваемого завода является недостаточным.

Другой способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с внутризаводской сетью среднего напряжения связан с применением специализированных пассивных фильтров (СПФ) [3,14], которые обеспечивают коррекцию частотной характеристики сети за счет сдвига основного резонанса тока в низкочастотный диапазон.

В качестве основы СПФ взят одночастотный фильтр с высокой добротностью (более 1000 о.е.), который отличается дешевизной и простотой в исполнении, в отличие от сложных широкополосных или двухчастотных традиционных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), а также активных ФКУ. Применение же более простых ФКУ в виде одночастотных фильтров, настроенных на фильтрацию определенной группы гармоник потребляемого ПЧ-АВ тока, как правило, не позволяет достичь требуемых ПКЭ в системе электроснабжения из-за генерации ПЧ-АВ высших гармоник в широком диапазоне.

В рамках настоящего исследования был проведен ряд имитационных моделирований работы электротехнического комплекса предприятия при установке СПФ мощностью от 1000 до 9000 кВАр на секции Д ГПП 51EDM (рис. 3). На рис. 4 показаны полученные осциллограммы напряжения и их гармонический состав при использовании СПФ мощностью 1000 кВАр (рис. 4,в,г), и 9000 кВАр (рис. 4, д,е).

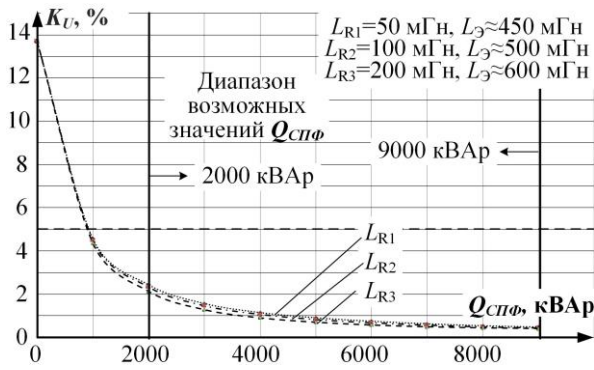


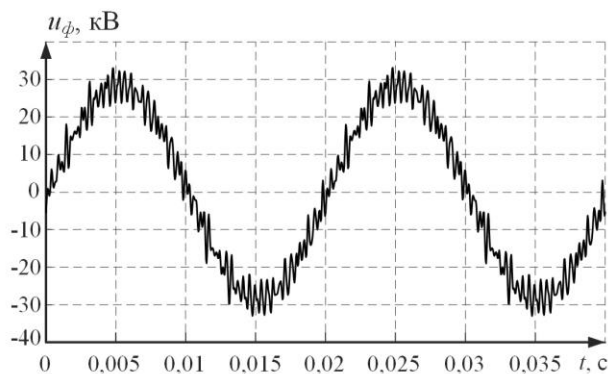
Рис. 3. Сравнение величины K_U на секции D ГПП в зависимости от мощности СПФ при разных индуктивностях реактора

Приемлемую величину K_U в точке общего присоединения обеспечивает установка

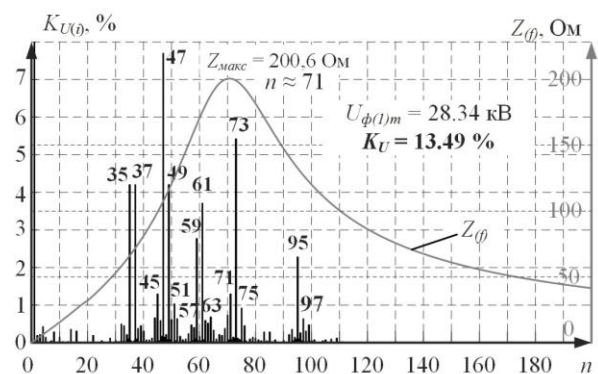
СПФ мощностью 1000 кВАр (4,16 %); наилучший технический эффект достигается при мощности СПФ 9000 кВАр ($K_U = 0,42$ %).

Можно заметить, что увеличение мощности СПФ приводит не только к смещению экстремума резонанса в более низкочастотную область, но и к уменьшению его амплитуды.

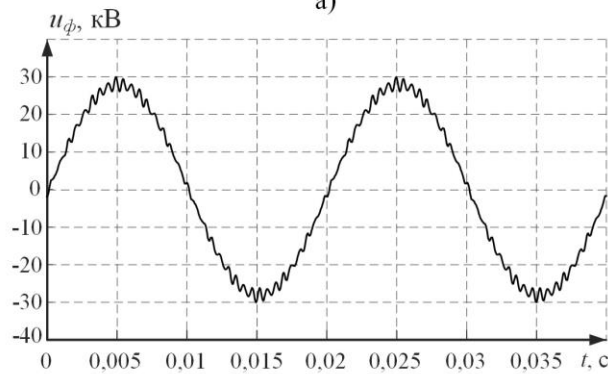
В СПФ предусматривается использование конденсаторов с пленочным полипропиленовым диэлектриком в целях обеспечения возможности продолжительной работы при повышенных величинах суммарного коэффициента гармонических составляющих тока фильтра K_I (вплоть до 45 %).



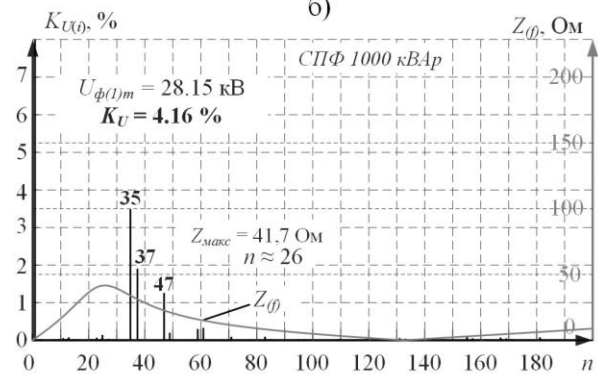
а)



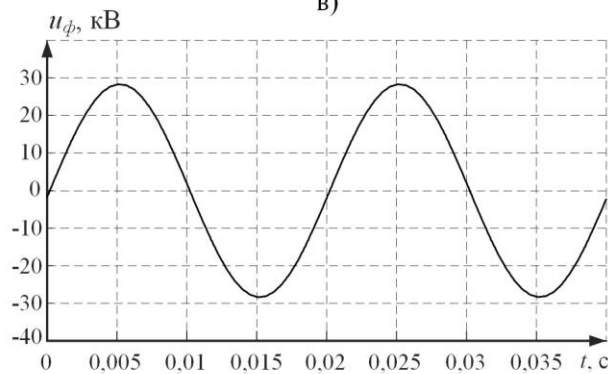
б)



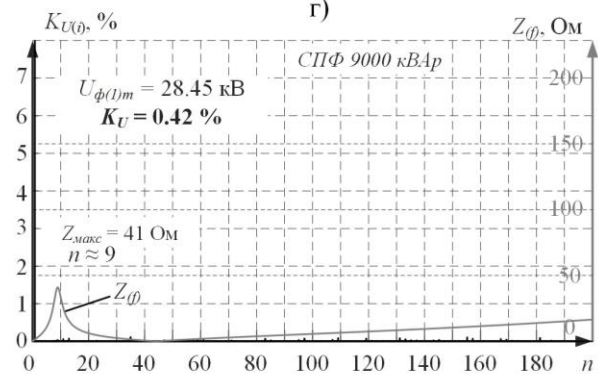
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Сравнительный анализ эффективности применения СПФ на секции D 51EDM мощностью 1000 кВАр (в, г), мощностью 9000 кВАр (д, е) в отношении ПКЭ по сравнению с экспериментальными данными (а, б)

Превышение данной величины может привести к токовой перегрузке конденсаторов фильтра. Это условие выполнялось только при применении СПФ мощностью выше 5000 кВАр и индуктивностях реактора 50, 100, 200 мГн для режимов работы электроприводов стана как при холостом ходе, так и при работе под нагрузкой.

Проведенные исследования показали, что наиболее предпочтительным вариантом является установка СПФ мощностью 9000 кВАр и индуктивностью реактора 200 мГн или двух СПФ мощностью 4500 кВАр и индуктивностью реактора 400 мГн.

Следует отметить, что предложенный способ обеспечения ЭМС ПЧ-АВ с внутриводской сетью отличается от первого рассмотренного выше способа значительными капитальными затратами. Стоимость каждого 1 МВАр СПФ составляет около 4 млн рублей.

Выводы. Рассмотренные способы улучшения ПКЭ на шинах точки общего присоединения позволяют сделать следующие выводы.

1. Первый способ – применение усовершенствованных алгоритмов ШИМ АВ – обеспечивает снижение величины K_U на 40,1 % (с 13,49 % до 8,08 %). Однако технический эффект является недостаточным для нормализации работы чувствительных электроприемников.

2. Второй способ – коррекция частотной характеристики питающей сети за счет установки СПФ – в условиях ЗАО «ММК Metalurji» является наиболее оптимальным вариантом при применении СПФ мощностью 9000 кВАр и индуктивностью реактора 200 мГн. Значение K_U в точке общего присоединения в данном случае составляет 0,42 %, что позволяет гарантировать нормальную работу всех заводских потребителей электроэнергии.

3. В случае, когда частотная характеристика сети имеет резонансную область с меньшим частотным диапазоном (шириной резонанса), наиболее эффективным вариантом решения проблемы ЭМС ПЧ-АВ может стать использование усовершенствованного алгоритма ШИМ АВ, что будет являться мероприятием без капитальных затрат [10].

Список литературы

1. **Retrofit** of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives / G.A. Orcajo, J.R. Diez, J.M.C. Rodriguez, et al. // IEEE Transactions on Industry

Applications. – May-June 2018. – Vol. 54, no. 3. – P. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

2. **Маклаков А.С.** Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16–25.

3. **Resonances** in a High-Power Active-Front-End Rectifier System / J. Pontt, G. Alzamora, R. Huerta, N. Becker // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2005. – P. 482–488.

4. **O'Brien K., Teichmann R., Bernet S.** Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE. – 2001. – P. 557–562.

5. **Franquelo L.G., Nápoles J.** A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – December 2007. – Vol. 54, no. 6.

6. **Jing T., Maklakov A., Radionov A.** Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10 kV Grid with Three-Level NPC Inverter // 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). – Magnitogorsk, 2019. – P. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

7. **Обеспечение** электромагнитной совместимости мощных электроприводов четырехклетьевого стана ППП ХП ЧерМК ПАО «Северсталь» с питающей сетью 10 кВ / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2021. – Т. 12, № 1. – С. 65–74.

8. **Экспериментальные** исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, С.А. Линьков, М.С. Светлаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 3(56). – С. 44–53. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53.

9. **Moeini A., Zhao H., Wang S.** A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers // IEEE Trans. Ind. Electronics. – 2018. – Vol. 65. – P. 727–737.

10. **Optimal** selective harmonic control for power harmonics mitigation / K. Zhou, Y. Yang, F. Blaabjerg, D. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Vol. 62, no. 2. – P. 1220–1230.

11. **Повышение** качества электроэнергии в системах электроснабжения прокатных станов с использованием преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет применения специализированных пассивных фильтров / А.А. Николаев, М.Ю. Афанасьев, И.Г. Гилемов, М.В. Буланов // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 41–52. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052.

References

1. Orcajo, G.A., Diez, J.R., Rodriguez, J.M.C., Nornieilla, J.G. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant with Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions*

on Industry Applications, 2018 May–June, vol. 54, no. 3, pp. 2964–2974. DOI: 10.1109/TIA.2018.2808159.

2. Maklakov, A.S. Imitatsionnoe modelirovanie glavnogo elektroprivoda prokatnoy kleti tolstolistovogo stana 5000 [Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand]. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 3, pp. 16–25.

3. Pontt, J., Alzamora, G., Huerta, R., Becker, N. Resonances in a High-Power Active-Front-End Rectifier System. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, April 2005, vol. 52, no. 2, pp. 482–488.

4. O'Brien, K., Teichmann, R., Bernet, S. Active rectifier for medium voltage drive systems. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*, 2001, pp. 557–562.

5. Franquelo, L.G., Nápoles, J. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007 December, vol. 54, no. 6.

6. Jing, T., Maklakov, A., Radionov, A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10 kV Grid with Three-Level NPC Inverter. *2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. Magnitogorsk, Russia, 2019, pp. 75–79. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915413.

7. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V., Afanas'ev, M.Yu., Shakhbieva, K.A., Laptova, V.A. Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti moshchnykh elektroprivodov chetyrekhklet'evogo stana PPP KhP CherMK PAO «Severstal» s pitay-

ushchey set'yu 10 kV [Protection of the electromagnetic coating of electric drives of the four-stand mill PPP KHP CherMK PJSC “Severstal” with a 10 kV supply network]. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 65–74.

8. Nikolaev, A.A., Gilemov, I.G., Lin'kov, S.A., Svetlakov, M.S. Eksperimental'nye issledovaniya kachestva elektroenergii v seti 34,5 kV metallurgicheskogo zavoda ZAO «MMK Metalurji» [Experimental Studies of Power Quality in the 34,5 kV Network at MMK “Metalurji”]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2022, no. 3(56), pp. 44–53. DOI: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53.

9. Moeini, A., Zhao, H., Wang, S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers. *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 2018, vol. 65, pp. 727–737.

10. Zhou, K., Yang, Y., Blaabjerg, F., Wang, D. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, vol. 62, no. 2, pp. 1220–1230.

11. Nikolaev, A.A., Afanas'ev, M.Yu., Gilemov, I.G., Bulanov, M.V. Povyshenie kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya prokatnykh stanov s ispol'zovaniem preobrazovateley chastoty s aktivnymi vypryamitelyami za schet primeneniya spetsializirovannykh passivnykh fil'trov [Improvement of power quality in power supply systems of rolling mills using frequency converters with active rectifiers due to use of specialized passive filters]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 41–52. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.041-052.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 519.87

Максим Дмитриевич Фомичев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-15, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-24, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Исследование влияния скорости ветра на неравномерность распределения воздушного потока в башенных градирнях

Авторское резюме

Состояние вопроса. Дефицит источников слабоминерализованной воды в местах строительства и эксплуатации мощных энергоблоков ТЭС и АЭС обуславливает необходимость повышения эффективности систем оборотного охлаждения. В этих условиях важную роль приобретают системы оборотного охлаждения воды с башенными градирнями, повышение эффективности которых при различных погодных условиях путем моделирования и оптимизации процессов тепломассообмена имеет особую актуальность.

Материалы и методы. Моделирование движения потоков воздуха в градирне осуществляется с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Процесс охлаждения воды в рамках методологии матричного моделирования многопоточных тепломассообменных установок рассчитывается с учетом найденного распределения потоков воздуха в градирне.

Результаты. Найдено поле скоростей воздуха и распределение потоков воздуха по сечению градирни при различных скоростях ветра. Приведена оценка влияния неравномерности потоков воздуха по сечению на эффективность охлаждения воды. Предложены пути и методы выравнивания данных неравномерностей при различных погодных условиях.

Выводы. Разработанная комбинированная модель процесса тепломассообмена в градирне позволяет эффективно решать задачи выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров оборудования систем охлаждения при различных погодных условиях, а также проводить диагностику состояния системы оборотного охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения, башенная градирня, матричное моделирование, поле скоростей, тепломассообмен, многопоточный теплообменник

Maxim Dmitrievich Fomichev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-15, e-mail: somebody.max@yandex.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Maria Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-24, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Study of wind speed influence on non-uniformity of air flow distribution in tower cooling towers

Abstract

Background. The shortage of sources of low-mineralized water in the areas of construction and operation of powerful power units of thermal power plants and nuclear power plants necessitates to increase the efficiency of circulating cooling systems. Under these conditions, water recycling systems with cooling towers play a key role, increasing efficiency of which by modeling and optimizing heat and mass transfer processes becomes an urgent task.

Materials and methods. Modeling of the movement of air flows in a cooling tower is carried out using a package in ANSYS Fluent. The water-cooling process, considering the found distribution of air velocities across the cross section of the cooling tower, is calculated within the framework of the matrix modeling methodology of multi-flow heat and mass transfer installations.

Results. As a result of the study, the air velocity field and the distribution of air flows across the cross section of the cooling tower at different wind speeds have been found. The influence of uneven air flows across the cross section on the efficiency of water cooling has been assessed. The ways and methods for leveling these unevennesses under different weather conditions have been proposed.

Conclusions. The developed combined model of the heat and mass transfer process in a cooling tower makes it possible to effectively solve the problem of choosing the optimal design and operating parameters of cooling system equipment under various weather conditions, as well as to diagnose the state of the recirculation cooling system.

Key words: cooling system, cooling tower, matrix simulation, velocity field, heat and mass transfer, multifold heat exchanger

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.075-080

Введение. В настоящее время энергетическая отрасль все чаще сталкивается с необходимостью повышения эффективности и надежности систем оборотного охлаждения (СОО) [1–8], что в первую очередь связано со строительством новых мощных блоков АЭС в местах с ограниченными ресурсами слабоминерализованной воды. В этой связи особую актуальность приобретают системы воздушного охлаждения циркуляционной воды, одним из ключевых элементов которых являются воздушные градирни [9–13]. За счет понижения температуры охлаждающей воды улучшается вакуум в конденсаторе паровой турбины, повышается термодинамический коэффициент полезного действия установки. То есть чем эффективнее охлаждается циркуляционная вода в градирне, тем эффективнее работает энергетическая установка. С ростом числа новых мощных энергоблоков, особенно в регионах с ограниченными водными ресурсами, проблема совершенствования конструкций и режимов эксплуатации градирен становится все более актуальной.

Результаты ранее проведенных исследований [5, 10, 12] показали, что неравномерное распределения потоков воздуха и воды по сечению градирни может приводить к существенному (на 5–10 °С) недоохлаждению циркуляционной воды, что, соответственно, обуславливает, согласно литературным данным [5, 10], ухудшение вакуума в конденсаторе примерно на 1 кПа и может приводить к потере мощности при конденсационном режиме работы турбины до 1 %. В [10] показано, что такое увеличение температуры циркуляционной воды после градирни может происходить из-за неравномерного распределения потоков воды и воздуха в поперечном сечении градирни.

На эффективность работы градирен существенное влияние оказывают погодные условия. Одним из основных факторов, влияющих на равномерность распределения воздушного потока, на охлаждение циркуляционной воды и, следовательно, на общую эффективность энергетической установки, являются скорость и направление ветра.

Целью исследования является повышение эффективности функционирования энергетической установки путем повышения эффективности охлаждения циркуляционной воды в башенных градирнях на основе моделирования градирни с учетом скорости ветра.

Для достижения поставленной цели предлагается решить следующие задачи:

- построение модели полей скоростей воздуха в градирне при разных скоростях ветра с использованием пакета ANSYS Fluent [14–17];
- анализ влияния неравномерности распределения потоков воздуха по сечению с учетом влияния скорости ветра на эффективность охлаждения воды и разработка мероприятий по устранению указанной неравномерности;
- анализ эффективности предлагаемых мероприятий по устранению неравномерности потоков воздуха по сечению градирни.

Решение поставленных задач позволит более детально и всесторонне исследовать процессы, происходящие в башенных градирнях, и выявлять ключевые факторы, влияющие на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

Методы и результаты исследования. Моделирование и анализ эффективности функционирования градирни проведены на примере градирни БГ-1600 с площадью орошения 1600 м². Исходные данные для расчетного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Показатель	Значение
Расход воды, подаваемой на градирни, м ³ /ч	12480
Температура исходной воды, °C	37
Плотность орошения, м ³ /(ч·м ²)	7,8
Влажность воздуха, %	20
Удельная тепловая нагрузка, Мкал/(ч·м ²)	61

Для решения первой из заявленных задач используется пакет ANSYS Fluent, в рамках которого выполняется численное моделирование полей скоростей при разных скоростях ветра и определяются распределения потоков воздуха по сечению градирни [14–17]. При построении модели градирни используется сетка с элементами размером 4 м и $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Скорость и направление ветра моделируется заданием соответствующих граничных условий в

пакете ANSYS Fluent. В ходе выполнения расчетов сначала определяется поле скоростей потоков воздуха, на основании которого визуализируются области с разными скоростями движения воздуха и определяются распределения воздушного потока и массовые расходы в поперечном сечении градирни при разных скоростях ветра.

На рис. 1 приведены результаты моделирования в виде полей скоростей воздуха, цвет линий и их направление соответствует значениям вектора скорости воздуха в данной точке при разных скоростях ветра: 0(а), 4(б) и 12(в) м/с.

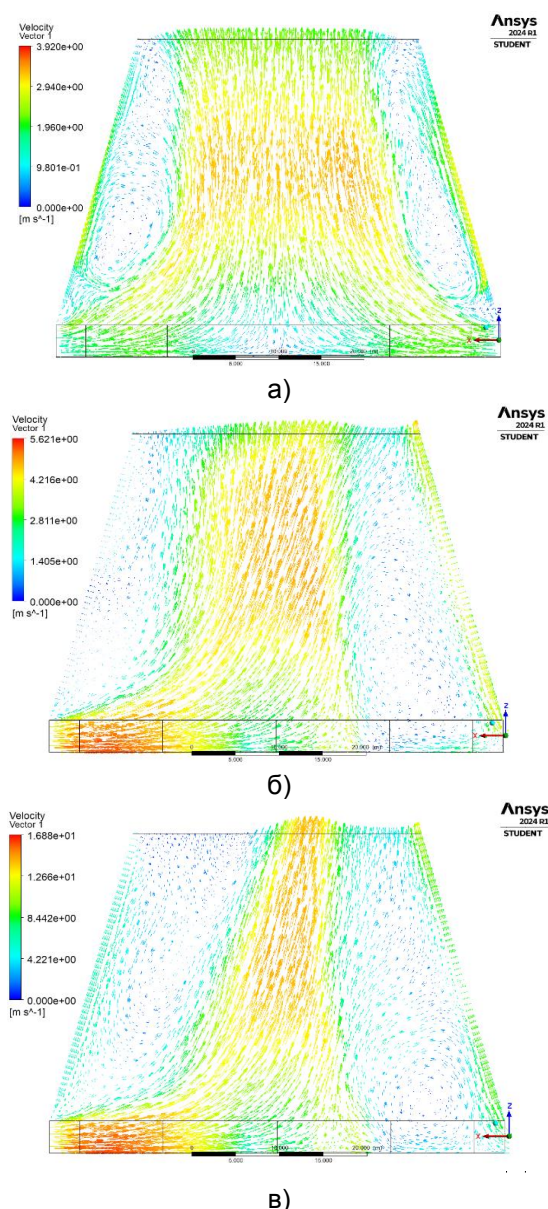


Рис. 1. Визуализация направления и скорости движения воздуха внутри градирни при различных скоростях ветра: а – 0; б – 4; в – 12 м/с

Анализ направлений и скоростей воздуха показывает, что при увеличении скорости

ветра распределение потоков воздуха по градири становится более неравномерным.

Для количественной оценки неравномерности распределения потоков воздуха сечение градири условно делится радиусами на четыре сектора с равными площадями. Представленные на рис. 1 результаты позволяют определить расходы воздуха в вертикальном направлении для четырех выделенных секторов. Для этого после выполнения расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent производится экспорт значений массового расхода для каждой ячейки расчетной сетки. Затем для каждой из четырех частей поперечного сечения градири определяется расход воздуха. На рис. 2 показаны расходы воздуха по выделенным секторам как массовые доли общего расхода при разных скоростях ветра.

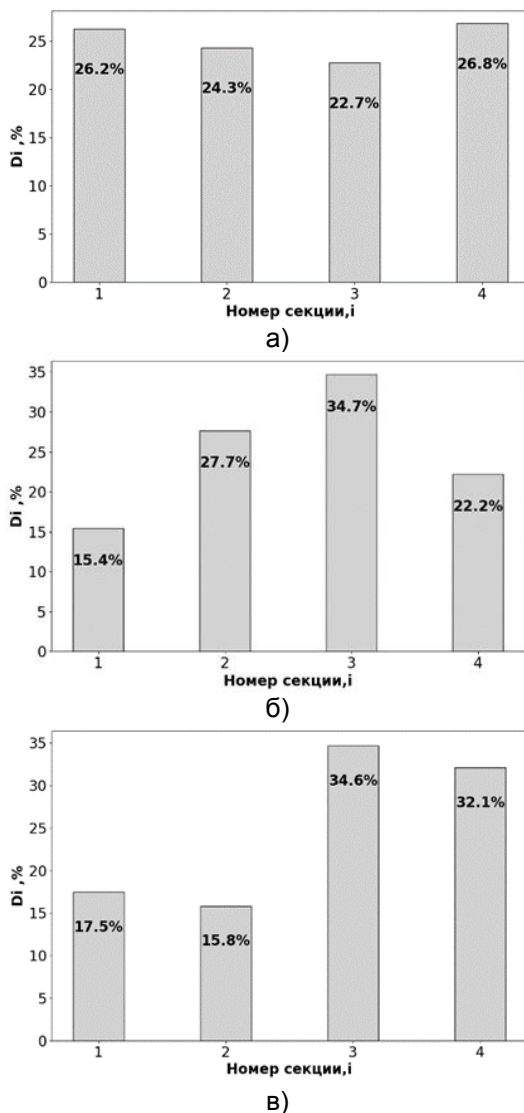


Рис. 2. Распределение потоков воздуха по четырем секторам, выделенным в горизонтальном сечении градири, при разных скоростях ветра: а – 0; б – 4; в – 12 м/с

Приведенные зависимости показывают, что с увеличением скорости ветра неравномерность потоков воздуха существенно увеличивается.

Для интегральной оценки неравномерности распределения расходов воздуха по сечению предлагается использовать суммарное отклонение расходов от среднего значения согласно следующему алгоритму.

1. Определение среднего расхода воздуха для сектора:

$$G_{\text{ср}} = \frac{G_0}{n},$$

где G_0 – общий расход через поперечное сечение градири; n – количество секторов.

2. Вычисление модуля отклонения фактического расхода от среднего для каждого сектора:

$$\Delta_i = |G_i - G_{\text{ср}}|,$$

где G_i – фактический расход через i -й сектор $i = 1, n$.

3. Определение относительного отклонения секторального расхода, выраженное в процентах:

$$D_i = \frac{\Delta_i}{G_{\text{ср}}} \cdot 100.$$

4. Суммарное (по всему поперечному сечению) отклонение расхода воздуха по секторам от среднего значения:

$$D = \sum_{i=1}^n D_i.$$

На рис. 3 приведена зависимость суммарного отклонения расхода по секторам от скорости ветра. Представленная зависимость позволяет количественно оценить увеличение неравномерности потоков с увеличением скорости ветра.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных на градири БГ-1600 Петрозаводской ТЭЦ [12], установлено, что при средней скорости ветра 3,75 м/с общая неравномерность распределения воздушного потока составила 28,4 %. Указанные экспериментальные результаты с учетом погрешности экспериментальных данных удовлетворительно согласуются с рассчитанными значениями в рамках предложенной модели при скорости ветра 4 м/с, что свидетельствует об адекватном описании моделью реального процесса. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего использования модели для прогнозирования мероприятий

по устранению влияния ветра на эффективность охлаждения циркуляционной воды.

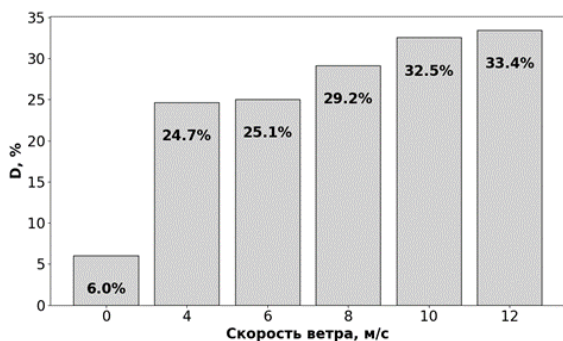


Рис. 3. Зависимость общей неравномерности распределения воздуха по сечению градирни от скорости ветра

Следует отметить, что в проведенных ранее исследованиях [10] показано, что такая неравномерность может приводить к существенному недоохлаждению циркуляционной воды, к ухудшению вакуума и снижению экономичности функционирования всего блока.

Неравномерное распределения потоков воздуха в перечном сечении градирни, которое обусловлено ветровой нагрузкой, предлагается устранять закрытием по предварительно заданному алгоритму противоположных от направления ветра фрамуг. Принципиальная возможность и эффективность предложенных мероприятий демонстрируется на следующем расчетном примере. В качестве тестового мероприятия предлагается закрывать те фрамуги, которые находятся на противоположной направлению ветра стороне, то есть при северном ветре закрывается часть фрамуг с южной стороны. Эффективность этих мероприятий проверялась на тестовых расчетах в рамках описанной модели. На рис. 4 представлены результаты, аналогичные полученным выше (рис. 3), но при закрытых фрамугах. Проведенные исследования показывают существенное уменьшение (примерно в 2 раза) неравномерности потоков при закрытии фрамуг по предложенному алгоритму при разных скоростях ветра. Представленные результаты показывают принципиальную возможность и чувствительность управления неравномерностью потоков воздуха закрытием фрамуг.

Следует отметить, что для каждой градирни и при разных направлениях и скоростях ветра существует свое оптимальное решение по снижению неравномерности потоков воздуха, которое необходимо искать в

непосредственной привязке решения к конкретным условиям. Указанные оптимальные решения необходимо определять для каждого конкретного условия с учетом расположения строений станции и оформлять в виде инструкции для оперативного управления технологическим оборудованием с учетом конкретных погодных условий.

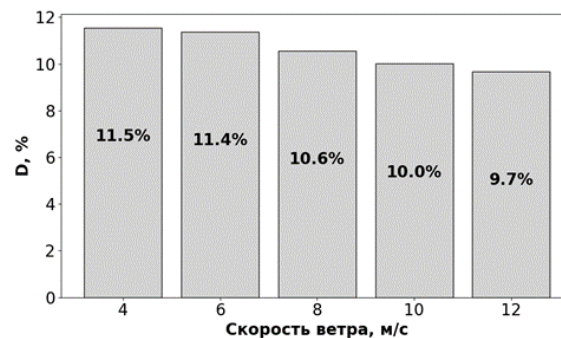


Рис. 4. Общая неравномерность распределения воздуха по сечению градирни в зависимости от скорости ветра при закрытии противоположных ветровому потоку фрамуг

Выводы. Разработанная модель показала хорошее соответствие рассчитанных и экспериментальных результатов по оценке неравномерности распределения потоков воздуха по сечению градирни при известных скоростях ветра.

Представленная модель позволяет анализировать мероприятия по устранению неравномерного распределения потоков воздуха путем закрытия фрамуг, выбранные по определенному алгоритму.

В перспективе представленная модель может использоваться для проведения диагностики состояния систем охлаждения на основе данных, полученных от штатных приборов, что позволит повысить экономичность и надежность эксплуатации оборудования.

Список литературы

1. Калатузов В.А., Павлов В.А. Расчет ограничений электрической мощности ТЭЦ, связанного с работой систем циркуляционного водоснабжения // Электрические станции. – 1987. – № 4. – С. 18–22.
2. Калатузов В.А. Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2003. – 113 с.
3. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Лаптева Е.А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах. – Казань: ТНТ, 2021. – 288 с.
4. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

5. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Энергетические характеристики оборудования ТЭС. – Иваново, 2014. – 232 с.

6. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

7. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

8. **Справочник по теплообменникам:** в 2 т. Т. 1 / пер. с англ.; под ред. О.Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

9. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

10. **Фомичев М.Д., Жуков В.П.** Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлаждаемой воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения), Иваново, 2023. – Иваново, 2023. – С. 392–395.

11. **Моделирование** и расчет процесса теплообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, В.Н. Виноградов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 3. – С. 57–63.

12. **Бадриев А.И., Власов С.М., Чичирова Н.Д.** Анализ нормальности распределения потоков в башенных испарительных градирнях // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 1(49). – С. 236.

13. **Комбинированная** модель теплообмена в башенных градирнях / В.П. Жуков, М.Д. Фомичев, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 90–96.

14. **FLUENT Incorporated, FLUENT Users Guide** Release 12, Lebanon. – New Hampshire, USA, 2009.

15. **Razafindrakoto E., Denis C.** N3S-AERO: a multidimensional model for numerical simulation of flows in cooling towers // The 11th IAHR Cooling Tower Symposium. – Cottbus, Germany, 1998. – P. 1–12.

16. **Majumdar A., Singhal A., Spalding D.** Numerical modelling of wet cooling towers. Part 1: Mathematical and physical models // Journal of Heat Transfer. – 1983. – Vol. 105. – P. 728–735.

17. **Numerical** modelling of wet cooling towers. Part 2: Application to natural and mechanical draft towers / A. Majumdar, A. Singhal, H. Reilly, J. Bartz // Journal of Heat Transfer. – 1983. – Vol. 105. – P. 736–743.

References

1. Kalatuzov, V.A., Pavlov, V.A. Raschet ogranicheniy elektricheskoy moshchnosti TETS, svyazannogo s rabotoy system tsirkulyatsionnogo vodosnabzheniya [Calculation of the limitations of the electric power of the CHP plant associated with the operation of circulating water supply systems]. *Elektricheskie stantsii*, 1987, no. 4, pp. 18–22.

2. Kalatuzov, V.A. *Povyshenie raspolagaemoy moshchnosti teplovykh elektrostantsiy s gradirnyami*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the available capacity of thermal power plants with cooling towers. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2003. 113 p.

3. Laptev, A.G., Basharov, M.M., Lapteva, E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teploobmennyykh i separatsionnykh protsessov v dvukhfaznykh sredakh* [Mathematical models and methods for calculating heat and mass transfer and separation processes in two-phase media]. Kazan: TNT, 2021. 288 p.

4. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Condensing units of steam turbines: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.

5. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Energeticheskie kharakteristiki oborudovaniya TES* [Energy characteristics of thermal power plant equipment]. Ivanovo, 2014. 232 p.

6. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

7. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.

8. Martynenko, O.G. *Spravochnik po teploobmennikom: v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers: in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

9. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teploobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

10. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplonositeley po secheniyu gradirni na temperaturu okhlazhdennoy vody [Calculation analysis of the influence of uneven distribution of coolants over the cross-section of a cooling tower on the temperature of chilled water]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplo tekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)*, Ivanovo, 2023 [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and prospects for the development of electrical and heat technology” (XXII Benardos Readings), Ivanovo, 2023]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.

11. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. Modelirovaniye i raschet protsessov teploobmena v bashennykh gradirnyakh sistem obratnogo okhlazhdeniya TES i AES [Modeling and calculation of process of heat and mass transfer in cooling towers of circulating cooling systems of TPP and NPP]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 3, pp. 57–63.

12. Badriev, A.I., Vlasov, S.M., Chichirova, N.D. Analiz normal'nosti raspredeleniya potokov v bashennykh isparitel'nykh gradirnyakh [Analysis of the normality of flow distribution in evaporative cooling towers]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2021, vol. 13, no. 1(49), p. 236.

13. Zhukov, V.P., Fomichev, M.D., Barochkin, E.V., Shuina, E.A., Shuvalov, C.I. Kombinirovannaya model' teploobmena v bashennykh gradirnyakh [Combined model of heat and mass transfer in cooling towers]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 90–96.

14. **FLUENT Incorporated, FLUENT Users Guide** Release 12, Lebanon. New Hampshire, USA, 2009.

15. Razafindrakoto, E., Denis, C. N3S-AERO: a multidimensional model for numerical simulation of flows in cooling towers. The 11th IAHR Cooling Tower Symposium. Cottbus, Germany, 1998, pp. 1–12.

16. Majumdar, A., Singhal, A., Spalding, D. Numerical modelling of wet cooling towers. Part 1: Mathematical and physical models. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol. 105, pp. 728–735.

17. Majumdar, A., Singhal, A., Reilly, H., Bartz, J. Numerical modelling of wet cooling towers. Part 2: Application to natural and mechanical draft towers. *Journal of Heat Transfer*, 1983, vol. 105, pp. 736–743.

УДК 519.688

Сергей Петрович Бобков

ФГБОУ ВО «Ивановский Государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: bsp@isuct.ru

Ирина Александровна Астраханцева

ФГБОУ ВО «Ивановский Государственный химико-технологический университет», доктор экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: i.astrakhantseva@mail.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Елена Сергеевна Бобкова

Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, доктор химических наук, доцент кафедры физической химии, Россия, Москва, e-mail: lenabobkova777@gmail.com

Имитационное моделирование генератора озона

Авторское резюме

Состояние вопроса. Промышленное сжигание топлива приводит к загрязнению окружающей среды дымовыми газами, содержащими оксиды серы, углерода, азота, которые относятся к классу токсичных веществ. Одним из методов обезвреживания отходящих газов является их химическая очистка с применением озона, который позволяет ускорять реакции окисления оксидов до легко утилизируемых соединений. Одним из промышленных способов получения озона является его генерация (синтез) из кислородсодержащих смесей в установках, в которых реализуются высоковольтные электрические разряды. В связи с этим совершенствование методов расчета и конструктивного оформления генераторов озона является актуальной задачей.

Материалы и методы. В исследовании использованы имитационные модели, построенные на основе метода Монте-Карло, позволяющего описывать случайные процессы, используя как детерминированные, так и вероятностные правила.

Результаты. Разработана имитационная модель генератора озона в барьерном электрическом разряде. Предложена общая методология разработки имитационной модели генератора озона. Разработан алгоритм моделирования. Рассмотрено описание отдельных стадий процесса. Показана адекватность описания имитационной моделью данных физического эксперимента.

Выводы. Полученные данные о неоднородном распределении активных частиц в рабочей зоне аппарата дают возможность для усовершенствования конструкций генератора озона. Использование дискретного стохастического подхода является перспективным направлением исследований, что обусловлено его возможной расчетной реализацией на современной компьютерной технике в рамках технологии параллельных вычислений.

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретные модели, случайные процессы, электро-синтез озона

Sergei Petrovich Bobkov

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Information Technology and Digital Economy Department, Russia, Ivanovo, e-mail: bsp@isuct.ru

Irina Aleksandrovna Astrakhantseva

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Economics (Post-doctoral degree), Professor of Information Technology and Digital Economy Department, Russia, Ivanovo, e-mail: i.astrakhantseva@mail.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Elena Sergeevna Bobkova

Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkin, Doctor of Chemistry, (Post-doctoral degree), Associate Professor of Physical Chemistry Department, Russia, Moscow, e-mail: lenabobkova777@gmail.com

Simulation modeling of ozone generator

Abstract

Background. Industrial combustion of fuel leads to pollution of the environment with flue gases containing oxides of sulfur, carbon, and nitrogen, which belong to toxic substances. One of the methods of neutralizing exhaust gases is their chemical purification using ozone, which allows accelerating the oxidation reactions of oxides to easily recyclable compounds. One of the industrial methods to obtain ozone is its generation (synthesis) from oxygen-containing mixtures in installations in which high-voltage electrical discharges are used. In this regard, improving the methods of calculation and design of ozone generators is an urgent task.

Materials and methods. The authors have used simulation models based on the Monte Carlo method, which allows random processes to be described using both deterministic and probabilistic rules.

Results. A simulation model of an ozone generator in a barrier electric discharge has been developed. A general methodology to develop a simulation model of an ozone generator has been proposed. A modeling algorithm has been developed and a description of individual stages of the process has been considered. The adequacy of the simulation model description of physical experiment data has been demonstrated.

Conclusions. The obtained data on the non-uniform distribution of active particles in the working zone of the device provides an opportunity to improve the ozone generator designs. The application of a discrete stochastic approach is a promising direction of research, due to its possible computational implementation using modern computer technology within the framework of parallel computing technology.

Key words: simulation modeling, discrete models, random processes, ozone electrosynthesis

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.081-090

Введение. Многие промышленные технологические процессы приводят к образованию загрязняющих атмосферу газообразных соединений. Прежде всего, это относится к сжиганию топлива в стационарных установках и на транспорте. В промышленных выбросах обычно преобладают оксиды углерода, серы, азота и пр. [1, 2]. Одним из путей снижения выбросов токсичных веществ в окружающую среду является совершенствование используемых технологий. В частности, при сжигании топлива применяется его предварительная очистка, ступенчатое сжигание, использование специальных горелок и др. Однако такие мероприятия далеко не всегда позволяют достичь допустимых концентраций вредных веществ в выбросах, и часто появляется необходимость в дополнительной специальной очистке отходящих газов [3].

К основным методам обезвреживания газовых выбросов относят сорбционные, термические, каталитические, мембранные, биохимические и химические методы очистки. Химические методы основаны на преобразовании токсичных соединений в менее токсичные, а также на активации химических реакций [4]. В последнем случае в очищаемые газы целесообразно вводить озон.

В частности, озонирование применяют для обезвреживания дымовых газов от оксидов серы и азота, что позволяет ускорять реакции их окисления до легко утилизируемых соединений. Помимо промышленной энергетики, озон, обладающий сильными окисляющими и дезинфицирующими свойствами, широко используется в таких отраслях, как электроника, нефтехимическая и пищевая промышленности, медицина, коммунальное и сельское хозяйство.

Массовое применение озона в современных технологиях связано с его производством в достаточном количестве. Экономически наиболее выгодным способом его получения считается синтез озона из кислорода или кислородсодержащих смесей газов в установках, реализующих высоковольтный электрический разряд [5, 6]. Поскольку электросинтез озона достаточно энергоемкий процесс, важной задачей становится совершенствование технологии и конструктивного оформления генераторов озона.

Описание предметной области. В промышленных генераторах озона, как правило, реализуется диэлектрический барьерный разряд. Барьерная форма разряда возникает между электродами, которые разделены диэлектрическим барьером и

разрядным промежутком, где, собственно, и протекает процесс синтеза озона [7, 8]. При этом молекулы кислорода (O_2) трансформируются, образуя озон (O_3). Одновременно с синтезом озона протекают обратные реакции, в результате которых озон разлагается [9]. Существует несколько вариантов конструктивного оформления аппаратов барьерного разряда. На практике большое распространение получили цилиндрические конструкции [10]. Повышенное внимание к использованию барьерного разряда вызвано, прежде всего, экономическими соображениями. Кроме того, эта форма электрического разряда удобна тем, что он осуществим в потоке газа при нормальном давлении. Такая конструкция генератора озона позволяет проводить процесс в режиме непрерывной подачи исходной газовой смеси на вход и удаления продуктов на выходе.

Для исследования работы коаксиального генератора озона целесообразно использовать модели аппаратов трубчатого типа. Для описания процессов в таких реакторах за основу обычно берут модель движения сплошной фазы в режиме идеального вытеснения [11]. При ее выводе приняты следующие допущения: перемешивание вещества в осевом направлении полностью отсутствует, при этом имеет место полное перемешивание в радиальном направлении. То есть предполагается, что материал перемещается через аппарат как твердый поршень и время пребывания всех частиц потока в аппарате одинаково. Это дает возможность представить модель движения в виде дифференциального уравнения в частных производных первого порядка. В нем искомой величиной выступает концентрация вещества, которая является функцией времени и длины аппарата:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial l} + W_i, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -го вещества; u – линейная скорость потока в аппарате; W_i – скорость образования i -го компонента в ходе реакции; t – время; l – координата, ось которой направлена вдоль аппарата.

При анализе уравнения (1) можно отметить ряд его существенных недостатков, заключающихся в том, что в реальных условиях невозможно добиться идеального вытеснения. Это связано с обязательным существованием осевого перемешивания

потока. Такая ситуация привела к созданию моделей, в которые введены корректирующие поправки [14]. К ним следует отнести две модификации так называемых диффузионных моделей, в уравнения которых входят слагаемые, учитывающие процессы либо продольного перемешивания потока, либо его перемешивания в двух направлениях:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 C_i}{\partial l^2} + W_i, \quad (2)$$

где D_l – коэффициент турбулентной диффузии в осевом направлении;

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u \frac{\partial C_i}{\partial l} + D_l \frac{\partial^2 C_i}{\partial l^2} + \frac{D_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + W_i, \quad (3)$$

где D_r – коэффициент диффузии в радиальном направлении; r – текущий радиус.

Модели (2)–(3) представляются дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных, а в выражение (3) дополнительно введена радиальная координата.

Опыт использования моделей с диффузионными членами показал, что повышение адекватности описания процесса обеспечивается существенным усложнением вычислительных процедур. Кроме того, остается неустранимым еще один крупный недостаток базовой модели (1), которая предполагает плоскопараллельное течение сплошной среды в осевом направлении с постоянной скоростью u . Но, согласно общепризнанным положениям гидродинамики, при течении сплошной среды около неподвижных стенок формируется пограничный слой, который характеризуется нулевой скоростью на стенке. В результате времени пребывания частиц потока в аппарате не корректно считать одинаковыми. Этот момент в моделях (1)–(3) игнорируется. Кроме того, в уравнениях типа (1) не рассматриваются стохастические факторы, всегда присутствующие в реальных условиях [13].

В последние годы в связи с возросшими возможностями технических и программных средств компьютерной техники стали активно использоваться методы имитационного моделирования. Такой подход предполагает создание и исследование моделирующего алгоритма, который имитирует поведение реального объекта – прототипа. При этом остаются неизменными логическая структура и поведенческие свойства объекта, последовательность во времени проис-

ходящих в нем событий, динамика взаимодействий элементов. Алгоритмическая имитационная модель может использоваться для проведения численных экспериментов и позволяет получать информацию о функционировании объекта с учетом случайных входных воздействий [14]. Все указанное делает имитационный подход удобным для выполнения компьютерных экспериментов в целях проектирования, анализа и оценки функционирования объектов и систем.

Методика создания модели генератора озона. Непрерывные детерминированные модели типа (1)–(3) базируются на понятии бесконечно малых величин. Бесконечно малые, являясь фундаментом классического математического анализа, по своей сути есть математическая абстракция. При моделировании реальной действительности существуют хотя и малые, но конечные физические величины, которые являются дискретными. Естественно предположить, что в научных исследованиях рассмотрение объектов с дискретных позиций будет приемлемым.

В этой связи в качестве методологической основы предлагаемой модели был принят дискретный стохастический подход. Он предполагает рассмотрение эволюции системы конечных элементов пространства по шагам дискретного времени. Кроме того, как следует из названия, подход учитывает существенное влияние случайных факторов на динамику исследуемого процесса. Последнее обстоятельство позволяет использовать при моделировании приемы, характерные для методов Монте-Карло [11].

Правомерность макроскопического дискретного представления о природе веществ была высказана профессором В.П. Майковым около 30 лет назад [12]. Предложенная им концепция применима к объектам, где неделимыми ячейками являются совокупности частиц в количестве не менее 10^{10} штук. При этом как бы устанавливается граница между микромиром, где действуют законы квантовой механики, и обычным миром, в котором имеют смысл макроскопические характеристики вещества (давление, температура, вязкость и пр.).

Дискретный стохастический подход объединяет методы моделирования, основанные на следующей базовой концепции. Принимается, что функционирование системы полностью определяется поведением элементов, из которых она состоит.

Отдельные элементы системы взаимодействуют между собой и с окружающей средой, подчиняясь одинаковым детерминированным или вероятностным правилам. Дискретные подходы к моделированию, такие как модели решеточных газов, системы клеточных автоматов, агентные модели и другие, эффективно используются в самых различных областях исследований [15, 16]. В настоящем исследовании нами использовалась модификация агентного метода имитационного моделирования. В качестве агентов рассматривались дискретные элементы сплошной среды, состояние и локализация которых подчиняются установленным правилам и алгоритмически закодированы в компьютерной программе.

Для получения дискретной модели генератора озона принимаются следующие гипотезы.

Во-первых, поток сплошной среды в аппарате рассматривается как совокупность множества отдельных элементов (ячеек), размер которых позволяет реализоваться термодинамическим параметрам движущегося вещества (плотность, вязкость и т.п.). При этом указанные элементы (макроячейки) могут перемещаться строго между узлами воображаемой пространственной решетки [17]. Ограничимся рассмотрением двумерной модели с регулярной ортогональной решеткой (рис. 1). Таким образом может быть осуществлен переход от привычных физических размеров аппарата к дискретным, когда каждый узел решетки имеет свои уникальные координаты x_1 и x_2 .

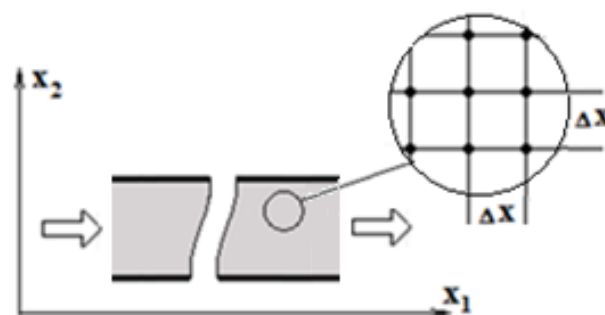


Рис. 1. Схема дискретной модели аппарата

Во-вторых, считается, что макроячейки рассматриваемой системы могут находиться в одном из двух состояний – активном или неактивном. Первое означает, что ячейка содержит макроскопически достаточное количество озона, чего нет в неактивной ячейке.

Как было указано выше, при работе генератора исходная газовая смесь поступает в реакционную зону, обрабатывается там плазмой барьерного разряда, насыщается озоном и покидает аппарат. Следовательно, модель должна позволять имитировать три основных процесса, непрерывно и одновременно протекающих в рабочей зоне:

- 1) перемещение газа внутри рабочей зоны;
- 2) образование озона под действием электрического разряда;
- 3) частичное разложение образовавшегося озона.

Имитация исследуемого процесса развития системы заключается в том, что на каждом шаге по времени синхронно происходит обновление положения макроячейки на решетке и изменение ее состояния. Данные процессы определяются правилами, описанными ниже.

Моделирование движения макроячеек. Разработанная модель предполагает, что в движении макроячеек через рабочую зону генератора реактора задействованы два механизма – детерминированный и вероятностный.

Первый из них – плоскопараллельное перемещение в направлении оси течения, которое определяется давлением газа на входе в аппарат. Величина модуля скорости в осевом направлении зависит от расстояния от элемента до оси аппарата и уменьшается по мере приближения к его стенке. Для расчета данной составляющей скорости используется выражение, вытекающее из закона Пуазейля:

$$v = \frac{\Delta P(R^2 - r^2)}{4\mu L}, \quad (4)$$

где v – скорость как функция расстояния от элемента до оси аппарата; ΔP – перепад давления; R – радиус аппарата; r – расстояние от элемента до оси аппарата; μ – вязкость среды; L – длина аппарата.

В качестве второго механизма движения газовой среды рассматривается стохастический процесс перемешивания частиц потока, который обусловлен флуктуациями скорости. При этом принимается, что макроячейка может совершить случайное перемещение в один из соседних узлов. В настоящем исследовании рассматривается выбор одного из четырех ближайших узлов решетки. Для такого выбора можно применить

следующий оператор, использующий метод «выбора по жребии»:

$$\begin{cases} m(x_1, x_2) \rightarrow m(x_1, x_2 + 1), & \text{если } 0 < \xi \leq d_1, \\ m(x_1, x_2) \rightarrow m(x_1 + 1, x_2), & \text{если } d_1 < \xi \leq d_1 + d_2, \\ m(x_1, x_2) \rightarrow m(x_1, x_2 - 1), & \text{если } d_1 + d_2 < \xi \leq d_1 + d_2 + d_3, \\ m(x_1, x_2) \rightarrow m(x_1 - 1, x_2), & \text{если } d_1 + d_2 + d_3 < \xi \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

где (x_1, x_2) – координаты узла; ξ – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне $[0-1]$; d_i – вероятности движения в соответствующем направлении.

Алгоритм моделирования движения макроячеек включает на каждом шаге по времени следующие действия.

1. Выбирается очередная активная макроячейка и по уравнению (4) для нее вычисляется модуль осевой скорости. Полученная величина квантуется с учетом шага решетки, что позволяет определить предварительные координаты нового положения ячейки.

2. Окончательные координаты определяются с учетом влияния случайных факторов. Генерируется случайное число ξ , проверяются условия (5), и положение макроячейки корректируется. Три вероятности направления случайного перемещения принимались одинаковыми: $d_1 = d_2 = d_3 = 0,25$.

Моделирование процесса образования озона. Не вдаваясь в подробности химического характера, примем, что образование озона в генераторе происходит по следующему механизму.

Неактивная макроячейка, движущаяся внутри аппарата, на каждом шаге по времени под действием электрического разряда может перейти в активное состояние с вероятностью P_1 . Эту вероятность можно интерпретировать как отношение количества появившихся на данном временном отрезке активных макроэлементов к общему количеству макроэлементов. Указанная вероятность зависит от параметров разряда, состава сплошной среды и конструктивных особенностей реактора. В то же время P_1 не зависит от времени пребывания газа в рабочей зоне генератора, т.е. от расхода газа через него.

Была проведена предварительная оценка данного показателя исходя из скоростей химических реакций образования озона и шага дискретизации пространства в модели (размеров макроячейки). При этом использовались кинетические параметры реакций образования и разрушения

озона, приведенные в [18]. Затем вычисленные значения уточнялись на основе экспериментальных данных. Поскольку в численных экспериментах с предлагаемой моделью шаг дискретизации пространства варьировался в пределах 1,0–0,25 мм, искомая вероятность P_1 лежала в диапазоне $0,8 \cdot 10^{-3}$ – $0,2 \cdot 10^{-3}$. Далее эта величина на основе опытных данных была скорректирована до значений $2 \cdot 10^{-3}$ – $0,5 \cdot 10^{-3}$.

Алгоритм моделирования образования активных макроячеек на каждом шаге по времени включает следующие этапы.

1. Исходя из заданного значения вероятности возникновения активного элемента и размеров решетки, вычисляется среднее количество активных макроячеек, появляющихся на каждом шаге по времени $n_{\text{ср}}$:

$$n_{\text{ср}} = P_1 N M, \quad (6)$$

где N и M – количество узлов решетки в направлении соответствующих осей.

2. Затем определяется конкретное количество появившихся на данном шаге активных макроячеек n_k . Оно генерируется как целая случайная величина, равномерно распределенная от 1 до $2n_{\text{ср}}$.

3. Далее координаты (положение на решетке) каждого нового активного элемента конкретизируются путем случайного выбора свободного узла решетки.

Моделирование процесса разложения озона. При создании модели было принято, что любая активная макроячейка на каждом шаге по времени может вернуться в пассивное состояние с вероятностью P_2 . Данная вероятность зависит от состава среды и конструкции реактора. Кроме того, вероятность дезактивации P_2 увеличивается с ростом продолжительности «жизни» активной ячейки.

Величина P_2 рассматривалась нами как непрерывная случайная экспоненциально распределенная величина:

$$P_2(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}, \quad (7)$$

где τ – продолжительность существования активной ячейки; λ – параметр, связанный с количеством событий дезактивации ячеек в единицу времени.

Если обозначить среднее число активных макроячеек, переходящих в исходное состояние на каждом шаге по времени, как $m_{\text{ср}}$, то можно записать

$$\lambda = 1/m_{\text{ср}}. \quad (8)$$

Величина $m_{\text{ср}}$ должна коррелировать с показателем скорости появления активных ячеек $n_{\text{ср}}$. С учетом сравнения кинетических параметров реакций образования и разрушения озона [18] значение $m_{\text{ср}}$ определялось как непрерывная случайная величина, равномерно распределенная от 1 до $n_{\text{ср}}$. В проведенных имитационных экспериментах вероятность P_2 составляла 0,02–0,65, в зависимости от продолжительности активного состояния макроячейки.

Алгоритм моделирования перехода активных элементов в исходное состояние на каждом шаге по времени следующий.

1. Выбор очередной активной макроячейки и расчет вероятности ее дезактивации P_2 по выражениям (7) и (8).

2. Имитация события. При этом генерируется случайное число ξ , равномерно распределенное в диапазоне [0–1]. Если выполняется условие $\xi < P_2$, то событие произошло.

Алгоритм моделирования работы генератора. Укрупненная блок-схема алгоритма имитационного моделирования представлена на рис. 2.

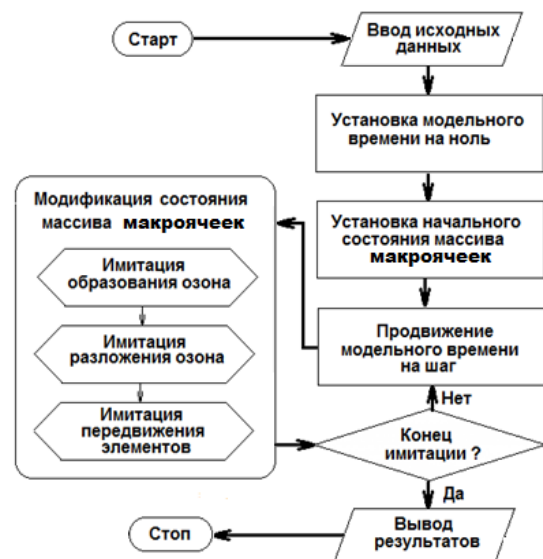


Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования

Компьютерная имитация работы генератора озона состоит из следующих действий.

1. Ввод исходных данных: длина L и радиус рабочей зоны реактора R ; шаг дискретизации пространства Δx ; давление газовой смеси на входе в реактор ΔP ; вязкость среды μ ; вектор вероятностей случайного

перемещения элементов d_i ; вероятность возникновения активного элемента P_i ; шаг дискретизации времени $\Delta\tau$; общее число шагов моделирования T .

2. Установка начального значения времени и начального состояния массива макроячеек (их исходное размещение).

3. Продвижение имитационного времени на один шаг.

4. Имитация процессов в рабочей зоне аппарата согласно методикам, описанным выше: перемещение активных макроячеек в узел с новыми координатами; образование новых активных макроячеек; «гибель» активных макроячеек. К концу данного этапа формируется массив состояния макроячеек на данном шаге по времени.

5. Если модельное время не исчерпано, то происходит возврат к этапу 3.

6. Вывод и визуализация результатов.

Описанный алгоритм был реализован в программной среде MatLab.

Результаты имитационного моделирования. В качестве физического прототипа при имитационном моделировании рассматривался реактор диэлектрического барьерного разряда, описанный в [19]. Цилиндрический реактор с внутренним диаметром 15 мм имел активную зону длиной 120 мм. Для генерации озона создавался барьерный разряд током промышленной частоты и напряжением до 20 кВ. В реактор подавалась газовая смесь, содержащая технический кислород. При физических экспериментах давление на входе регулировалось, что позволяло менять среднюю скорость газовой среды в пределах 0,01–0,04 м/с и, соответственно, продолжительность контакта газа с зоной разряда.

Предварительно были проверены значения критерия Рейнольдса. Расчет показал, что в указанном диапазоне изменения скоростей потока его величина составляла 10–41. Полученные значения указывают на ламинарный режим течения среды, что позволяет считать правомерным использование в расчетах уравнения (4). В дискретной модели пространство квантовалось с шагом $\Delta x = 0,5\text{--}0,05$ мм, время – с шагом $\tau = 0,1\text{--}0,01$ с. В процессе имитационного моделирования определялись несколько реализаций изучаемого случайного процесса, далее полученные данные подвергались статистической обработке.

Ниже представлены некоторые результаты компьютерной имитации генерации озона при следующих конкретных

значениях шагов дискретизации: по пространству $\Delta x = 0,1$ мм; по времени $\tau = 0,02$ с.

Прежде всего, следует отметить, что предлагаемый подход позволяет в каждом имитационном эксперименте получить последовательность массивов состояний макроячеек, т.е. наблюдать динамику процесса в активной зоне генератора озона. На рис. 3 представлена визуализация одного из массивов, соответствующих установившемуся режиму, при скорости газовой смеси 0,018 м/с. Размеры активной зоны реактора переведены из дискретных в привычные величины и даны в миллиметрах. Направление потока – слева направо.

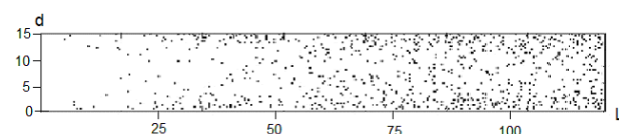


Рис. 3. Визуализация состояния генератора (активные макроячейки отмечены черным цветом)

Изображение на рис. 3 иллюстрирует значительную неравномерность распределения активных макроячеек в рабочей зоне генератора. Причиной этого являются как специфика гидродинамики потока, так и протекание реакций образования и разложения озона. В этой связи целесообразно рассмотреть особенности распределения активных макроячеек подробнее.

На рис. 4 приведен график распределения активных макроячеек по длине активной зоны в процентах от их общего количества. При этом активная зона была разбита на 10 участков, внутри которых данные усреднялись. Результаты получены в стационарном режиме при скорости газа 0,018 м/с.

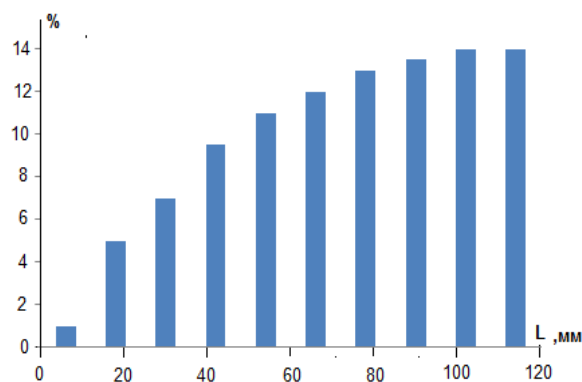


Рис. 4. Распределение активных макроячеек по длине активной зоны

Приведенные результаты показывают рост количества озона в направлении

выхода, что вполне ожидаемо и укладывается в рамки существующих взглядов на процесс. Понижение скорости роста ближе к концу активной зоны свидетельствует о выравнивании скоростей прямой и обратной реакций синтеза озона.

На рис. 5 приведено усредненное распределение активных макроячеек по диаметру рабочей зоны реактора, которая была разбита по сечению на 10 участков. Режим работы соответствует рассмотренному на рис. 4.

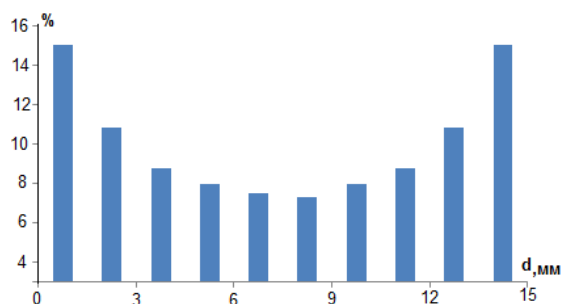


Рис. 5. Распределение активных макроячеек по диаметру сечения активной зоны

Результаты имитационного моделирования процесса наглядно показывают, что активные макроячейки в большей степени концентрируются вблизи стенок. Такие данные отличаются от результатов, которые можно получить при использовании существующих континуальных моделей (1)–(3). В частности, указанные традиционные модели дают практически равномерное распределение частиц по диаметру потока. Но в реальных условиях равномерное распределение невозможно, прежде всего, из-за существования пограничного слоя [13].

Адекватность предлагаемого имитационного алгоритма была проверена путем сравнения результатов компьютерного моделирования с данными физического эксперимента, приведенными в [20]. На рис. 6 приводятся экспериментальные и модельные зависимости концентрации озона на выходе из аппарата от скорости движения газовой смеси. Данные компьютерной имитации процесса, аппроксимированные полиномом третьей степени, представлены сплошной кривой. Значения, полученные в ходе физического эксперимента, показаны в виде квадратных меток.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что предлагаемый имитационный алгоритм вполне адекватно моделирует исследуемый объект. Кроме того,

расчеты показали, что относительная погрешность данных имитационного моделирования не превышает 15 %.

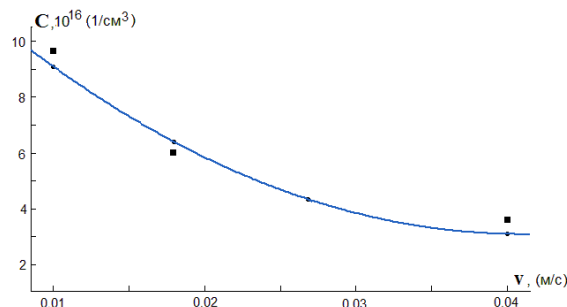


Рис. 6. Сравнение модельных и экспериментальных данных

Выводы. Результаты, полученные с использованием дискретного стохастического подхода, реализованного в имитационной модели, не противоречат существующим теоретическим взглядам на изучаемый процесс. Это касается как дискретного описания движения сплошной среды, так и использования вероятностных методов имитации химической реакции.

В пользу возможности использования методов Монте–Карло для моделирования химического взаимодействия можно указать, что вероятностные факторы широко используются химической кинетикой. В частности, уравнения для скоростей реакции выводятся из положений молекулярно-кинетической теории газов с использованием элементов статистики и теории вероятности [21]. В то же время в [21] используются обобщенные вероятности образования и разложения озона, что не идет вразрез со статистическими аспектами оценки скоростей химических реакций.

Достоинством предложенной модели является возможность анализировать поведение элементов газовой среды непосредственно в рабочей зоне аппарата (генератора), что невозможно при использовании классических моделей. Полученные результаты свидетельствуют о неравномерном распределении активных макроячеек по объему рабочей зоны генератора, т.е. о неоднородном поле концентрации озона. Эти факты могут быть учтены при разработке конструктивного оформления генераторов озона, что позволит повысить эффективность их работы.

Также необходимо подчеркнуть, что дискретные вероятностные модели по

своей идеологии и архитектуре идеально подходят для успешного использования современной компьютерной техники, особенно при использовании технологии параллельных вычислений.

В качестве недостатка предложенного подхода можно считать трудности, возникающие при определении конкретных значений вероятностных показателей, что, впрочем, характерно для большинства вероятностных подходов [22]. Одним из путей решения этой проблемы, помимо использования опытных данных, можно считать применение положений статистической термодинамики.

Сказанное выше позволяет сделать выводы о перспективности использования дискретного стохастического подхода для моделирования различных видов технологического оборудования. Физическая простота исходных предпосылок и возможность наглядной визуализации результатов позволяют рекомендовать дискретные стохастические модели к использованию как в научных исследованиях, так и в педагогической практике.

Список литературы

1. **Луканин А.В.** Очистка газовоздушных выбросов. – М.: Инфра-М, 2022. – 200 с.
2. **Вострикова М.А., Шкода В.В., Кашин Я.М.** Обзор методов очистки газовых выбросов энергетических установок от оксидов серы и азота // Инновационная наука. – 2015. – № 8. – С. 31–35.
3. **Очистка и дезодорация газовоздушных выбросов** / В.А. Пронин, В.О. Мамченко, О.В. Долговская, В.А. Цветков. – СПб.: Университет ИТМО, 2022. – 155 с.
4. **Теория и практика получения и применения озона** / В.В. Лунин, В.Г. Самойлович, С.Н. Ткаченко, И.С. Ткаченко. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2016. – 416 с.
5. **Силкин Е.М.** Синтез озона в электрических разрядах и повышение его эффективности // Компоненты и технологии. – 2008. – № 6. – С. 136–143.
6. **Оценка эффективности работы плазмохимических очистных устройств методом биотестирования** / А.А. Гущин, В.И. Гриневич, Т.В. Извекова, Н.А. Иванцова // Безопасность в техносфере. – 2012. – Т. 37, № 4. – С. 47–54.
7. **Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В.** Физическая химия барьерного разряда. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 176 с.
8. **Инженерная химия.** Химические реакторы / Ю.Н. Жилин, А.Н. Зарубина, Г.Л. Олиференко, А.Н. Иванкин. – М.: ФГБОУ ВО МГУЛ, 2016. – 140 с.

9. **Луinin В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н.** Физическая химия озона. – М.: ООО «МАКСПресс», 2019. – 540 с.

10. **Gibalov V.I., Tkachenko I.S., Lunin V.V.** Breakdowns and the formation of microdischarge channels in surface barrier discharges // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2008. – No. 6. – P. 1020–1023.

11. **Гумеров А.М.** Математическое моделирование химико-технологических процессов. – СПб.: Лань, 2022. – 176 с.

12. **Майков В.П.** Расширенная версия классической термодинамики – физика дискретного пространства-времени. – М.: МГУИЭ, 1997. – 160 с.

13. **Заварухин С.Г.** Математическое моделирование химико-технологических процессов и аппаратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 86 с.

14. **Звонарев С.В.** Основы математического моделирования. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.

15. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Использование вероятностных клеточных автоматов для моделирования течения жидкости // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2022. – № 2(70). – С. 47–54.

16. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности // Вестник ИГЭУ. – 2022. – Вып. 2. – С. 58–66.

17. **Бобков С.П., Астраханцева И.А.** Дискретная стохастическая модель гидродинамики потока // Моделирование систем и процессов. – 2023. – № 2. – С. 7–14.

18. **Исследование физико-химических свойств импульсного разряда в смеси CO₂ – O₂** / L. Saidia, A. Belasri, S. Baadj, Z. Harrache // Физика плазмы. – 2019. – Т. 45, № 5. – С. 465–480.

19. **Бобкова Е.С.** Разряд атмосферного давления как источник активных частиц для очистки воды от органических поллютантов // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 10. – С. 89–91.

20. **Bobkova E.S., Rybkin V.V.** Peculiarities of Energy Efficiency Comparison of Plasma Chemical Reactors for Water Purification from Organic Substances // PlasmaChem. PlasmaProcessing. – 2015. – Vol. 35, No. 1. – P. 133–142.

21. **Буданов В.В., Лефедова О.В.** Химическая кинетика / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2011. – 177 с.

22. **Ефремов Г.И.** Моделирование химико-технологических процессов. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 260 с.

References

1. **Lukanin, A.V.** *Ochistka gazovozdushnykh vybrosov* [Cleaning of gas-air emissions]. Moscow: Infra-M, 2022. 200 p.
2. **Vostrikova, M.A., Shkoda, V.V., Kashin, Ya.M.** *Obzor metodov ochistki gazovykh vybrosov energeticheskikh ustanovok ot oksidov sery i azota* [Review of methods for cleaning gas emissions from power plants]

from sulfur and nitrogen oxides]. *Innovatsionnaya nauka*, 2015, no. 8, pp. 31–35.

3. Pronin, V.A., Mamchenko, V.O., Dolgovskaya, O.V., Tsvetkov, V.A. *Ochistka i dezodoratsiya gazovozdushnykh vybrosov* [Cleaning and deodorization of gas-air emissions]. Saint-Petersburg: ITMO University, 2022. 155 p.

4. Lunin, V.V., Samoylovich, V.G., Tkachenko, S.N., Tkachenko, I.S. *Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya ozona* [Theory and practice of obtaining and using ozone]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2016. 416 p.

5. Silkin, E.M. Sintez ozona v elektricheskikh razryadakh i povyshenie ego effektivnosti [Synthesis of ozone in electrical discharges and increasing its efficiency]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no. 6, pp. 136–143.

6. Gushchin, A.A., Grinevich, V.I., Izvekova, T.V., Ivantsova, N.A. Otsenka effektivnosti raboty plazmokhimicheskikh ochistnykh ustroystv metodom biotestirovaniya [Assessing the efficiency of plasmachemical treatment devices using biotesting]. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2012, vol. 37, no. 4, pp. 47–54.

7. Samoylovich, V.G., Gibalov, V.I., Kozlov, K.V. *Fizicheskaya khimiya bar'ernogo razryada* [Physical chemistry of barrier discharge]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1989. 176 p.

8. Zhilin, Yu.N., Zarubina, A.N., Oliferenko, G.L., Ivankin, A.N. *Inzhenernaya khimiya. Khimicheskie reaktory* [Engineering chemistry. Chemical reactors]. Moscow: FGBOU VO MGUL, 2016. 140 p.

9. Lunin, V.V., Popovich, M.P., Tkachenko, S.N. *Fizicheskaya khimiya ozona* [Physical chemistry of ozone]. Moscow: MAKS Press LLC, 2019. 540 p.

10. Gibalov, V.I., Tkachenko, I.S., Lunin, V.V. Breakdowns and the formation of microdischarge channels in surface barrier discharges. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2008, no. 6, pp. 1020–1023.

11. Gumerov, A.M. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of chemical-technological processes]. Saint-Petersburg: Lan', 2022. 176 p.

12. Maykov, V.P. *Rasshirennaya versiya klassicheskoy termodinamiki – fizika diskretnogo prostranstva-vremeni* [An extended version of classical thermodynamics – physics of discrete space-time]. Moscow: MGUIE, 1997. 160 p.

13. Zavarukhin, S.G. *Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov i*

apparator [Mathematical modeling of chemical technological processes and apparatus]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2017. 86 p.

14. Zvonarev, S.V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya* [Basics of mathematical modeling]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta, 2019. 112 p.

15. Bobkov, S.P., Astrakhantseva, I.A. Ispol'zovanie veroyatnostnykh kletochnykh avtomatov dlya modelirovaniya techeniya zhidkosti [Using probabilistic cellular automata to simulate fluid flow]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2022, no. 2(70), pp. 47–54.

16. Bobkov, S.P., Astrakhantseva, I.A. Prime-neniye agentnogo podkhoda dlya modelirovaniya protsessov teploprovodnosti [Application of an agent-based approach to modeling heat conduction processes]. *Vestnik IGEU*, 2022, issue 2, pp. 58–66.

17. Bobkov, S.P., Astrakhantseva, I.A. Diskretnaya stokhasticheskaya model' gidrodinamiki potoka [Discrete stochastic model of flow hydrodynamics]. *Modelirovanie sistem i protsessov*, 2023, no. 2, pp. 7–14.

18. Saidia, L., Belasri, A., Baadj, S., Harrache, Z. Issledovanie fiziko-khimicheskikh svoystv impul'snogo razryada v smesi CO₂ – O₂ [Study of the physical and chemical properties of pulse discharge in a CO₂ – O₂ mixture]. *Fizika plazmy*, 2019, vol. 45, no. 5, pp. 465–480.

19. Bobkova, E.S. Razryad atmosfernogo davleniya kak istochnik aktivnykh chastits dlya ochistki vody ot organicheskikh pollyutantov [Atmospheric pressure discharge as a source of active particles for purifying water from organic pollutants]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2014, vol. 57, no. 10, pp. 89–91.

20. Bobkova, E.S., Rybkin, V.V. Peculiarities of Energy Efficiency Comparison of Plasma Chemical Reactors for Water Purification from Organic Substances. *Plasma Chem. Plasma Processing*, 2015, vol. 35, no. 1, pp. 133–142.

21. Budanov, V.V., Lefedova, O.V. *Khimicheskaya kinetika* [Chemical kinetics]. Ivanovo, 2011. 177 p.

22. Efremov, G.I. *Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov* [Modeling of chemical and technological processes]. Moscow: INFRA-M, 2021. 260 p.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.021

Сергей Николаевич Литвинов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: litvinov@esde.ispu.ru

Сергей Алексеевич Ладанов

ООО «Автоматизация промышленных систем», инженер-электроник, отдел ИТ, Россия, Иваново, e-mail: sergei_ladanov_93@mail.ru

Максим Владимирович Карелин

ООО «ЭНВИСОЛ», генеральный директор, Россия, Москва, e-mail: NWSOL77@yandex.ru

Разработка алгоритма непрерывного отслеживания объектов производства на базе рекурсивного фильтра Калмана

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для определения местоположения объекта обычно используются методы трилатерации и триангуляции. Для их реализации требуется решение системы нелинейных уравнений относительно неизвестных координат. С ростом количества отслеживаемых объектов существенно возрастает количество уравнений, что увеличивает сложность вычислений и время обновления текущих координат. В условиях промышленного производства из-за переотражений и зашумленности возрастает и погрешность вычислений, что может привести к нарушению выполнения производственных задач и снизить безопасность работы сотрудников. В связи с этим целью настоящего исследования является увеличение точности работы системы позиционирования в производственных условиях и сокращение времени обновления координат за счет создания алгоритма на основе рекурсивного фильтра Калмана, устойчивого к шумам в измерениях.

Материалы и методы. Использованы методы физического моделирования устройств системы определения местоположения объектов в условиях промышленного производства, выполненных на базе сверхширокополосных приемо-передатчиков. Для решения уравнений определения координат объекта использованы математические методы, в частности робастный рекурсивный фильтр Калмана с М-оценкой.

Результаты. Разработан робастный алгоритм непрерывного отслеживания объектов на основе фильтра Калмана с М-оценкой ошибок измерения и состояния с помощью предложенной модификации функции потерь Geman–McCluer, обеспечивающий субметровый уровень точности определения координат, обновляемых каждые 2–3 с. Разработаны прототипы устройств системы позиционирования на основе сверхширокополосных приемо-передатчиков. В результате математических и физических экспериментов установлено, что максимальная погрешность в отклонении координат составила 2,3 м, а минимальная – 0,1 м.

Выводы. Разработанный алгоритм эффективен для применения на производстве, в том числе и энергетическом. Он обладает устойчивостью к зашумленности измерений, обеспечивая необходимую точность позиционирования для линейной и нелинейной траекторий движения. Будущие исследования связаны с проверкой работы алгоритма при увеличении количества отслеживаемых объектов, а также с дальнейшим повышением точности его работы.

Ключевые слова: система внутреннего позиционирования, автономные системы определения местоположения, сверхширокополосные передатчики, рекурсивные фильтры, робастный фильтр Калмана, М-оценка

Sergey Nikolaevich Litvinov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Power Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: litvinov@esde.ispu.ru

Sergey Alekseevich Ladanov

LLC "Automation of Industrial Systems", Electronics Engineer, IT department, Russia, Ivanovo, e-mail: sergei_ladanov_93@mail.ru

Maksim Vladimirovich Karelin

LLC «ENVISOL», CEO, Russia, Moscow, e-mail: NWSOL77@yandex.ru

Development of an algorithm for industrial production objects continuous tracking based on recursive Kalman filter

Abstract

Background. Trilateration and triangulation methods are usually used to determine the location of an object. Their implementation requires solving a system of nonlinear equations with respect to unknown coordinates. As the number of objects being tracked increases, the number of equations grows significantly, which increases the complexity of calculations and the time it takes to update current coordinates. Under conditions of industrial production, due to reflections and noise, the calculation error also increases, which can lead to disruption of production tasks and reduce the safety of employees. The paper sets the task of developing an algorithm based on the recursive Kalman filter, which, in combination with modern noise-resistant technical means, allows increasing the accuracy of the positioning system under production conditions and reducing the time of updating coordinates.

Materials and methods. The authors have used methods of physical modeling of devices of the objects location determination system under conditions of industrial production, based on ultra-wideband transceivers. Mathematical methods, particularly the robust recursive Kalman filter with M-estimate, are used to solve equations of determination of object coordinates.

Results. The authors have developed a positioning algorithm based on a recursive Kalman filter with M-estimate of measurement and state errors using the proposed modification of the Geman–McCluer loss function. The algorithm provides a submeter accuracy to determine coordinates that updated every 2–3 seconds. Prototypes of positioning system devices based on ultra-wideband transceivers have been developed. The results of mathematical and physical experiments have shown that the maximum error of coordinate deviation is 2,3 m, and the minimum error is 0,1 m.

Conclusions. The developed algorithm is effective for production, including energy production. It is resistant to noise measurement, providing the necessary positioning accuracy for linear and nonlinear motion trajectories. Future research is related to testing the algorithm in case of an increase in the number of tracked objects, as well as further improving the accuracy of its operation.

Key words: indoor positioning system, autonomous positioning systems, ultra-wideband transceivers, recursive filters, robust Kalman filter, M-estimator

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.6.091-098

Введение. В условиях промышленного производства, где безопасность, эффективность и координация играют ключевую роль, контроль за передвижением сотрудников приобретает особое значение. Своевременное определение их текущего положения позволяет оптимизировать производственные процессы [1]. На объектах энергетики можно снизить затраты за счет более эффективного распределения времени на проведение ремонтных работ. Отслеживание

перемещения работников позволит оперативно получать информацию о приближении к зонам с высокими значениями давления, температуры, напряженности электрического и магнитного полей и оповещать их об этом. Это приведет к снижению числа несчастных случаев на энергетическом производстве, т.е. повысит общий уровень безопасности труда. В настоящее время известны различные методы позиционирования внутри помещений, проанализированы

их преимущества и недостатки [2]. Среди основных недостатков существующих методов можно выделить: чувствительность к помехам и физическим препятствиям; высокое энергопотребление; ограниченный радиус действия; задержки в обновлении данных; низкая масштабируемость. Целью настоящего исследования является увеличение точности работы системы позиционирования в производственных условиях и сокращение времени обновления координат за счет создания алгоритма на основе рекурсивного фильтра Калмана, устойчивого к шумам и выбросам в измерениях.

Методы исследования. Для определения координат объектов необходимо построить систему, в которой множество перемещающихся объектов-меток быстро обмениваются информацией с неподвижными маяками, при этом расчет координат может выполняться как на стороне маяков, так и на стороне меток. Наиболее перспективным для расчета координат с точки зрения реализации прогнозного фильтра является метод, основанный на оценке разницы распространения во времени радиосигналов между маяками и метками (англ. Time Difference of Arrival – TDoA) [3]. Для разработки алгоритма были созданы портативные макеты маяков (рис. 1), а также макеты объектов-меток (рис. 2). Для обеспечения дополнительной устойчивости к помехам при обмене радиосигналами в условиях производства были использованы сверхширокополосные приемо-передатчики (англ. ultra-wide band – UWB) [4, 5].



Рис. 1. Внешний вид плат маяков

Поскольку для промышленного предприятия предполагается отслеживание большого количества объектов (более 500), а вычисления координат на маяках занимало бы много времени, был разработан

метод расчета координат на стороне меток (англ. Reverse Time Difference of Arrival – RTDoA). Для регистрации часто передаваемых радиосигналов в единой временной шкале для всех устройств в системе требуется высокоточная (в микросекундном диапазоне) временная синхронизация, которая осуществляется непрерывно [6].



Рис. 2. Внешний вид плат меток

В [2] показан принцип формирования системы уравнений, связывающих разницу во времени регистрации радиосигналов от маяков со стороны метки и неизвестные значения координат метки. На практике для пространственной задачи определения координат требуется не менее трех маяков, а положение отслеживаемого объекта находится на пересечении гиперболических поверхностей, сформированных парами маяков [7]. Система уравнений, сформированная для четырех маяков и одной метки, может иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d_1 - d_2}{c} = dt_1, \\ \frac{d_2 - d_3}{c} = dt_2, \\ \frac{d_3 - d_4}{c} = dt_3, \end{cases} \quad (1)$$

где d_1, d_2, d_3, d_4 – расстояния от метки до первого, второго, третьего и четвертого маяков соответственно, выраженные через неизвестные координаты метки x, y, z и соответствующие известные координаты маяков x_i, y_i, z_i :

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}; \\ d_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}; \\ d_3 &= \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2}; \\ d_4 &= \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2}; \end{aligned} \quad (2)$$

dt_1, dt_2, dt_3 – разности во временах приема радиосигналов от маяков на метку, выраженные через временные метки t_i :

$$\begin{aligned} dt_1 &= t_1 - t_2; \\ dt_2 &= t_2 - t_3; \\ dt_3 &= t_3 - t_4; \end{aligned} \quad (3)$$

c – скорость распространения электромагнитных волн.

Аналитическое решение системы (1), обеспечивающее приемлемый результат по скорости вычислений, на практике не представляется возможным, поэтому обычно применяются известные итерационные методы, например метод Ньютона [8]. Однако при большом количестве маяков и меток расчеты увеличиваются по времени, ошибки в измерениях (из-за зашумленности и переотражений радиосигналов) начинают играть существенную роль, кроме того, система уравнений становится переопределенной, что в условиях ограниченных вычислительных ресурсов приобретает актуальность. В связи с этим наиболее перспективным с точки зрения экономии ресурсов и повышения точности определения координат является двухшаговый фильтр Калмана [9]. Его преимущество заключается в том, что на каждом шаге итерации обрабатывается только одно измерение (временная разница от пары маяков). При этом в цикле выполняется два шага: прогнозирование новых координат с учетом динамики системы в следующий дискретный отсчет времени и уточнение текущих координат объекта на основе измерений. Однако в классическом виде данный метод не лишен недостатков, в частности он не обладает вычислительной стабильностью и чувствителен к выбросам и зашумленности в измерениях [10]. В отличие от существующих разновидностей алгоритмов [11], нами предлагается использование робастного алгоритма Калмана, в котором выполняется М-оценка ошибок измерения и состояния с помощью модифицированной функции потерь Geman–McCluer. Для рассматриваемого случая перемещения объектов информация о динамике системы отсутствует (не известны скорости перемещения меток), система уравнений на шаге прогноза по алгоритму Калмана в этом случае упрощается и имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \hat{X}_{k|k-1} = F_k \hat{X}_{k-1|k-1}, \\ P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \end{cases} \quad (4)$$

где $\hat{X}_{k|k-1}$ – прогнозное состояние на момент времени k (текущая итерация); F_k – матрица перехода состояния (единичная, поскольку отсутствует информация о скорости); $\hat{X}_{k-1|k-1}$ – вектор состояния на момент времени $k-1$ (предыдущая итерация); $P_{k|k-1}$ – ковариационная матрица ошибки прогноза на момент времени k ; $P_{k-1|k-1}$ – ковариационная матрица ошибки прогноза на момент времени $k-1$; F_k^T – транспонированная матрица перехода состояния; Q_k – матрица шумов процесса.

На втором шаге происходит уточнение координат с учетом полученных реальных измерений. Сначала вычисляется разность между измеренными параметрами и прогнозным состоянием (инновация):

$$Y_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}, \quad (5)$$

где Z_k – матрица измерений (разности времени регистрации сигналов на метке); H_k – матрица связи измерений и состояния (поскольку функции в системе (1) нелинейные, то матрица содержит частные производные функции связи по элементам вектора состояния системы):

$$H_k = \frac{dh}{dx} \Big|_{\hat{X}_{k|k-1}}, \quad (6)$$

где h – функция связи измерений и состояния.

Затем выполняется вычисление ковариации инновации:

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k, \quad (7)$$

где R_k – ковариационная матрица шума измерений.

После этого рассчитывается коэффициент усиления Калмана:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1}. \quad (8)$$

Для повышения робастности фильтра в условиях выбросов и сильной зашумленности сигналов для инновации (текущей ошибки измерений) и вектора ошибки состояния предварительно выполняется М-оценка. Она заключается в расчете весовых коэффициентов на основе предложенной модификации функции потерь Geman–McCluer:

– для ошибки измерений

$$w_y = \frac{\sigma^2}{\sigma + Y_k^2}; \quad (9)$$

- для ошибки состояния

$$W_x = \frac{\sigma^2}{(\sigma + e_{x_anp}^2)^2}, \quad (10)$$

где $e_{x_анр} = \hat{X}_{k-1|k-1} - \hat{X}_{k|k-1}$ – вектор априорной ошибки состояния; σ – постоянная функции потерь (подбирается для обеспечения наилучшего сглаживания выбросов в измерениях).

На основе данных весовых коэффициентов уточняются матрицы ковариаций ошибки прогноза P_{kw} и шума измерений R_{kw} . Чем выше значения ошибок измерений и состояния, тем меньше весовой коэффициент α , и, соответственно, тем меньший вклад они вносят при обновлении матриц ковариаций.

С учетом этого выполняется операция обновления вектора состояния и ковариационной матрицы ошибки состояния:

$$\begin{cases} X_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k Y_k, \\ P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \end{cases} \quad (11)$$

где I – единичная матрица.

Затем вычисляется апостериорная ошибка состояния и процедура определения координат повторяется в цикле. При этом используются значения разности времен распространения радиоволн следующей пары маяков. Блок-схема алгоритма показана на рис. 3.

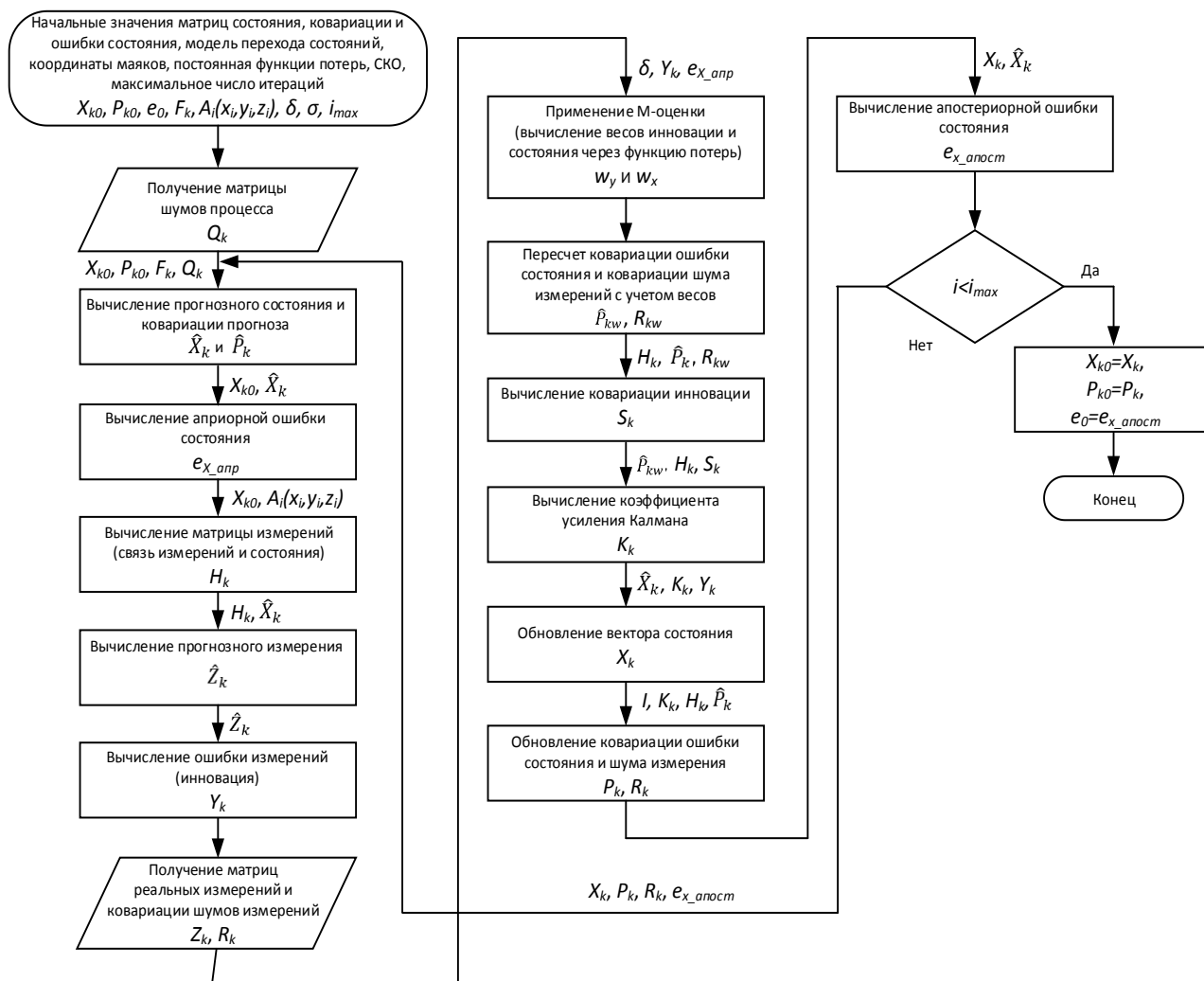


Рис. 3. Блок-схема разработанного алгоритма

Результаты исследования. Для проверки работы алгоритма и системы позиционирования в целом был проведен ряд экспериментов. Первоначально работа алгоритма, описанного на языке С, была протестирована

на персональном компьютере. Была создана модель размещения маяков в пространстве со следующими координатами: $A_1(0,0,0)$, $A_2(25,0,0)$, $A_3(0,25,0)$, $A_4(0,0,25)$. Для метки было указано начальное положение

$B(0,01, 0,01, 0)$, а траектория движения задана линейной с постоянным шагом изменения (увеличения) координат: по x – на 0,02, по y – на 0,03. Затем были заданы начальные условия и величина СКО для работы фильтра Калмана. Процесс перемещения метки является дискретным и включает в себя 1000 итераций. На каждой 15-й итерации вызывается работа фильтра Калмана на основе измеренных значений временной разницы от маяков до метки. Для моделирования ситуации, приближенной к реальной, на каждом шаге работы фильтра Калмана в ковариационную матрицу ошибок состояния добавляется шумовая компонента (рис. 4). Анализ полученных результатов показывает, что фильтр устойчиво работает при линейной траектории перемещения объекта, малые выбросы в измерениях присутствуют в начальный момент работы фильтра.

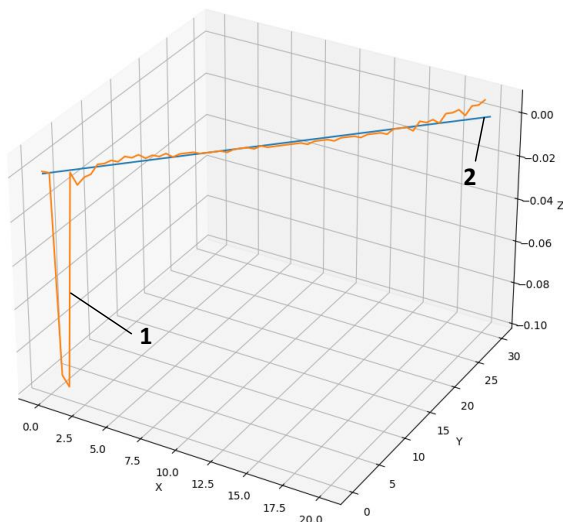


Рис. 4. Результат работы фильтра Калмана на компьютерной модели линейного движения метки: 1 – траектория, по оценке фильтра Калмана; 2 – истинная траектория

Для дальнейшей проверки работы алгоритма была смоделирована более сложная траектория, в которой перемещение по оси z является степенной функцией координаты x . Маяки установлены в точках с координатами $A_1(0,0,0)$, $A_2(50,0,0)$, $A_3(0,50,0)$, $A_4(0,0,50)$. Число итераций было снижено до 50, поскольку значение координаты z изменяется существенно и метка выходит за пределы зоны установленных маяков. Фильтр Калмана вызывается на каждой итерации. Остальные условия остались неизменными. Анализ результатов моделирования (рис. 5) показывает, что при более сложных траекториях движения

в работе фильтра наблюдаются отклонения измеренных значений по сравнению с истинной траекторией, однако они незначительны и лежат в пределах допустимой погрешности (субметровая точность измерений).

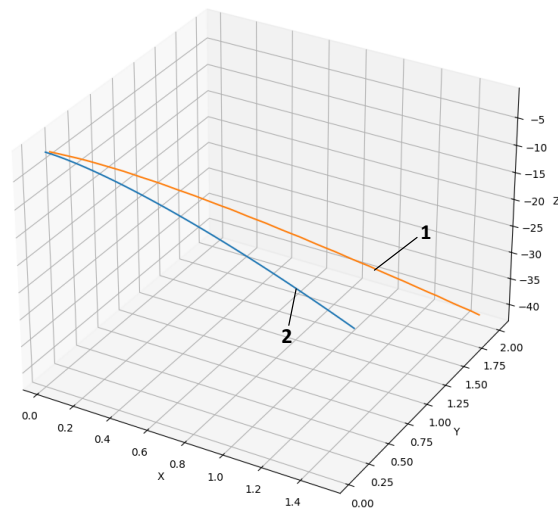


Рис. 5. Результат работы фильтра Калмана на компьютерной модели нелинейного движения метки: 1 – траектория, по оценке фильтра Калмана; 2 – истинная траектория

Затем была выполнена проверка работы алгоритма и устройств в условиях промышленного производства. На производственной площадке были размещены четыре маяка с известными координатами (табл. 1). Для программного обеспечения метки было выполнено конфигурирование, т.е. заданы все координаты маяков (маяк с номером 0 установлен в точку, определяющую начало отсчета).

Таблица 1. Позиция размещения маяков

№ маяка	Координата X, м	Координата Y, м	Координата Z, м	Площадь рабочей зоны, кв. м
0	0	0	0	272
1	16	0	0	
2	0	16	0	
3	16	17	0	

На выбранной площади было намечено 10 различных точек (у маяков, у границ, в центре и т. п.) с измеренными координатами. Затем отслеживалось плавное перемещение метки от точки к точке с фиксацией в них вычисленных координат с помощью разработанного прикладного программного обеспечения. Результаты рассчитанных координат, а также отклонения от их действи-

тельных значений занесены в табл. 2. Помимо координат метки, фиксировалось время их обновления (во время эксперимента проводились изменения настроек алгоритма фильтра Калмана, выполняемого на метке, для достижения минимального времени обновления координат), полученные результаты также занесены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, можно сделать вывод, что разница в определении

координат в условиях реального промышленного объекта также присутствует и незначительна: она составляет 2,3 м в самом худшем случае, а минимальное ее значение – 0,1 м.

Анализ результатов также показывает, что достигнута планируемая частота обновления координат, которая лежит в диапазоне от 2 до 3 с (в среднем).

Таблица 2. Результаты определения координат

№	Действительные координаты, м			Рассчитанные координаты, м			Отклонения в определении координат, м			Время расчета координат, с
	X	Y	Z	X	Y	Z	dX	dY	dZ	
1	10,5	3,2	–	10,6	3,39	–	0,1	0,19	–	2
2	3,5	3,3	–	3,8	3,68	–	0,3	0,38	–	4
3	6,5	6,9	–	7,2	7,36	–	0,7	0,46	–	4
4	9,7	10,3	–	10,6	11,38	–	0,9	1,08	–	4
5	2,4	14,4	–	2,595	15,2	–	0,196	0,8	–	2
6	15	13,2	–	16,7	15,5	–	1,7	2,3	–	4
7	15,2	6,7	–	16,0	7,8	–	0,8	1,1	–	2
8	7,5	13,9	–	10,0	13	–	2,5	0,9	–	4
9	0	7,35	–	1,9	7,1	–	1,9	0,25	–	6
10	9,4	8,9	–	9,9	9,5	–	0,5	0,6	–	2

Выводы. Созданный алгоритм определения текущего положения объектов на основе робастного рекурсивного двухшагового фильтра Калмана с М-оценкой позволяет с высокой точностью и частотой обновления координат отслеживать перемещение сотрудников в условиях промышленного производства, т.е. в условиях зашумленности передаваемых сигналов. Отличительной особенностью алгоритма является предложенная для оценки ошибок функция потерь, которая сильно сглаживает и подавляет выбросы в измерениях по мере увеличения значения ошибки. Разработанный алгоритм, будучи реализованным в системе позиционирования, позволяет оперативно реагировать на внештатные ситуации, связанные с работой сотрудников предприятия, и оптимизировать производственные процессы для снижения затрат.

При этом необходимо отметить, что фильтр Калмана имеет большое количество настроек, что дает возможность проводить дальнейшие исследования для уменьшения погрешности измерений и сглаживания выбросов, а также для улучшения динамических характеристик системы.

Список литературы

1. Бочкова Е.В., Авдеева Е.А. Автоматизация системы контроля учета времени сотрудников на примере торговой компании // Международный

журнал гуманитарных и естественных наук. – 2020. – № 11-3(50). – С. 115–119. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11305.

2. Литвинов С.Н., Ладанов С.А., Шеремет Е.И. Особенности применения систем позиционирования на производстве // Динамика сложных систем. – 2023. – Т. 17, № 2. – С. 17–26. DOI: 10.18127/j19997493-202302-02.

3. Zhou T., Cheng Y. Positioning Algorithm of UWB based on TDOA Technology in Indoor Environment // 2021 11th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). – Wuyishan, Fujian, China, 2021. – P. 261–266. DOI: 10.1109/ITME53901.2021.00061.

4. Schroeder G. A Real-Time UWB Multi-Channel Indoor Positioning System for Industrial Scenarios // 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – Nantes, France, 2018. – P. 1–5. DOI: 10.1109/IPIN.2018.8533792.

5. Impulse based range-gated UWB wireless transceiver IC in 90nm CMOS for medical sensing applications and communications / X. Wang, A. Dinh, D. Teng, et al. // 2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. – Vancouver, BC, Canada, 2009. – P. 194–199. DOI: 10.1109/ICUWB.2009.5288772.

6. Zandian R., Witkowski U. Implementation Challenges of Synchronisation of UWB Nodes in TDoA Structures // 2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – Nantes, France, 2018. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN.2018.8533796.

7. Плясовских П.П., Копосов А.В., Давиденко В.Ю. Использование метода TDOA для подтверждения достоверности информации радиовещательного автоматического зависимого наблюдения // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – 2023, декабрь. – № 4(39). DOI: 10.51955/2312-1327_2023_4_50.

8. Yang L., Cao J., Yang W. TDOA location based on modified Newton method // 2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP). – Chengdu, China, 2016. – P. 1515–1518. DOI: 10.1109/ICSP.2016.7878079.

9. Fine Resolution Position Estimation Using Kalman Filtering / B. Sun, M. Yeary, H.H. Sigmarsson, J.W. McDaniel // 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Auckland, New Zealand, 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/I2MTC.2019.8826857.

10. Cheng J.H., Yu P.P., Huang Y.R. Application of Improved Kalman Filter in Under-Ground Positioning System of Coal Mine // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021, Nov. – Vol. 31, no. 8. – P. 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2021.3101751.

11. Savage C.O., Cramer R.L., Schmitt H.A. TDOA Geolocation with the Unscented Kalman Filter // 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. – Ft. Lauderdale, FL, USA, 2006. – P. 602–606. DOI: 10.1109/ICNSC.2006.1673214.

References

1. Bochkova, E.V., Avdeeva, E.A. Avtomatizatsiya sistemy kontrolya ucheta vremeni sotrudnikov na primere trgovoy kompanii [Automation of the employee time tracking system using the example of a trading company]. *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2020, no. 11-3(50), pp. 115–119. DOI: 10.24411/2500-1000-2020-11305.

2. Litvinov, S.N., Ladanov, S.A., Sheremet, E.I. Osobennosti primeneniya sistem pozitsionirovaniya na proizvodstve [Features of the application of positioning systems at production site]. *Dinamika slozhnykh system*, 2023, vol. 17, no. 2, pp. 17–26. DOI: 10.18127/j19997493-202302-02.

3. Zhou, T., Cheng, Y. Positioning Algorithm of UWB based on TDOA Technology in Indoor Environment. *2021 11th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME)*. Wuyishan, Fujian, China, 2021, pp. 261–266. DOI: 10.1109/ITME53901.2021.00061.

4. Schroeder, G. A Real-Time UWB Multi-Channel Indoor Positioning System for Industrial Scenarios. *2018 Inter-*

national Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Nantes, France, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/IPIN.2018.8533792.

5. Wang, X., Dinh, A., Teng, D., Chen, L., Ko, S.B., Shi, Y., Basran, J., Dal Bello-Hass, V. Impulse based range-gated UWB wireless transceiver IC in 90nm CMOS for medical sensing applications and communications. *2009 IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. Vancouver, BC, Canada, 2009, pp. 194–199. DOI: 10.1109/ICUWB.2009.5288772.

6. Zandian, R., Witkowski, U. Implementation Challenges of Synchronisation of UWB Nodes in TDoA Structures. *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. Nantes, France, 2018, pp. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN.2018.8533796.

7. Plyasovskikh, P.P., Koposov, A.V., Davidenko, V.Yu. Ispol'zovanie metoda TDOA dlya podtverzhdeniya dostovernosti informatsii radio-veshchatel'nogo avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya [Application of TDOA method to confirm the reliability of broadcast automatic dependent observation information]. *Mezhdunarodnyy informatsionno-analiticheskii zhurnal «Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk»*, 2023 December, no. 4(39). DOI: 10.51955/2312-1327_2023_4_50.

8. Yang, L., Cao, J., Yang, W. TDOA location based on modified Newton method. *2016 IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP)*. Chengdu, China, 2016, pp. 1515–1518. DOI: 10.1109/ICSP.2016.7878079.

9. Sun, B., Yeary, M., Sigmarsson, H.H., McDaniel, J.W. Fine Resolution Position Estimation Using Kalman Filtering. *2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. Auckland, New Zealand, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/I2MTC.2019.8826857.

10. Cheng, J.H., Yu, P.P., Huang, Y.R. Application of Improved Kalman Filter in Under-Ground Positioning System of Coal Mine. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021 Nov., vol. 31, no. 8, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TASC.2021.3101751.

11. Savage, C.O., Cramer, R.L., Schmitt, H.A. TDOA Geolocation with the Unscented Kalman Filter. *2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. Ft. Lauderdale, FL, USA, 2006, pp. 602–606. DOI: 10.1109/ICNSC.2006.1673214.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черно-белыми**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 6

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 10.12.2024. Выход в свет 28.12.2024. Формат 60x84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,4. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет

Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8