КГЭУ

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

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Научно-технический и производственный журнал

(26) 4 / 2024

POWER ENGINEERING: RESEARCH, EQUIPMENT, TECHNOLOGY

Scientific & Technical Journal

Известия высших учебных заведений.
ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

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

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

Ответственный секретарь ГРАЧЕВА Е.И.

Научный редактор КАЛИНИНА М.В.
Редактор МАЙОРОВА Е.С.

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА:

ВАК:

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

РИНЦ:

- ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

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

© “Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ”, 2024.

Известия высших учебных заведений.
ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2024
Т.26, № 4
Июль - Август

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

АХМЕТОВА И.Г.
АРАКЕЛЯН Э.К.
БОРУШ О.В.
БОЧКАРЕВ И.В.
БРЯКИН И.В.
ВАНЬКОВ Ю.В.
ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В.
ГРАЧЕВА Е.И.
ДМИТРИЕВ А.В.
ДОВГУН В.П.
ЗВЕРЕВА Э. Р.
ИВШИН И.В.
КАЛАЙДА М.Л.
КАСИМОВ В.А.
КОРНИЛОВ В.Ю.
ЛАПТЕВ А.Г.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.
МИНГАЛЕЕВА Г.Р.
НИКОЛАЕВА Л.А.
ПЕТРОВ Т.И.
САФИН А.Р.
СУСЛОВ К.В.
ФЕДОТОВ А.И.
ЯКИМОВ Н.Д.
PENTIUC RADU DUMITRU
KOLCUN MICHAIL

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

Power engineering: research, equipment, technology

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

2024
Vol. 26, № 4
July - August

ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Founder: Kazan State Power Engineering University

Publisher: Kazan State Power Engineering University

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

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

Sections:

Editorial board:

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

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

© Power engineering: research, equipment, technology, 2024.

СОДЕРЖАНИЕ

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

ЗАЛЕНСКАЯ Н.Ю., МАКАРЕНКО Ф.В., ЗАРЕВИЧ А.И., ПОЛУЭКТОВ А.В. Анализ количества потребления SF_6 и CF_4 для заправки коммутационной аппаратуры высокого напряжения 3

АСКАРОВ Р.Р., НИКОЛАЕВ К.В., РЫЖКОВ Д.В., МАНАХОВ В.А., МИРАНОВ С.Р. Разработка типового проекта испытательной установки диэлектрических средств индивидуальной защиты на базе источника высокого напряжения АИИ-70 17

ЧАНЧИНА В.Е., КОНДРАТЬЕВ А.Е., АНЦУПОВ Н.А. Модальный анализ волн Лэмба стального трубопровода с кальциевыми отложениями 29

ТЮРИН А.Н., СОЛУЯНОВ Ю.И., АХМЕТШИН А.Р. Проверка на работоспособность при замыкании на землю аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков 41

ГАРНЫШОВА Е.В., ИЗМАЙЛОВА Е.В. Контроль отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний 55

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ЦИЦОНЬ И.И., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., НЕМИРОВСКИЙ А.Е., VALTCHEV S. Методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ 65

СТЕПАНОВА А.И., ХАЛЬЯСМАА А.И., МАТРЕНИН П.В. Краткосрочное прогнозирование нагрузки предприятия нефтегазовой промышленности с использованием технологических факторов и аддитивного объяснения Шепли 75

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

БАЛОБАНОВ Р.Н., БУЛАТОВА В.М., КРЮЧКОВ Н.С., ШАФИКОВ И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий 89

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ШИГИНА А.В., ХОРШЕВ А.А. Изменение структуры технологий в энергетике России под воздействием углеродного регулирования 100

ВЕСЕЛОВСКАЯ Е.В., ЛАЗАРЕВА Е.А. Исследование структуры и химического состава отложений оросителей башенной градирни 115

ГИЗЗАТУЛЛИН А.Р., ФИЛИМОНОВА А.А., ЧИЧИРОВА Н.Д. Разработка и верификация многокомпонентной модели паровой конверсии метана 124

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

КУНИЦКИЙ В.А., ЛУКИН С.В. Определение эффективности локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата 136

ЩИННИКОВ П.А., САДКИН И.С., БОРУШ О.В., РОМАНЕНКО Р.В. Энергетические особенности CO_2-циклов при кислородном сжигании метанола 150

CONTENTS

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

ZALENSKAYA N.YU., MAKARENKO PH.V., ZAREVICH A.I., POLUEKTOV A.V. Analysis of SF_6 and CF_4 consumption for refueling high-voltage switching equipment 3

ASKAROV R.R., NIKOLAEV K.V., RYZHKOV D.V., MANAKHOV V.A., MIRANOV S.R. Development of a standard design for a test installation of dielectric personal protective equipment based on a high voltage source AII-70 17

CHANCHINA V.E., KONDRATIEV A.E., ANTSUPOV N.A. Modal analysis of Lamb waves of steel pipeline with calcium deposits 29

TYURIN A.N., SOLUYANOV YU.I., AKHMETSHIN A.R. Testing the operation of protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps in the event of a ground fault 41

GARNYSHOVA E.V., IZMAYLOVA E.V. Control of deposits on pipeline systems by the method of free oscillations 55

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

TSITSON I.I., ABDULLAZYANOV E.YU., GRACHEVA E.I., NEMIROVSKY A.E., VALTCHEV S. Method of calculation of temperature parameters and servic life of cable lines with a voltage of 10 kV 65

STEPANOVA A.I., KHALYASMAA A.I., MATRENIN P.V. Short-term forecasting of consumption of the oil and gas enterprises using technological factors and Shapley additive explanations 75

ELECTRIC POWER INDUSTRY

BALOBANOV R.N., BULATOVA V.M., KRYUCHKOV N.S., SHAFIKOV I.I. Optimization of monitoring systems power cable lines 89

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

SHIGINA A.V., KHORSHEV A.A. The technological transformation of the Russian energy sector forced by carbon regulation 100

VESELOVSKAYA E.V., LAZAREVA E.A. Investigation of the structure and chemical composition of sediments of irrigators of the tower cooling tower 115

GIZZATULLIN A.R., FILIMONOVA A.A., CHICHIROVA N.D. Development and verification of a multi-component model for steam methane reforming 124

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

KUNITSKIY V.A., LUKIN S.V. Determining the efficiency of local heat recycling wastewater based on a heat exchanger 136

SHCHINNIKOV P.A., SADKIN I.S., BORUSH O.V., ROMANENKO R.V. Energy features of CO_2-cycles during oxygen combustion of methanol 150

© Заленская Н.Ю., Макаренко Ф.В., Заревич А.И., Полуэктов А.В.

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

(cc) BY

УДК 621.316.542:66.076.5 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16**

АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ПОТРЕБЛЕНИЯ SF_6 И CF_4 ДЛЯ ЗАПРАВКИ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Заленская Н.Ю., Макаренко Ф.В., Заревич А.И., Полуэктов А.В.

Воронежский Государственный Лесотехнический Университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Россия
phillipp@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в устранении возможной ошибки при поставках баллонов с гексафторидом серы (Элегаз) и баллонов с тетрафторидом углерода (Фреон R-14) на высоковольтные подстанции для заправки коммутационных аппаратов таких как высоковольтные выключатели, трансформаторы напряжения и др. ЦЕЛЬ. Провести анализ вероятных ошибочных поставок двух вышеупомянутых газов на подстанции. Сделать анализ возможных остатков (или недопоставок) баллонов с газами после заправки. Сделать предположение о причинах появления возможных остатков. Дать рекомендации по преодолению возможных проблем. Произвести соответствующие расчеты. Предложить формулу (таблицу) пересчёта расхода обоих типов газов. Сделать таблицу расчёта реальных значений количества поставляемых баллонов, связанных с дискретностью объёмов баллонов и самих коммутационных аппаратов. Сделать соответствующие выводы, дать рекомендации. МЕТОДЫ. При решении поставленной цели применялся метод расчета состояния идеального газа программными средствами для работы с электронными таблицами (такими как: Excel, Calc и т.п.). РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье отражена актуальность темы, рассмотрены особенности (заправка «самотёком») заправки высоковольтного элегазового оборудования в различных климатических условиях (главным образом ниже минус 40-45°С). Проведён анализ типичных типономиналов высоковольтных выключателей, применяемых на высоковольтных подстанциях. Представлен график пересчёта молярной доли (вносящей вклад по давлению) газов в массовую долю. Представлен выборочный расчёт количества баллонов для двух часто встречающихся объёмов коммутационных аппаратов и сорокалитровых баллонов с газами (SF_6 и CF_4) для нескольких стандартных коэффициентов заполнения баллонов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представлены предположительные умозаключения относительно оценки реальных ошибок при отправке баллонов с газами для заправки коммутационных аппаратов. Статья предлагает понимание последовательности проблем, связанных с неправильным расчётом и полную методику расчёта правильных объёмов (массы) газа в зависимости от реальных типов применяемых элегазово-хладонных (для элегазово-азотных методика тоже применима) аппаратов (той или иной фирмы) в зависимости от объёмов поставок единиц оборудования.*

Ключевые слова: *гексафторид серы; тетрафторид углерода; двухатомный азот; коммутационные аппараты; заполнение газом высоковольтных аппаратов; уравнение состояния идеального газа.*

Благодарности: *Авторы благодарны базовой кафедре Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем за поддержку в работе над настоящей статьёй.*

Для цитирования: Заленская Н.Ю., Макаренко Ф.В., Заревич А.И., Полуэктов А.В. Анализ количества потребления SF_6 и CF_4 для заправки коммутационной аппаратуры высокого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 3-16. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16.

ANALYSIS OF SF_6 AND CF_4 CONSUMPTION FOR REFUELING HIGH-VOLTAGE SWITCHING EQUIPMENT

Zalenskaya N.Yu., Makarenko Ph.V., Zarevich A.I., Poluektov A.V.

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia
phillipp@mail.ru

Abstract: *The article describes to eliminate possible errors in the supply of cylinders with sulfur hexafluoride and cylinders with carbon tetrafluoride to high-voltage substations for refueling switching devices such as high-voltage switches, voltage transformers, etc. Conduct an analysis of possible erroneous supplies of the two above-mentioned gases at the substation. Make an analysis of possible residuals (or shortfalls) of gas cylinders after refilling. Make an assumption about the reasons for the appearance of possible residues. Give recommendations for overcoming possible problems. Make the appropriate calculations. Propose a formula (table) for recalculating the consumption of both types of gases. Make a table for calculating the actual values of the number of supplied cylinders, related to the discreteness of the volumes of the cylinders and the switching devices themselves. Draw appropriate conclusions and make recommendations. To achieve this goal, a method was used to calculate the state of an ideal gas using software for working with spreadsheets. The article reflects the relevance of the topic and discusses the features of refueling high-voltage SF_6 equipment in various climatic conditions (below minus 40-49°F). An analysis of typical ratings of high-voltage switches used at high-voltage substations was carried out. A graph is presented for converting the molar fraction (contributing to pressure) of gases into the mass fraction. A sample calculation of the number of cylinders is presented for two commonly encountered volumes of switching devices and forty-liter gas cylinders for several standard cylinder filling ratios. Presumptive conclusions are presented regarding the assessment of real errors when sending gas cylinders for refilling switching devices. The article offers an understanding of the sequence of problems associated with incorrect calculations and a complete methodology for calculating the correct volumes (mass) of gas depending on the actual types of devices used, depending on the volume of supplies pieces of equipment.*

Keywords: *sulfur hexafluoride; carbon tetrafluoride; diatomic nitrogen; switching devices; gas filling of high-voltage devices; equation of state of an ideal gas.*

Acknowledgments: *The authors are grateful to the basic department of Technical and software computing and information systems for their support in working on this article.*

For citation: Zalenskaya N.Yu., Makarenko Ph.V., Zarevich A.I., Poluektov A.V. Analysis of SF_6 and CF_4 consumption for refueling high-voltage switching equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 3-16. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-3-16.

Введение и литературный обзор *(Introduction and Literature Review)*

Высоковольтные коммутационные аппараты (в т.ч. выключатели) применяются для включения и, главным образом, для отключения (принудительного дугогашения) высоковольтной линии электропередач, для регулирования электроснабжения и для экстренного отключения оборудования при аварийных ситуациях [1, 2]. Существуют различные типы таких аппаратов, в частности, это воздушные, масляные, вакуумные и элегазовые выключатели [3]. Последние обладают рядом неоспоримых преимуществ:

– применение на классы напряжений свыше 1 кВ;
– пожаро- и взрывобезопасность;
– высокая скорость и как следствие высокая отключающая способность;
– надёжное отключение малых индуктивных и ёмкостных токов в момент

перехода тока через ноль без среза и возникновения перенапряжений;

– дугогашение осуществляется в замкнутом пространстве и без выхлопа в окружающую среду;

– относительно малые массогабаритные характеристики.

– малый износ дугогасительных контактов [4].

Высоковольтные элегазовые выключатели по своей конструкции похожи на масляные, но отличием является то, что для гашения дуги применяется газовая среда [5] (чистый гексафторид серы, иногда его смесь с двухатомным азотом или тетрафторидом углерода), а не масло. Масляные выключатели требуют пристального внимания, связанного с необходимостью замены масла и очисткой механических контактов. Преимущество использования газовой среды заключается в отсутствии эффекта загрязнения контактных устройств [6, 7].

Существует два основных типа элегазовых выключателей: баковые и колонковые. Баковые выключатели имеют дугогасительную камеру в металлическом корпусе, который постоянно заземлён. Дугогасительная же камера колонковых выключателей заключена в изолированном керамическом корпусе. Отличительные особенности данных приборов неоднократно описывались в различных источниках [2, 3, 8], и в настоящей статье мы не будем на этом останавливаться.

Согласно нормативным документам [9, 10] при температурах окружающей среды ниже минус 45 °С при избыточных давлениях порядка 5-8 атмосфер чистый элегаз начинает переходить в жидкую фазу, что катастрофически снижает дугогасительные свойства коммутационных аппаратов, делая невозможным их применение. Для баковых выключателей существует два способа преодоления этого препятствия: применение подогрева дугогасительной камеры или использование смеси инертных газов, переходящих в жидкое состояние при более низких температурах. Для колонковых выключателей такого выбора нет, и возможно применение только газосмеси [11].

На практике, согласно декларациям [12, 13, 14], применяется элегазовые смеси двух типов: SF_6+N_2 и SF_6+CF_4 (с различным соотношением газов). Приведём наиболее часто встречающиеся.

Таблица 1

Table 1

Задекларированные соотношения смесей газов, применяемых в различных типах высоковольтных аппаратов разных производителей

Declared ratios of gas mixtures used in different types of high-voltage apparatus from different manufacturers

Элегаз и Хладон-14	Элегаз и Азот
SF_6-25% и CF_4-75% (до -60°С)	SF_6-30% и N_2-70% (до -55°С)
SF_6-30% и CF_4-70% (до -55°С)	SF_6-35% и N_2-65% (до -60°С)
SF_6-34% и CF_4-66% (до -50°С)	SF_6-40% и N_2-60% (до -60°С)
SF_6-35% и CF_4-65% (до -55°С)	SF_6-44,3% и N_2-55,7% (до -55°С)
SF_6-36% и CF_4-64% (до -50°С)	SF_6-51% и N_2-49% (до -50°С)
SF_6-40% и CF_4-60% (до -55°С)	SF_6-53% и N_2-47% (до -50°С)
SF_6-43% и CF_4-57% (до -55°С)	SF_6-60% и N_2-40% (до -45°С)
SF_6-44,3% и CF_4-55,7% (до -55°С)	—
SF_6-45% и CF_4-55% (до -50°С)	—
SF_6-50% и CF_4-50% (до -52°С)	—
SF_6-51% и CF_4-49% (до -50°С)	—

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

Как видим из таблицы 1, соотношение элегаза в смесях варьируется (грубо) от 60% до 25%. Температурный разброс связан с использованием разного избыточного давления газосмеси в разных типах коммутационных аппаратов (различные механические особенности разных фирм-производителей). Отметим, что при уменьшении содержания элегаза можно добиться желаемой работоспособности аппаратов при более низких температурах. Однако, дугогасительные свойства хладона и азота ниже, чем у элегаза, и полностью исключить последний не представляется возможным.

Практика организации поставок количества баллонов [15] с разными заправочными газами говорит о часто встречающихся случаях нехватки SF_6 и избытке CF_4. Но с чем же может быть связана эта проблема?

Для этого кратко опишем часто встречающуюся «методику» расчёта необходимого количества баллонов. Для определения «количества» газа руководители производства взвешивают сначала пустые баллоны (или берут эту информацию из технического паспорта изделия), затем взвешивают заполненный первым видом газа баллон. Вычитают вес пустого баллона из веса заполненного и делают вывод о массе газа номер 1. Таким же образом, измеряют (вычисляют) массу газа номер 2. Затем, берут номинальные соотношения газов из руководства по эксплуатации, умножают на соответствующий коэффициент и рассчитывают количества баллонов для двух типов газов. Такой поспешный подход, разумеется, приводит к серьёзным ошибкам, и как следствие, к серьёзным проблемам. Чтобы избежать рекламаций, связанных с недопоставкой элегаза на подстанции, руководители повышают процент всех поставляемых баллонов до 20%. Как результат, элегаза становится достаточно, а вот второй газ поставляется в переизбытке (в двойном количестве).

Остановимся на рассмотрении CF_4, как наиболее часто применяемого в качестве второго газа. Анализ [12, 13] позволяет выявить наиболее часто встречающиеся на практике (на подстанциях) объёмы высоковольтных коммутационных аппаратов.

В таблице 2 мы приведём пример возможного ошибочного расчёта для случая соотношения газов SF_6-36% и CF_4-64% (где это соотношение неправильно понималось как соотношение масс, а не числа частиц газа).

Таблица 2
Table 2

Массовые доли газов при различных объёмах аппаратов
Mass fractions of gases at different apparatus volumes

V, л	m_{SF6}, кг (5,9 атм. изб. давл.)	$m_{SF6/CF4}$, кг (7,4 атм. изб. давл., полагая, что 36%/64% - массовая доля)	$m_{1\ SF6}$, кг (в смеси)	$m_{2\ CF4}$, кг (в смеси)
90	4,16	3,56	1,28	2,28
150	6,93	5,94	2,14	3,80
180	8,32	7,14	2,57	4,57
190	8,78	7,54	2,71	4,83
210	9,71	8,32	2,99	5,33
300	13,9	11,8	4,25	7,55
450	20,8	17,9	6,44	11,5
500	23,1	19,8	7,13	12,7
520	24,1	20,6	7,42	13,2
580	26,8	23,0	8,28	14,7
740	34,2	29,3	10,5	18,8
800	36,9	31,7	11,4	20,3
940	43,4	37,2	13,4	23,8
960	44,4	38,1	13,7	24,4
1100	50,8	43,6	15,7	27,9
1160	53,6	45,9	16,5	29,4
1260	58,2	49,9	18,0	31,9
1300	60,1	51,5	18,6	32,9
1400	64,7	55,5	19,9	35,6
1500	69,3	59,4	21,4	38,0
1600	73,9	63,4	22,8	40,6
3400	157	135	48,6	86,4
3800	176	151	54,4	96,6
4600	213	183	65,9	117
15800	730	626	225	401

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

Цель настоящего исследования заключается в устранении вышеописанной ошибки и предложении правильной методики расчёта количества необходимого газа и, что более сложно, методики расчёта количества баллонов, содержащих газы.

Научная значимость исследования состоит в подтверждение возможности

применения на практике уравнения состояния идеального газа.

Практическая значимость исследования заключается в экономии средств предприятия, связанных ограничением избытка поставок газа и исключением возможных рекламаций.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Уравнение состояния идеального газа. Дискретное распределение газов по баллонам

Как было отмечено выше, причиной возможной ошибки является ошибочное суждение, что на давление, создаваемое в камере, влияет масса газа. Однако, давление в камере определяется количеством молекул (молей) газа, а не массой (или весом, который измеряется на практике). Ниже приведём уравнение равнение Клапейрона-Менделеева.

$$PV = \frac{m}{M} \cdot RT \tag{1}$$

где m – масса газа;
M – масса одного моля газа;
m/M – число молей газа;
P – давление газа (в атм.);
V – объём газа (в литрах);
T – температура газа (в кельвинах);
R – газовая постоянная (0,0821 л· атм. /моль·K).

Для смеси газов, это уравнение примет вид:

$$PV = \left(\frac{m_{SF6}}{M_{SF6}} + \frac{m_{CF4}}{M_{CF4}} \right) \cdot RT \tag{2}$$

где m_{SF6} – масса элегаза;
m_{CF4} – масса хладона-14;
M_{SF6} – молярная масса элегаза (0,146 кг/моль);
M_{CF4} – молярная масса хладона-14 (0,088 кг/моль);
m_{SF6}/M_{SF6} – число молей элегаза;
m_{CF4}/M_{CF4} – число молей хладона-14;
P – давление газа (в атм.);
V – объём газа (в литрах);
T – температура газа (в кельвинах);
R – газовая постоянная (0,0821 л· атм. /моль·K).

Взяв фиксированное значение объёма, давления и температуры можно варьировать соотношением массы газов от 0% /100% до 100% /0% и, зная молярные массы газов, смотреть как меняется их процентное соотношение по количеству молекул, которое как раз и влияет на создаваемое давление. В результате, можно получить график пересчёта (см. рис.1).

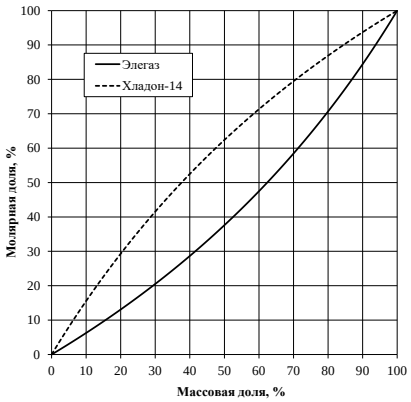


Рис. 1. График пересчёта молярной доли газов в массовую долю газов

Fig. 1. Graph for converting molar fraction of gases to mass fraction of gases

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

График (рис. 1) позволяет пересчитать соотношение молекул (молей) которое, как раз, и вносит вклад в создание давления в камере, в соотношение газов по их массе, которое может быть измерено путём взвешивания.

Другой важной проблемой является дискретность распределения газов, связанная с фиксированным значением газов в баллонах и количеством и номиналом самих высоковольтных аппаратов, что осложняет расчёт количества необходимых поставляемых баллонов с газами для подстанции. Такая задача решается частным образом, в зависимости от конкретных габаритно-колличественных параметром баллонов и аппаратов. Однако, для некоторых случаев мы приведём такие итерационные расчёты.

Результаты *(Results)*

Применяя график пересчёта (рис. 1), покажем для типичных значений из таблицы 1 (колонка 1) какое должно быть соотношение газов по массе.

Таблица 3
Table 3

Пересчёт типичных молярных соотношений в массовые
Conversion of typical molar ratios to mass ratios

Элегаз и Хладон-14 (молярная доля)	Элегаз и Хладон-14 (массовая доля)
SF_6-25% и CF_4-75%	SF_6-35% и CF_4-65%
SF_6-30% и CF_4-70%	SF_6-42% и CF_4-58%
SF_6-34% и CF_4-66%	SF_6-46% и CF_4-54%
SF_6-35% и CF_4-65%	SF_6-47% и CF_4-53%
SF_6-36% и CF_4-64%	SF_6-48% и CF_4-52%
SF_6-40% и CF_4-60%	SF_6-53% и CF_4-47%
SF_6-43% и CF_4-57%	SF_6-56% и CF_4-44%
SF_6-44,3% и CF_4-55,7%	SF_6-57% и CF_4-43%
SF_6-45% и CF_4-55%	SF_6-58% и CF_4-42%
SF_6-50% и CF_4-50%	SF_6-62% и CF_4-38%
SF_6-51% и CF_4-49%	SF_6-63% и CF_4-37%

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

Используя вновь уравнение (2), представим результат расчёта необходимой массы газов для поддержания номинального давления 7,4 атм. избыточного давления (или 8,4 атм. абсолютного давления в камере) с соблюдением номинального наиболее часто встречающегося (36%/64%) молярного соотношения для типичных объёмов коммутационных аппаратов (табл. 2).

Таблица 4
Table 4

Правильный расчёт массы и массовых долей газов при различных объёмах аппаратов
Correct calculation of mass and mass fractions of gases for different apparatus volumes

V, л	m_{SF6}, кг (5,9 атм. изб. давл.)	$m_{SF6/CF4}$, кг (7,4 атм. изб. давл., при молярной доле 36%/64% при массовой доле 48%/52%)	$m_{1\ SF6}$, кг (в смеси)	$m_{2\ CF4}$, кг (в смеси)
90	4,16	3,76	1,81	1,95
150	6,93	6,27	3,01	3,26
180	8,32	7,52	3,61	3,91
190	8,78	7,94	3,81	4,13
210	9,71	8,77	4,21	4,56
300	13,9	12,6	6,05	6,55
450	20,8	18,8	9,02	9,78
500	23,1	20,9	10,1	10,8
520	24,1	21,7	10,4	11,3
580	26,8	24,2	11,6	12,6
740	34,2	30,9	14,8	16,1
800	36,9	33,4	16,1	17,3

940	43,4	39,3	18,9	20,4
960	44,4	40,1	19,2	20,9
1100	50,8	45,9	22,1	23,8
1160	53,6	48,4	23,2	25,2
1260	58,2	52,6	25,2	27,4
1300	60,1	54,3	26,1	28,2
1400	64,7	58,4	28,1	30,3
1500	69,3	62,7	30,1	32,6
1600	73,9	66,8	32,1	34,7
3400	157	142	68,2	73,8
3800	176	159	76,3	82,7
4600	213	192	92,2	99,8
15800	730	660	317	343

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

Если сравнить неправильные значения из таблицы 2 и скорректированные из таблицы 4, можно отметить, что общая масса смеси увеличивается на 5,6%, и молярное соотношение 36%/64% меняется на массовое соотношение 48%/52%.

Теперь представим несколько частных расчётов количества необходимых баллонов с элегазом и хладоном-14. На практике чаще всего применяются баллоны [16] объемом 40 л, рассчитанные на 200 атм., с различной степенью заполнения. По массе это бывает 56, 40, 30 и 20 кг (для элегаза) и 29 кг (для хладона-14). Для определения количества целых баллонов необходимо поделить расчётную (для заправки аппаратов на подстанции) массу газа на массу газа в баллоне (за вычетом 2-х кг, т.к. в случае заправки выключателей «самотёком» в баллонах останется до 2 кг неиспользованного газа) и округлить в сторону целого баллона. Тогда, эффективная масса газов будет следующая: 54, 38, 28 и 18 кг (для элегаза) и 27 кг (для хладона-14).

Представим некоторые данные по применяемым баллонам в таблице 5 и таблице 6.

Таблица 5
Table 5

Данные по баллонам с элегазом
Data on gas cylinders

Элегаз при 293 °К				
Объём баллона, л	Типичные массы нетто элегаза, кг	$К_{заполн.}$, %	Соответствующие им давления, ат (присутствует жидкая фаза), кгс/см^2	Количество в-ва m_{SF6}/M_{SF6}, моль
40	56	88	21,44	384
	40	63	21,44	274
	30	47	21,44	206
	20	32	21,44	137

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

Таблица 6
Table 6

Данные по баллонам с хладоном-14
Data on cylinders with refrigerant-14

Хладон-14 при 293 °К				
Объём баллона, л	Типичная масса нетто хладона, кг	$К_{заполн.}$, %	Соответствующее ей давление, ат, кгс/см^2	Количество в-ва m_{CF4}/M_{CF4}, моль
40	29	92	139,7	330

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

Рассмотрим 2 типичных объёма высоковольтных аппаратов 180 л и 520 л для заправки (при молярной доле 36%/64% при массовой доле 48%/52%). Возьмём из таблицы 2 (для старого неправильного представления) и таблицы 4 (с правильным расчётом) значения необходимой массы газов. Рассчитаем расход баллонов элегаза и хладона в случае заправки до 15 шт. каждого типа аппаратов. Для элегаза возьмём из таблицы 5 массы 30 кг и 56 кг (минус 2 кг), и из таблицы 6 массу 29 кг (минус 2 кг). Тогда:

Таблица 7
Table 7

Расход по баллонам с элегазом (28 кг) для аппаратов с объёмом 180 л
Consumption by gas cylinders (28 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	m_{SF6}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{SF6}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (30-2 кг)	Примечание
1	2,57	2,57	1	3,61	3,61	1	0	
2	2,57	5,14	1	3,61	7,22	1	0	
3	2,57	7,71	1	3,61	10,83	1	0	
4	2,57	10,28	1	3,61	14,44	1	0	
5	2,57	12,85	1	3,61	18,05	1	0	
6	2,57	15,42	1	3,61	21,66	1	0	
7	2,57	17,99	1	3,61	25,27	1	0	
8	2,57	20,56	1	3,61	28,88	2	-1	Рекламация
9	2,57	23,13	1	3,61	32,49	2	-1	Рекламация
10	2,57	25,70	1	3,61	36,10	2	-1	Рекламация
11	2,57	28,27	2	3,61	39,71	2	0	
12	2,57	30,84	2	3,61	43,32	2	0	
13	2,57	33,41	2	3,61	46,93	2	0	
14	2,57	35,98	2	3,61	50,54	2	0	
15	2,57	38,55	2	3,61	54,15	2	0	

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

Таблица 8
Table 8

Расход по баллонам с элегазом (28 кг) для аппаратов с объёмом 520 л
Consumption of gas cylinders (28 kg) for apparatus with a volume of 520 l

Кол-во	m_{SF6}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{SF6}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (30-2 кг)	Примечание
1	7,42	7,42	1	10,4	10,4	1	0	
2	7,42	14,84	1	10,4	20,8	1	0	
3	7,42	22,26	1	10,4	31,2	2	-1	Рекламация
4	7,42	29,68	2	10,4	41,6	2	0	
5	7,42	37,10	2	10,4	52,0	2	0	
6	7,42	44,52	2	10,4	62,4	3	-1	Рекламация
7	7,42	51,94	2	10,4	72,8	3	-1	Рекламация
8	7,42	59,36	3	10,4	83,2	3	0	
9	7,42	66,78	3	10,4	93,6	4	-1	Рекламация
10	7,42	74,20	3	10,4	104,0	4	-1	Рекламация
11	7,42	81,62	3	10,4	114,4	5	-2	Рекламация
12	7,42	89,04	4	10,4	124,8	5	-1	Рекламация
13	7,42	96,46	4	10,4	135,2	5	-1	Рекламация
14	7,42	103,88	4	10,4	145,6	6	-2	Рекламация
15	7,42	111,30	4	10,4	156,0	6	-2	Рекламация

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

Таблица 9
Table 9

Расход по баллонам с элегазом (54 кг) для аппаратов с объёмом 180 л
Consumption by gas cylinders (54 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	m_{SF6}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{SF6}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (56-2 кг)	Примечание
1	2,57	2,57	1	3,61	3,61	1	0	
2	2,57	5,14	1	3,61	7,22	1	0	
3	2,57	7,71	1	3,61	10,83	1	0	
4	2,57	10,28	1	3,61	14,44	1	0	
5	2,57	12,85	1	3,61	18,05	1	0	
6	2,57	15,42	1	3,61	21,66	1	0	
7	2,57	17,99	1	3,61	25,27	1	0	
8	2,57	20,56	1	3,61	28,88	1	0	
9	2,57	23,13	1	3,61	32,49	1	0	
10	2,57	25,70	1	3,61	36,10	1	0	
11	2,57	28,27	1	3,61	39,71	1	0	
12	2,57	30,84	1	3,61	43,32	1	0	
13	2,57	33,41	1	3,61	46,93	1	0	
14	2,57	35,98	1	3,61	50,54	1	0	
15	2,57	38,55	1	3,61	54,15	2	-1	Рекламация

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

Таблица 10
Table 10

Расход по баллонам с элегазом (54 кг) для аппаратов с объёмом 520 л
Consumption by gas cylinders (54 kg) for 520 l apparatuses

Кол-во	m_{SF6}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{SF6}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{SF6}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	НЕДОСТАТОК баллонов элегаза (56-2 кг)	Примечание
1	7,42	7,42	1	10,4	10,4	1	0	
2	7,42	14,84	1	10,4	20,8	1	0	
3	7,42	22,26	1	10,4	31,2	1	0	
4	7,42	29,68	1	10,4	41,6	1	0	
5	7,42	37,10	1	10,4	52,0	1	0	
6	7,42	44,52	1	10,4	62,4	2	-1	Рекламация
7	7,42	51,94	1	10,4	72,8	2	-1	Рекламация
8	7,42	59,36	2	10,4	83,2	2	0	
9	7,42	66,78	2	10,4	93,6	2	0	
10	7,42	74,20	2	10,4	104,0	2	0	
11	7,42	81,62	2	10,4	114,4	3	-1	Рекламация
12	7,42	89,04	2	10,4	124,8	3	-1	Рекламация
13	7,42	96,46	2	10,4	135,2	3	-1	Рекламация
14	7,42	103,88	2	10,4	145,6	3	-1	Рекламация
15	7,42	111,30	3	10,4	156,0	3	0	

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

Таблица 11
Table 11

Расход по баллонам с хладоном-14 (27 кг) для аппаратов с объёмом 180 л
Flow rate for cylinders with refrigerant-14 (27 kg) for 180 l apparatuses

Кол-во	m_{CF4}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{CF4}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{CF4}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{CF4}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	Лишние поставляемые баллоны хладона (29-2 кг)	Примечание
1	4,57	4,57	1	3,91	3,91	1	0	
2	4,57	9,14	1	3,91	7,82	1	0	
3	4,57	13,71	1	3,91	11,73	1	0	
4	4,57	18,28	1	3,91	15,64	1	0	
5	4,57	22,85	1	3,91	19,55	1	0	
6	4,57	27,42	2	3,91	23,46	1	1	Перерасход
7	4,57	31,99	2	3,91	27,37	2	0	
8	4,57	36,56	2	3,91	31,28	2	0	
9	4,57	41,13	2	3,91	35,19	2	0	
10	4,57	45,70	2	3,91	39,10	2	0	
11	4,57	50,27	2	3,91	43,01	2	0	
12	4,57	54,84	3	3,91	46,92	2	1	Перерасход
13	4,57	59,41	3	3,91	50,83	2	1	Перерасход
14	4,57	63,98	3	3,91	54,74	3	0	
15	4,57	68,55	3	3,91	58,65	3	0	

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

Таблица 12
Table 12

Расход по баллонам с хладоном-14 (27 кг) для аппаратов с объёмом 520 л
Consumption by cylinders with refrigerant-14 (27 kg) for 520 l apparatuses

Кол-во	m_{CF4}, кг (Старый подход)	Нарастающая m_{CF4}, кг (Старый подход)	Округление до целых баллонов	m_{CF4}, кг (Новый подход)	Нарастающая m_{CF4}, кг (Новый подход)	Округление до целых баллонов	Лишние поставляемые баллоны хладона (29-2 кг)	Примечание
1	13,20	13,2	1	11,3	11,3	1	0	
2	13,20	26,4	1	11,3	22,6	1	0	
3	13,20	39,6	2	11,3	33,9	2	0	
4	13,20	52,8	2	11,3	45,2	2	0	
5	13,20	66,0	3	11,3	56,5	3	0	
6	13,20	79,2	3	11,3	67,8	3	0	
7	13,20	92,4	4	11,3	79,1	3	1	Перерасход
8	13,20	105,6	4	11,3	90,4	4	0	
9	13,20	118,8	5	11,3	101,7	4	1	Перерасход
10	13,20	132,0	5	11,3	113,0	5	0	
11	13,20	145,2	6	11,3	124,3	5	1	Перерасход
12	13,20	158,4	6	11,3	135,6	6	0	
13	13,20	171,6	7	11,3	146,9	6	1	Перерасход
14	13,20	184,8	7	11,3	158,2	6	1	Перерасход
15	13,20	198,0	8	11,3	169,5	7	1	Перерасход

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

Обсуждение результатов *(Discussions)*

В заключении отметим, что полученные значения (табл. 7-12) показывают возможные финансовые потери предприятия-поставщика коммутационных аппаратов. Однако, как их оценить на практике? Вкратце распишем некоторые суждения на этот счёт. Руководитель предприятия, руководствуясь старым ошибочным принципом расчёта количества баллонов поставляемых газов, разумеется, перестраховывается и добавляет к расчётным значениям ещё 10-15 %, однако и для этого случая, если пересчитать табл. 7-12, недопоставки элегаза (рекламации) будут иметь место, а вот перерасход баллонов с хладоном-14 увеличится. Поэтому, после рекламаций руководитель может принять решение о повышении расчётных (неправильно) значений масс газов на 20-25%. Это решение позволит избежать проблем с потребителями, однако, в особенности для проектов с большим числом аппаратов, количество поставляемых баллонов с хладоном-14 будет приближаться к 200% от реально необходимого. Конкретные цифры (проценты) выигрыша от применения правильного расчёта будут зависеть от видов аппаратов и объёмов поставки предприятия, но могут быть весьма существенными.

Таким образом, настоящая статья предлагает решение проблемы в случае неправильного (по массовым долям) расчёта соотношения поставок двух типов газов, применяемых для заправки высоковольтных коммутационных аппаратов в условиях низких температур (ниже -45°С). Представленный график пересчёта долей (по давлению или количеству вещества) газов в массовую долю может быть полезен для оптимизации процессов поставок инертных газов [17-18]. Такой подход исключает возможные рекламации со стороны потребителей и экономит средства, за счёт исключения перерасхода.

Литература

1. Ахатов М. М. Высоковольтные выключатели. Элегазовые выключатели / М.М. Ахатов, Д.И. Довгий // EurasiaScience : Сборник статей LVIII международной научно-практической конференции, Москва, 30 декабря 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Актуальность.РФ", 2023. – С. 149-150. – EDN UXQFIB.

2. Абдреев К. А. Вакуумные и элегазовые выключатели как перспектива развития современной высоковольтной энергетики / К.А. Абдреев // Энергетика, управление и автоматизация: инновационные решения проблем : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей Научное издание, Санкт-Петербург, 22 декабря 2022 года / Под общей редакцией Т.Ю. Коротковой, сост. М.С. Липатов, Е.Н. Лашина. – Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", 2023. – С. 225-229. – EDN MDEWGB.

3. Кондрашов, Е. И. Сравнительный анализ элегазовых выключателей / Е. И. Кондрашов, Н. Ю. Шевченко // России – творческую молодёжь : Материалы XV Всероссийской научно-практической студенческой конференции в 4-х томах, Камышин, 20–22 апреля 2022 года / Волгоградский государственный технический университет (Камышинский филиал). Том 4. – Камышин: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 59-61. – EDN PTQQNY.

4. Элегазовые выключатели / А. Д. Ермолаев, П. М. Раздымаха, Л. И. Фомин, В. И. Шаферов // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых- 2021 : Сборник научных статей 10-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 11–12 ноября 2021 года / Отв. редактор А.А. Горохов. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 228-230. – EDN HNWGBN

5. PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers / J.-J. Gonzalez, P. Freton, F. Reichert, A. Petchanka // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43, no. 8. P. 2703–2714. DOI: 10.1109/TPS.2015.2450536

6. Башмаков, Д. А. Повышение надежности ОРУ-110 КВ нч ТЭЦ путем замены маломасляных выключателей на элегазовые / Д. А. Башмаков, З. Г. Сайфутдинов, А. И. Сайфутдинова // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2022. – № 3(92). – С. 6-12. – EDN SKJOVS.

7. Краев, А. А. Применение элегаза в качестве основной изоляции в электрических агрегатах / А. А. Краев // ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА и НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Омск, 09 января 2021 года. – Стерлитамак: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2021. – С. 27-29. – EDN VDSZFW.

8. Ермолин, В. А. Элегазовые выключатели. Обзор рынка / В. А. Ермолин, А. А. Коршунов // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 13. – С. 675-686. – EDN LJFVYL.

9. Шульга, Р. Н. Приводы вакуумных и элегазовых выключателей / Р. Н. Шульга // Энергоэксперт. – 2022. – № 2(82). – С. 36-42. – EDN JDXRCH.

10. Александров, М. А. Мониторинг технического состояния элегазовых выключателей / М. А. Александров // Электроэнергетика : Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Том 3. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. – С. 97. – EDN PCEWTK.

11. Шилов, А. Ю. Повышение надежности работы элегазовых выключателей в условиях экстремально низких температур / А. Ю. Шилов, А. Н. Луценко // Бюллетень научных сообщений. – 2023. – № 28. – С. 71-73. – EDN IWXICZ.

12. Юрьева А.В. Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ПАО "Россети" 28 декабря 2018. Краснодар; 2018. Доступно по http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_1_28.12.2018.pdf Ссылка активна на 14 марта 2024.

13. Беленький Д.М. Оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ОАО "Россети" 15 января 2015. Москва; 2015. Доступно по https://www.consultelectro.ru/normbase/download/Pfyl8AA5xyBBNU6?ysclid=ltrcfn0oo7563176750 Ссылка активна на 14 марта 2024.

14. Григорьева Е.Г. Декларация о соответствии 14 апреля 2017. Москва; 2017. Доступно по https://reestrinform.ru/reestr-declaratcii-sootvetstviia/reg_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html Ссылка активна на 14 марта 2024.

15. Анализ потребления газовых баллонов высокого давления. Москва; 2013. Доступно по http://www.ballon-torg.ru/pressa.html Ссылка активна на 14 марта 2024.

16. Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 5 – Gas Insulated Switchgear (GIS) // CIGRE. – 2012. – pp. 75–87.

17. Callender G., Golosnoy IO., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.

18. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.

Авторы публикации

Заленская Наталия Юрьевна – преподаватель кафедры «Компьютерных технологий и микроэлектронной инженерии» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). Email: zalenskayany@vglta.vrn.ru.

Макаренко Филипп Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). *ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9311-8942* Email: phillipp@mail.ru.

Заревич Антон Иванович – канд. техн. наук, доцент базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). *ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5354-5598* Email: antonzarevich@yandex.ru.

Полуэктов Александр Владимирович – преподаватель базовой кафедры «Технического и программного обеспечения вычислительных и информационных систем» Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г. Ф. Морозова (ВГЛТУ). *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4032-5031* Email: palv2006@yandex.ru.

References

1. Akhatov MM. Dovgii DI., Vysokovol'tnye vyklyuchateli. Elegazovye vyklyuchateli // EurasiaScience : Sbornik statei LVIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 30 dekabrya 2023 goda. – Moskva: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Aktual'nost'.RF", 2023. – S. 149-150. – EDN UXQFIB. (In Russ).

2. Abdreev KA. Vakuumnye i elegazovye vyklyuchateli kak perspektiva razvitiya sovremennoi vysokovol'tnoi energetiki // Energetika, upravlenie i avtomatizatsiya: innovatsionnye resheniya problem : Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii obuchayushchikhsya i prepodavatelei Nauchnoe izdanie, Sankt-Peterburg, 22 dekabrya 2022 goda / Pod obshchei redaktsiei T.Yu. Korotkovoi, sost. M.S. Lipatov, E.N. Lashina. – Sankt-Peterburg: Vysshaya shkola tekhnologii i energetiki federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet promyshlennykh tekhnologii i dizaina", 2023. – S. 225-229. – EDN MDEWGB. (In Russ).

3. Kondrashov EI., Shevchenko NYu. / Sravnitel'nyi analiz elegazovykh vyklyuchatelei // Rossii – tvorcheskuyu molodezh' : Materialy XV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi studencheskoi konferentsii v 4-kh tomakh, Kamyshin, 20–22 aprelya 2022 goda / Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (Kamyshinskii filial). Tom 4. – Kamyshin: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022. – S. 59-61. – EDN PTQQNY. (In Russ).

4. Ermolaev AD., Razdymakha PM., Fomin LI., Shaferov VI. Elegazovye vyklyuchateli / Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchenykh- 2021 : Sbornik nauchnykh statei 10-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii. V 4-kh tomakh, Kursk, 11–12 noyabrya 2021 goda / Otv. redaktor A.A. Gorokhov. Tom 4. – Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2021. – S. 228-230. – EDN HNWGBN. (In Russ).

5. Gonzalez JJ., Freton P., Reichert F., Petchanka A. / PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers / // IEEE Transactions on Plasma Science. 2015. Vol. 43, no. 8. P. 2703–2714. DOI: 10.1109/TPS.2015.2450536

6. Bashmakov DA., Saifutdinov ZG., Saifutdinova AI. / Povyshenie nadezhnosti ORU-110 KV nch TETs putem zameny malomaslyanykh vyklyuchatelei na elegazovye // Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya. – 2022. – № 3(92). – S. 6-12. – EDN SKJOVS. (In Russ).

7. Kraev AA. Primenenie elegaza v kachestve osnovnoi izolyatsii v elektricheskikh agregatakh // PROBLEMY RAZVITIYa TEKhNIChESKOGO POTENTsIALA i NAPRAVLENIYa EGO POVYShENIYa : sbornik statei po itogam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Omsk, 09 yanvarya 2021 goda. – Sterlitamak: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovanii", 2021. – S. 27-29. – EDN VDSZFW. (In Russ).

8. Ermolin VA., Korshunov AA. / Elegazovye vyklyuchateli. Obzor rynka // Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. – 2020. – № 13. – S. 675-686. – EDN LJFVYL. (In Russ).

9. Shul'ga RN. Privody vakuumnykh i elegazovykh vyklyuchatelei / R. N. Shul'ga // Energoekspert. – 2022. – № 2(82). – S. 36-42. – EDN JDXRCH. (In Russ).

10. Aleksandrov MA. Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya elegazovykh vyklyuchatelei // Elektroenergetika : Pyatnadtsataya vserossiiskaya (sed'maya mezhdunarodnaya) nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh: materialy konferentsii. V 6-ti tomakh, Ivanovo, 07–10 aprelya 2020 goda. Tom 3. – Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina, 2020. – S. 97. – EDN PCEWTK. (In Russ).

11. Shilov AYu., Lutsenko AN. / Povyshenie nadezhnosti raboty elegazovykh vyklyuchatelei v usloviyakh ekstremal'no nizkikh temperatur // Byulleten' nauchnykh soobshchenii. – 2023. – № 28. – S. 71-73. – EDN IWXICZ. (In Russ).

12. Yur'eva AV. Oborudovanie, materialy i sistemy, dopushchennye k primeneniyu na ob"ektakh PAO "Rosseti" 28 dekabrya 2018. Krasnodar; 2018. Available at: http://skkpp.ru/wp-content/uploads/2019/02/%D0%90%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F_1_28.12.2018.pdf Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

13. Belen'kii DM. Oborudovanie, materialy i sistemy, dopushchennye k primeneniyu na ob"ektakh OAO "Rosseti" 15 yanvarya 2015. Moskva; 2015. Available at: https://www.consultelectro.ru/normbase/download/Pfyl8AA5xyBBNU6?ysclid=ltrcfn0oo7563176750 Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

14. Grigor'eva EG. Deklaratsiya o sootvetstvii 14 aprelya 2017. Moskva; 2017. Available at: https://reestrinform.ru/reestr-declaratcii-sootvetstviia/reg_number-%D0%A0%D0%9E%D0%A1%D0%A1_DE.%D0%9C%D0%9203.%D0%9400233.html Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

15. Analiz potrebleniya gazovykh ballonov vysokogo davleniya. Moskva; 2013. Available at: http://www.ballon-torg.ru/pressa.html Accessed: 14 March 2024. (In Russ).

16. Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment. Part 5 – Gas Insulated Switchgear (GIS) // CIGRE. – 2012. – pp. 75–87.

17. Callender G., Golosnoy IO., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.

18. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.

Authors of the publication

Natalia Yu. Zalenskaya – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. Email: zalenskayany@vglta.vrn.ru.

Philipp V. Makarenko – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-9311-8942 Email: philipp@mail.ru.

Anton I. Zarevich – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5354-5598 Email: antonzarevich@yandex.ru.
Alexander V. Poluektov – Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VSUFT), Voronezh, Russia. *ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4032-5031* Email: palv2006@yandex.ru.

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

Получено	***16.04.2024 г.***
Отредактировано	***22.05.2024 г.***
Принято	***30.05.2024 г.***

© Аскаров Р.Р., Николаев К.В., Рыжков Д.В., Манахов В.А., Миранов С.Р.

УДК 620.1.05 DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-17-28

РАЗРАБОТКА ТИПОВОГО ПРОЕКТА ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ НА БАЗЕ ИСТОЧНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ АИИ-70

Аскаров Р.Р., Николаев К.В., Рыжков Д.В., Манахов В.А., Миранов С.Р.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
Nikolaev.kv@eltecheva.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ. Целью данной работы является разработка типового проекта установки по испытаниям средств индивидуальной защиты, которая позволяет проводить контроль технического состояния электрозащитных средств. Согласно типовому проекту установка должна быть функциональнее и дешевле существующих аналогов, при этом её конструкция должна полностью соответствовать требованиям нормативно-технической документации (Правила устройства электроустановок, Правила охраны труда при работе в электроустановках). МЕТОДЫ. Согласно разработанному типовому проекту подразумевается использование испытательных аппаратов АИИ-70, которые выведены на хранение вследствие оснащения электротехнических лабораторий более мобильными современными аналогами. Вторичное использование освободившихся от эксплуатационной нагрузки испытательных аппаратов позволяет исключить затраты на приобретение источника высокого напряжения, входящего в его конструкцию, тем самым снизить общую стоимость проекта. Проектом предусмотрено, что в состав материалов из которого собирается установка, входят электротехнические изделия из розничной номенклатуры. РЕЗУЛЬТАТЫ. Установка, собранная по разработанному проекту, обеспечивает возможность проведения наибольшего числа видов испытаний среди аналогов. Стоимость установки собранной по разработанному проекту в несколько раз ниже аналогов. Полное соответствие установки требованиям нормативно-технической документации обеспечивает безопасность проведения высоковольтных испытаний и позволяет зарегистрировать её в надзорных органах. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Стационарная установка по испытаниям средств индивидуальной защиты собрана в Казанском государственном энергетическом университете. Опробование её при испытаниях диэлектрических перчаток и указателя высокого напряжения доказывает работоспособность установки собранной по разработанному проекту.*

Ключевые слова: *типовой проект; охрана труда; опасный производственный фактор; средство индивидуальной защиты; электрозащитное средство; технологическая защита; испытание повышенным напряжением; источник высокого напряжения промышленной частоты; АИИ-70; использование устаревших установок.*

Для цитирования: Аскаров Р.Р., Николаев К.В., Рыжков Д.В., Манахов В.А., Миранов С.Р. Разработка типового проекта испытательной установки диэлектрических средств индивидуальной защиты на базе источника высокого напряжения АИИ-70 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 17-28. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-17-28.

DEVELOPMENT OF A STANDARD DESIGN FOR A TEST INSTALLATION OF DIELECTRIC PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT BASED ON A HIGH VOLTAGE SOURCE AII-70

Askarov R.R., Nikolaev K.V., Ryzhkov D.V., Manakhov V.A., Miranov S.R.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
Nikolaev.kv@eltecheva.ru

Abstract: *TARGET. The purpose of this work is to develop a standard design of an installation for testing personal protective equipment. According to the standard design, the installation should be more functional and cheaper than existing analogues, while its design should fully comply with the requirements of regulatory and technical documentation (Rules for the installation of electrical installations, Rules of labor protection when working in electrical installations). METHODS. According to the developed standard design, it implies the use of АИИ-70 test devices, which have been put into storage as a result of equipping electrical laboratories with more mobile modern analogues. The secondary use of test devices freed from the operational load makes it possible to eliminate the cost of purchasing a high-voltage source included in its design, thereby reducing the total cost of the project. The project provides that the products from which the installation is assembled include products from the retail range of electrical products. RESULTS. The installation, assembled according to the developed project, provides the opportunity to conduct the largest number of types of tests among analogues. The cost of installation assembled according to the developed project is several times lower than analogues. Full compliance of the installation with the requirements of regulatory and technical documentation ensures the safety of high-voltage tests and allows it to be registered with supervisory authorities. CONCLUSION. A stationary installation for testing personal protective equipment has been assembled at the Kazan State Energy University. Testing it during tests of dielectric gloves and a high voltage indicator proves the operability of the installation assembled according to the developed project.*

Keywords*: standard design; occupational safety; hazardous production factor; personal protective equipment; electrical protective equipment; technological protection; high voltage test; industrial frequency high voltage source; АИИ-70; the use of outdated installations.*

For citation: Askarov R.R., Nikolaev K.V., Ryzhkov D.V., Manakhov V.A., Miranov S.R. Development of a standard design for a test installation of dielectric personal protective equipment based on a high voltage source AII-70. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 17-28. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-17-28.

Введение (*Introduction)*

Цель работы заключается в разработке типового проекта специальной установки по испытаниям средств индивидуальной защиты при работе в электроустановках. В статье описан обзор нормативно-технической литературы, проведённый для выявления обязательных требований к конструкции разрабатываемой установки, а также проведено изучение характеристик аналогов.

Основная практическая значимость работы заключается в том, что электроэнергетические организации или организации, оказывающие услуги по испытаниям и измерениям, по типовому проекту смогут самостоятельно собирать безопасные, функциональные и надёжные установки по испытаниям средств индивидуальной защиты в прямоугольных помещениях малой площади (до 5 м^2) с использованием материалов

невысокой стоимости. Наличие такой установки непосредственно на предприятии помогает снизить финансовые и временные затраты на проведении испытаний электрозащитных средств в сторонних организациях. Второстепенная практическая значимость работы заключается в решении проблемы утилизации работающих устаревших испытательных установок типа АИИ-70.

Установка, собранная по разработанному типовому проекту, имеет преимущества перед существующими аналогами, однако для её монтажа предприятие должно иметь на хранении работоспособный испытательный аппарат тапа АИИ-70.

Литературный обзор *(Literature Review)*

Персонал, обслуживающий и ремонтирующий электроустановки, во время работы может быть подвергнут воздействию опасного производственного фактора – протекание электрического тока через тело [1]. По всему миру разрабатываются решения, направленные на исключение рисков электротравматизма, но проблема осталась по настоящее время [2-4]. Пока идёт поиск пути к полному отсутствию электротравм, предприятия действуют согласно популярной стратегии обеспечении электробезопасности персонала – проводят только обязательные мероприятия перед началом и во время работ в электроустановках, часть которых представлена в таблице №1 [5].

Таблица 1

Table 1

Обязательные мероприятия перед началом и во время работ в электроустановках

Mandatory measures before and during work in electrical installations

1. Оформление работ нарядом-допуском или распоряжением; 2. Проведение инструктажей, наличие наблюдающего при проведении работ; 3. Сохранение режима труда и отдыха.	1. Отключение электроустановки перед проведением работ; 2. Заземление токоведущих частей отключённой электроустановки, визуальная проверка срабатывания механических блокировок; 3. Подготовка рабочего места с размещением плакатов безопасности, на коммутационных аппаратах отключённой электроустановки и непосредственно на рабочем месте. 4. Использование средств индивидуальной защиты

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

С целью сокращения случаев электротравматизма на производстве в отраслевую нормативно-техническую документацию по охране труда регулярно вводятся изменения [6]. Для обеспечения безопасности на конкретных рабочих местах разрабатывают подробные инструкции по охране труда и более того, эксперты в области обеспечения безопасности труда разрабатывают методические рекомендации по написанию таких инструкций [7]. И даже при непрерывном совершенствовании средств организационных мероприятий обеспечения безопасности без внимания не остаются технические мероприятия обеспечения безопасности.

В статье уделим внимание одному техническому мероприятию из таблицы №1 – использованию средств индивидуальной защиты (далее СИЗ). Использование СИЗ существенно снижает риск травматизма при работе в электроустановках до и выше 1000 В, именно поэтому ведётся разработка СИЗ из новых материалов, внедряются системы контроля использования СИЗ работниками и т.п. [8].

Особенности применения средств индивидуальной защиты при работе в электроустановках изучаются студентами профильных учебных заведений задолго до того, как они приступят к самостоятельной работе [9]. Нормативно-технической документацией (далее НТД) определены работы, при которых обязательно использование индивидуальных электрозащитных средств: диэлектрических перчаток, галош и ботов, оперативных и разрядных штанг, указателей низкого и высокого напряжения, электроизолирующего инструмента и других [10]. Также обучающимся рассказывают о не только о применении

СИЗ, но и о необходимости периодических испытаний с целью проверки их исправности [11]. Много лет используется в энергетике документ, который определяет классификацию электрозащитных средств, порядок хранения и общие правила пользования ими, нормирует учет и контроль за их состоянием, а также содержит обязательные технические требования к СИЗ и общие правила их испытаний. Испытания индивидуальных электрозащитных средств периодически проводят с целью проверки их пригодности к эксплуатации, потому что во время хранения, даже в подготовленном для этого помещении, диэлектрический материал подвергается воздействиям окружающей среды, которые снижают его электрическую прочность, а во время работы и транспортировки электрозащитных средства могут получить не обнаруживаемые визуальным способом механические повреждения, что также отрицательно влияет на электрическую прочность [12].

Для испытаний СИЗ повышенным напряжением необходима специальная стационарная высоковольтная установка, которая позволит реализовать методики испытаний, изложенные в нормативной-технической документации, и обеспечит безопасность оператора испытаний.

Обобщив требования нормативно-технической документации к установкам по испытаниям средств индивидуальной защиты для испытаний большей части электрозащитных средств, сформирована функциональная схема, представленная на рисунке 1.

Рис. 1. Функциональная схема УИСИЗ

Fig. 1. Functional diagram of the installation for testing personal protective equipment

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

Конструктивно установку можно разделить на три части: высоковольтная часть, технологическая защита, источник испытательного напряжения.

Источник испытательного напряжения – аппарат заводского исполнения, который состоит из регулировочного трансформатора, силового повышающего трансформатора, аппаратов защиты испытательных цепей и органов управления и измерительных приборов.

Технологическая защита – совокупность электромеханических и электронных аппаратов, обеспечивающих немедленное отключение высокого испытательного напряжения при открывании двери входа в высоковольтную зону. Также выполняет функции сигнализации открытия двери, включения УИСИЗ и подачи высокого напряжения.

Высоковольтная зона – часть помещения, отделённая прочным металлическим ограждением, в которой располагаются изолированный от пола или стен держатель штанг и указателей высокого напряжения, а также конструкция для проведения испытаний электроизолирующего инструмента, перчаток, галош и бот, типовая схема которой

представлена на рисунке 2. Ограждение высоковольтной зоны заземлено согласно требованиям НТД [13].

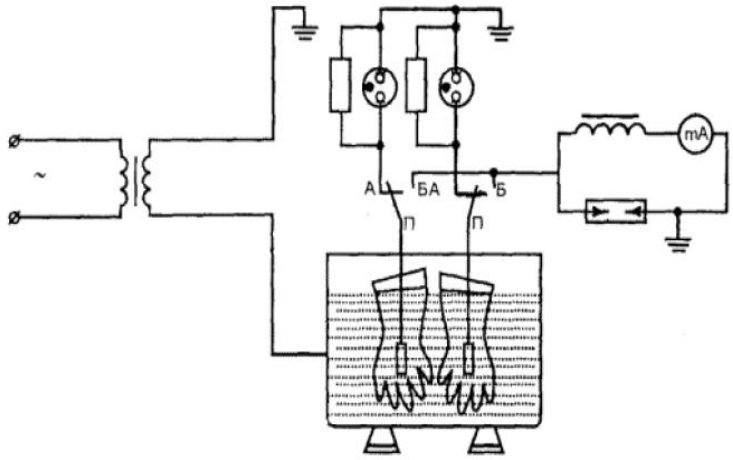


Рис. 2. Типовая схема конструкции для испытания СИЗ

Fig.2. Typical design scheme for testing personal protective equipment

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

***Материалы и методы** (Materials and methods)*

На рынке электротехнического оборудования продаются части установок по испытаниям средств индивидуальной защиты (далее УИСИЗ), а также предлагаются услуги по монтажу УИСИЗ «под ключ», но стоимости таких услуг и товаров высокие. На весну 2024 года стоимость УИСИЗ «под ключ» варьируется от 700 до 1 100 тысяч рублей. Большую часть стоимости составляет цена источника высокого напряжения – около 40 %. Сейчас производители испытательного оборудования изготавливают мобильные эргономичные установки, которые вытеснили из эксплуатации крупногабаритный АИИ-70, при этом у многих предприятий остались работоспособные неиспользуемые ныне аппараты. Разработанный типовой проект позволяет снизить стоимость УИСИЗ, подразумевая использование АИИ-70, находящихся на хранении. Остальные конструктивные части УИСИЗ собраны из изделий и материалов доступных в розничной закупке, такое решение по проекту позволяет избежать проблем с поставкой комплектующих при монтаже установки.

Далее подробно рассмотрим каждую конструктивную часть разработанного типового проекта УИСИЗ подробно.

Критерии выбора источника высокого напряжения и сравнения аналогов представлены в таблице № 2.

Таблица 2
Table 2

Сравнение источников высокого напряжения
Comparison of high voltage sources

Критерии	Наименование испытательного аппарата			
	АИИ-70	АИД-70Ц	СКАТ-70Ц	АИСТ-50/70
Форма напряжения	Переменное	Переменное Постоянное	Переменное Постоянное	Переменное Постоянное
Диапазон контроля напряжения, кВ	2 – 50	АС 2 – 50 DC 2 – 70	АС 2 – 50 DC 3 – 70	АС 1 – 50 DC 2 – 70

Регулирование напряжения	Механическое непрерывное	Цифровое ступенчатое	Цифровое ступенчатое	Цифровое ступенчатое
Максимальная мощность, кВА	2	0,6	2,7	2,5
Наличие миллиамперметра	Нет	Есть	Есть	Есть
Масса, кг	50	54	43	55
Стоимость, тыс. руб.	Снят с производства; считаем, что находится на хранении	471	432	444

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

Отметим, что АИИ-70 для задачи испытания СИЗ подходит несмотря на то, что уступает аналогам по некоторым критериям. Главное преимущество его использования, это его наличие на хранении у многих предприятий, что означает отсутствие затрат на покупку испытательного аппарата. Отсутствие амперметра восполняется его самостоятельной установкой, как показано на рисунке 3. Работоспособный АИИ-70 переместили в аудиторию, где сейчас находится УИСИЗ. В ходе осмотра источника высокого напряжения были обнаружены локальные разрушения изоляции и незакрепленные должным образом контакты, которые могут стать причинами электротравматизма и пожара [14]. С целью повышения надёжности эксплуатации АИИ-70, обеспечения пожарной и электрической безопасности проведены работы по восстановлению прибора: заменена его старая внутренняя алюминиевая проводка на новую медную, очищен от масляных и пылевых загрязнений корпус и повышающий трансформатор, смазаны вращающиеся детали регулировочного автотрансформатора, установили новые предохранители цепей питания [15].

Рис. 3. Установка миллиамперметра в приборную панель АИИ-70

Fig. 3. Installation of a milliammeter in the AII-70 dashboard

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

Каркас ограждения высоковольтной зоны собирается из труб квадратного сечения 20х20х1,5, между собой трубы скрепляются сварными швами, затем к каркасу привариваются «3D панели» или сетка Рабица. Внутрь высоковольтной зоны помещаются ванна моечная из нержавеющей стали, установленная на опорные литые изоляторы ИОЛ-10, изоляторы того же типа устанавливаются для опоры реек крепления держателей СИЗ (рис. 4.). Над ванной устанавливается панель с газоразрядными лампами индикации пробоя.

Рис. 4. Ванна для испытания перчаток, галош, бот и других СИЗ

Fig. 4. Bath for testing gloves, galoshes, boots and other personal protective equipment

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

Для испытания штанг и указателей высокого напряжения в высоковольтной зоне на стене закрепляется траверса, к которой прикрепляется полимерный изолятор на номинальное напряжение 35 кВ в нижней части изолятора размещается струбцина для захвата рабочих частей объектов испытания (рис. 5).

Рис. 5. Крепление для испытания штанг и указателей высокого напряжения

Fig. 5. Mounting for testing rods and high voltage indicators

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

Опорная изоляция крепления объектов испытания выбрана с учётом продолжительности и величины прилагаемого напряжения.

Технологическая защита согласно НТД выполнена в металлическом щите, закреплённом на каркасе ограждения высоковольтной зоны, в её состав входят семь устройств: держатель плавких вставок, кнопка «Стоп» (SB3), кнопка «Пуск» (SB2), концевой выключатель (SQ1), контактор (KM), звукоизвещатель, кнопка размыкания заземляющего ножа (SB1). Технологическая защита, собранная по схеме, представленной на рисунке 6, она защитит оператора испытаний и иной персонал в помещении УИСИЗ, отключив питание установки при открывании двери высоковольтной зоны во время испытания и подав питание на звукоизвещатель. Ключевой особенностью технологической защиты описываемого типового проекта это использование световых сигналов, уже встроенных в АИИ-70 [16].

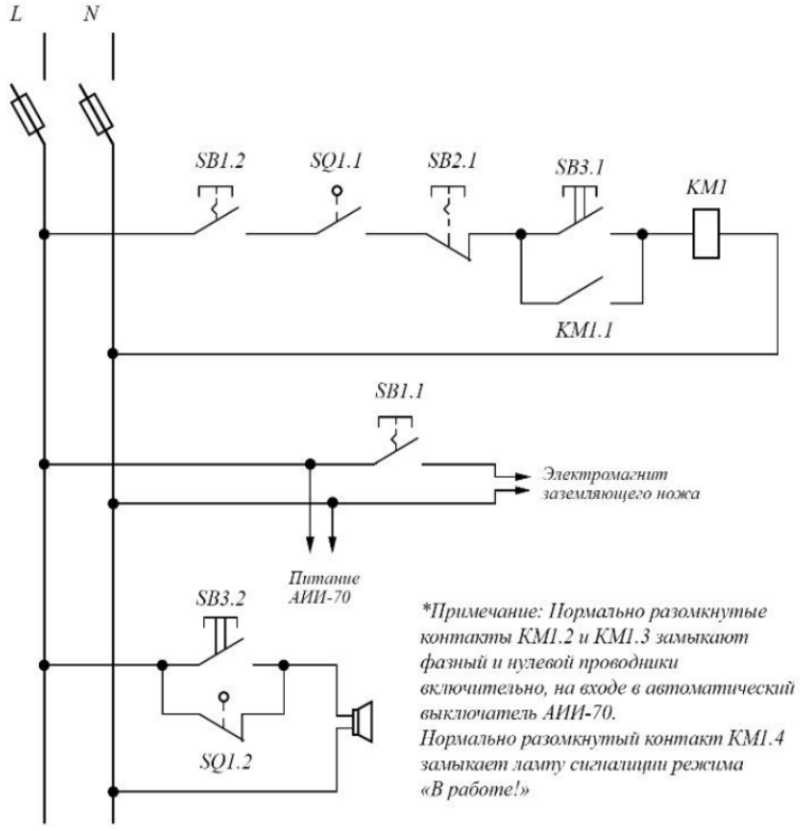


Рис. 6. Принципиальная схема технологической защиты УИСИЗ

Fig. 6. Schematic diagram of the technological protection of the installation for testing personal protective equipment

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

Проект смонтирован на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и опробован при испытании диэлектрических перчаток и указателя высокого напряжения для работы в электроустановках напряжением не более 15 кВ.

Затем провели установку всех трёх конструктивных частей по разработанному проекту и провели пробный запуск УИСИЗ на холостом ходу, а позже провели испытания перчаток и указателя высокого напряжения.

***Результаты** (Results)*

Проведём анализ разработанного проекта по критериям и характеристикам, сведённым в таблице №3.

Разработанный типовой проект имеет явные преимущества по функциональности и стоимости, но отмечается, что его реализация потребует больше времени и возможна только при наличии, находящегося на хранении у предприятия АИИ-70. Проект является типовым так как может быть реализован на любом предприятии при соблюдении вышеизложенных условий.

В результате опробования УИСИЗ в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» разработанный проект признан успешным и может быть тиражирован на предприятиях.

Таблица 3
Table 3

Аналоги УИСИЗ на рынке электротехнического оборудования
UISIZ analogs on the market of electrical equipment

Критерии		Наименование установки по испытаниям средств индивидуальной защиты		
		Разработанный типовой проект	СКАТ-70П + СКАТ-70М	АИСТ 50/70 СИЗ
Возможность испытаний электроизолирующих средств	Перчатки	Да	Да	Да
	Боты и галоши	Да	Да	Да
	Указатели низкого напряжения	Да	Нет	Нет
	Штанги разрядные и оперативные	Да	Нет	Нет
	Электро-изолирующий инструмент	Да	Нет	Нет
	Указатели высокого напряжения	Да	Нет	Нет
Временные затраты на монтаж		~21 день	1 день	1 день
Объём работ по монтажу устройств и конструкций, не входящих в комплект поставки		–	Установка ограждения и сигнализации (~5 дней)	Установка ограждения и сигнализации (~5 дней)
Стоимость, тыс. руб.		150, при наличии АИИ-70	630	1 110

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

***Заключение** (Conclusions)*

В рамках проведённой работы цель «разработать типовой проект специальной установки по испытаниям средств индивидуальной защиты при работе в электроустановках» успешно достигнута.

Использование предложенной установки поможет экономить предприятиям финансы и временные затраты на испытаниях электрозащитных средств.

Разработанный проект позволит предприятиям вновь использовать устаревшие установки АИИ-70, а не закупать для строительства установки по испытаниям средств индивидуальной защиты новую дорогостоящую высоковольтную испытательную установку.

Литература

1. Сидоров А. И. О статистике электротравматизма // XXI век. Техносферная безопасность. 2021. №2 (22).

2. Балаганский Андрей Олегович, Захаренко Сергей Геннадьевич, Малахова Татьяна Федоровна, Захаров Сергей Александрович Электробезопасность в низковольтных сетях и её оценка evaluation of electrical safety in low voltage networks // Вестник КузГТУ. 2017. №1 (118).

3. Bernal E., Arnoldo B. D. Electrical injuries // Total burn care. – Elsevier, 2018. – pp. 396-402. e2.

4. Охрана труда на малых и средних предприятиях / О. В. Чернышенко, И. А. Занина, А. П. Сидоренко, Е. И. Костромина // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2(41). – С. 49. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3643.

5. Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации "Об

утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок" от 15.12.2020 № 903н // Минтруд России. [Электронный ресурс]. URL: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1816. 2020 г. с изм. и допол. в ред. от 29.04.2022.

6. Балаков Юрий Николаевич Сравнительный анализ новых Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок и действующих Межотраслевых Правил по охране труда (Правил безопасности) при эксплуатации электроустановок // Энергобезопасность и энергосбережение. 2013. №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-novyh-pravil-po-ohrane-truda-pri-ekspluatatsii-elektroustanovok-i-deystvuyuschih-mezhotraslevyh-pravil-po-ohrane (дата обращения: 11.08.2024).

7. Толмачев Владимир Демьянович Методические рекомендации для разработки инструкции по охране труда для электротехнического и электротехнологического персонала // Энергобезопасность и энергосбережение. 2006. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-rekomendatsii-dlya-razrabotki-instruktsii-po-ohrane-truda-dlya-elektrotehnicheskogo-i-elektrotehnologicheskogo (дата обращения: 11.08.2024).

8. Костюков Александр Владимирович ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВ ПРЕДПРИЯТИЙ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. №10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-bezopasnyh-usloviy-truda-rabotnikov-energeticheskih-hozyaystv-predpriyatiy (дата обращения: 11.08.2024).

9. Касимов, Н. С. Электробезопасность на производстве / Н. С. Касимов // Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире : Сборник материалов XI-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Мирный, 07–08 апреля 2022 года / Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова. – Мирный: ООО "Издательство "Спутник+", 2022. – С. 102-105. – EDN BFVNPK.

10. Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. СО 153-34.03.603-2003. "Библиотека инженера по охране труда", №3, 2004.

11. Челноков, И. В. Применение и испытание средств защиты, используемых в электроустановках / И. В. Челноков // Проблемы и основные направления развития высшего технического образования : Сборник статей VIII межвузовской международной студенческой конференции, Воронеж, 30 января 2022 года. – Воронеж: филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Ростовский государственный университет путей сообщения" в г. Воронеж, 2022. – С. 201-203. – EDN WRGTJG.

12. Кубрак М.В. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. №14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispytaniya-elektricheskoy-prochnosti-dielektricheskih-materialov-i-izdeliy (дата обращения: 11.08.2024).

13. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Седьмое издание. Раздел 1. Общие правила. Глава 1.8. Заземление и защитные меры электробезопасности (утв. Приказом Минэнерго РФ от 08.07.02 № 204).

14. Ерашова Ю.Н., Ившин И.В., Ившин И.И., Тюрин А.Н. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):168-180. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180.

15. С. Р. Миранов, С. Т. Жалмаганбетова, Е. А. Черноволенко, К. В. Николаев Проектирование технологической защиты высоковольтной зоны установки по испытаниям средств индивидуальной защиты // Проблемы и перспективы развития электроэнергетикии электротехники. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023.

16. С. Р. Миранов, С. Т. Жалмаганбетова, Е. А. Черноволенко, К. В. Николаев Восстановление аппарата АИИ-70 и подготовка его к включению в установку испытания СИЗ // Проблемы и перспективы развития электроэнергетикии электротехники. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023.

© Аскаров Р.Р., Николаев К.В., Рыжков Д.В., Манахов В.А., Миранов С.Р.

Авторы публикации

Аскаров Рафаэль Рафильевич – доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», заведующий электроизмерительной лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Николаев Кирилл Валерьевич – ассистент кафедры «Теоретические основы электротехники», инженер электроизмерительной лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Рыжков Денис Витальевич – доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», инженер электроизмерительной лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Манахов Валерий Александрович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «КГЭУ».

Миранов Салих Ришадович – лаборант электроизмерительной лаборатории ФГБОУ ВО «КГЭУ».

References

1. Sidorov A. I. On the statistics of electrotraumatism // XXI century. Technosphere safety. 2021. №2 (22).

2. Balagansky Andrey Olegovich, Zakharenko Sergey Gennadievich, Malakhova Tatyana Fedorovna, Zakharov Sergey Alexandrovich Electrical safety in low-voltage networks and its assessment of the assessment of electrical safety in low voltage networks // Bulletin of KuzSTU. 2017. №1 (118).

3. Bernal E., Arnoldo B. D. Electrical injuries // Total burn care. – Elsevier, 2018. – pp. 396-402. e2.

4. Labor protection at small and medium-sized enterprises / O. V. Chernyshenko, I. A. Zanina, A. P. Sidorenko, E. I. Kostromina // Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – № 2(41). – P. 49. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3643

5. Order of the Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation "On approval of the Rules on labor protection during operation of electrical installations" dated 12/15/2020 No. 903n // Ministry of Labor of the Russian Federation. [electronic resource]. URL: https://mintrud.gov.ru/docs/mintrud/orders/1816 . 2020 with amendments and additions. ed. dated 04/29/2022.

6. Balakov Yuri Nikolaevich Comparative analysis of new Rules on labor protection during operation of electrical installations and existing Intersectoral Rules on labor protection (Safety rules) during operation of electrical installations // Energy security and energy saving. 2013. No.6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-novyh-pravil-po-ohrane-truda-pri-ekspluatatsii-elektroustanovok-i-deystvuyuschih-mezhotraslevyh-pravil-po-ohrane (date of application: 08/11/2024).

7. Tolmachev Vladimir Demyanovich Methodological recommendations for the development of occupational safety instructions for electrical and electrotechnological personnel // Energy security and energy conservation. 2006. No.1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-rekomendatsii-dlya-razrabotki-instruktsii-po-ohrane-truda-dlya-elektrotehnicheskogo-i-elektrotehnologicheskogo (date of application: 08/11/2024).

8. Kostyukov Alexander Vladimirovich ENSURING SAFE WORKING CONDITIONS FOR EMPLOYEES OF ENERGY FARMS OF ENTERPRISES // Izvestiya TulSU. Technical sciences. 2021. No.10. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-bezopasnyh-usloviy-truda-rabotnikov-energeticheskih-hozyaystv-predpriyatiy (date of application: 08/11/2024).

9. Kasimov, N. S. Electrical safety at work / N. S. Kasimov // Youth and scientific and technical progress in the modern world : A collection of materials of the XI-th All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists, Mirny, 07-08 April 2022 / Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. – Mirny: Sputnik+ Publishing House, LLC, 2022. – pp. 102-105. – EDN BFVNPK.

10. Instructions for the use and testing of protective equipment used in electrical installations. From 153-34.03.603-2003. "Library of an occupational safety engineer", No.3, 2004.

11. Chelnokov, I. V. Application and testing of protective equipment used in electrical installations / I. V. Chelnokov // Problems and main directions of development of higher technical education : Collection of articles of the VIII interuniversity International Student Conference, Voronezh, January 30, 2022. – Voronezh: branch of the Federal State budgetary educational institution of higher education "Rostov State University of Railway Engineering" in Voronezh, 2022. – pp. 201-203. – EDN WRGTJG.

12. Kubrak M.V. TESTS OF ELECTRICAL STRENGTH OF DIELECTRIC MATERIALS AND PRODUCTS // Actual problems of aviation and cosmonautics. 2018. No.14. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ispytaniya-elektricheskoy-prochnosti-dielektricheskih-materialov-i-izdeliy (date of application: 08/11/2024).

13. Rules for the installation of electrical installations (PUE). Seventh edition. Section 1. General rules. Chapter 1.8. Grounding and protective measures of electrical safety (approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 08.07.02 No. 204).

14. Yerashova Yu.N., Ivshin I.V., Ivshin I.I., Tyurin A.N. Tests of the protection device against arc breakdown and spark gaps for operation. News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2021;23(3):168-180. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180

15. S. R. Miranov, S. T. Zhalmaganbetova, E. A. Chernovolenko, K. V. Nikolaev Design of technological protection of the high-voltage zone of the installation for testing personal protective equipment // Problems and prospects of development of electric power engineering and electrical engineering. Kazan: Kazan State Energy University, 2023.

16. S. R. Miranov, S. T. Zhalmaganbetova, E. A. Chernovolenko, K. V. Nikolaev Restoration of the AII-70 apparatus and its preparation for inclusion in the installation of PPE testing // Problems and prospects of development of electric power engineering and electrical engineering. Kazan: Kazan State Energy University, 2023.

Authors of the publication

Rafael R. Askarov **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Kirill V. Nikolaev **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Denis V. Ryzhkov **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Valeriy A. Manakhov **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Salih R. Miranov **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Получено ***31.05.2024 г.***

Отредактировано ***17.06.2024 г.***

Принято ***29.06.2024 г.***

© Чанчина В.Е., Кондратьев А.Е., Анцупов Н.А.

(cc) BY

УДК 620.164.3 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-29-40**

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛН ЛЭМБА СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА С КАЛЬЦИЕВЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Чанчина В.Е., Кондратьев А.Е., Анцупов Н.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
veronika.zaharova.95@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ данной работы заключается в изучении влияния кальциевого отложения различной толщины на внутренних поверхностях трубы на характеристики ее собственных колебаний. ЦЕЛЬ работы: построить математическую модель стальной трубы без отложений и с кальциевыми наслоениями различной толщины на ее внутренних поверхностях, провести модальный анализ ее собственных колебаний с учетом заданных критериев. Теоретически обосновать зависимость изменения частоты колебаний трубы под воздействием налета. МЕТОДЫ. В работе рассмотрен метод анализа собственных частот трубы с использованием акустического метода неразрушающего контроля, поскольку он допускает односторонний доступ и не нарушает герметичность контролируемого объекта. Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования в программном обеспечении для конечных элементов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Описана актуальность темы, представлены основные методы неразрушающего контроля и дано определение волнам Лэмба. Построена математическая модель участка стальной трубы без внутренних отложений и с кальциевыми наслоениями 5 различных толщин. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты вычислений показали, что собственные частоты колебаний трубы без наслоений и с кальциевыми отложениями изменяются в направлении увеличения значения, прирост частот происходит волнами. Наибольшее значение частоты достигается при моделировании налета кальция толщиной 10 мм на стенах трубы.*

Ключевые слова: *трубопровод; модальный анализ; расчет собственные колебания; исследование частоты колебания трубопровода.*

Для цитирования: Чанчина В.Е., Кондратьев А.Е., Анцупов Н.А. Модальный анализ волн Лэмба стального трубопровода с кальциевыми отложениями // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-29-40.

MODAL ANALYSIS OF LAMB WAVES OF STEEL PIPELINE WITH CALCIUM DEPOSITS

Chanchina V.E., Kondratiev A.E., Antsupov N.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
veronika.zaharova.95@mail.ru

Abstract: *The relevance of the work lies in the study of the effect of calcium deposits of various thicknesses on the inner walls of the pipeline on the parameters of its own vibrations. OBJECTIVE: To construct a mathematical model of a steel pipeline without deposits and with calcium deposits of various thicknesses on its inner walls. To perform a modal analysis of the natural vibrations of the steel pipeline. Theoretically confirm the dependence of the change in the oscillation frequency of the pipeline when exposed to sediments. METHODS. The paper highlights a method for analyzing the natural frequencies of the pipeline using the acoustic method of non-destructive testing, since it can be implemented with one-way access and does not violate the integrity of the object of control. In solving this problem, the method of mathematical analysis in the software package of finite element analysis was used. results. The article describes the relevance of the topic, discusses the main methods of non-destructive testing, and defines Lamb waves. A mathematical model of a steel pipeline section without*

internal deposits and with calcium deposits of 5 different thicknesses has been constructed. CONCLUSION. Calculations have shown that the natural vibration frequencies of the pipeline without deposits and with calcium deposits change in the direction of increasing values, the frequency increase occurs in waves. The highest frequency values are obtained when modeling calcium deposits with a thickness of 10 mm on the walls of the pipeline.

***Keywords**: pipeline; modal analysis; calculation of natural oscillations; investigation of pipeline oscillation frequency.*

For citation: Chanchina V.E., Kondratiev A.E., Antsupov N.A. Modal analysis of Lamb waves of steel pipeline with calcium deposits. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-29-40.

Введение (*Introduction)*

Цель данного исследования заключается в создании математической модели стального трубопровода, которая будет учитывать наличие кальциевого налета на его внутренних поверхностях. Также планируется провести модальный анализ колебаний данного трубопровода с учетом различных толщин кальциевого наслоения.

Научная ценность исследования заключается в теоретическом обосновании зависимости колебаний трубопровода от наличия на его внутренних поверхностях кальциевого слоя.

Практическая ценность работы заключается в выявлении взаимосвязи между степенью влияния наслоения кальция и колебаний трубопровода и его толщиной. Это может значительно повысить точность вибрационной диагностики трубопроводных систем в энергетике, упростить организацию этих работ и позволить прогнозировать долгосрочные вероятности эксплуатации трубопроводов с учетом наличия кальциевого налета.

Полученные результаты анализа могут быть использованы для оценки динамических характеристик трубопровода и разработки мер по улучшению его работы. В частности, результаты могут помочь определить оптимальные параметры работы трубопровода, такие как скорость потока жидкости или газа, а также разработать методы снижения нежелательных колебаний и повышения устойчивости работы. Кроме того, результаты анализа могут быть использованы для выбора материалов и конструкций трубопровода, которые обеспечат его надежную и эффективную работу в условиях образования кальциевого отложения.

Литературный обзор (*Literature Review)*

Трубопроводный транспорт играет ключевую роль в экономике Российской Федерации, являясь основным и наиболее эффективным способом транспортировки жидкостей. Благодаря трубопроводам обеспечивается доступ к воде для населения и промышленных предприятий, отвод промышленных и бытовых сточных вод, передача теплоносителя и транспортировка различных жидкостей, включая нефть. Таким образом, значимость трубопроводной системы в России трудно переоценить.

Во-первых, трубопроводный транспорт обеспечивает надежное и бесперебойное снабжение водой, что является основой для поддержания жизнедеятельности населения и функционирования промышленных предприятий. Вода необходима для различных процессов, таких как производство, сельское хозяйство и бытовые нужды.

Во-вторых, трубопроводный транспорт также используется для отвода промышленных и бытовых стоков. Он позволяет предотвратить загрязнение окружающей среды за счет эффективного и безопасного перемещения жидкостей и газов. Также трубопроводный транспорт помогает сохранить природные ресурсы, так как он требует меньше ресурсов для своей работы по сравнению с другими видами транспорта. Это включает такие ресурсы, как топливо, энергия и материалы. Кроме того, трубопроводный транспорт не создает шума и вибрации, которые могут негативно влиять на окружающую среду. В целом, трубопроводный транспорт является экологически устойчивым и безопасным способом перемещения жидкостей и газов, который помогает сохранить окружающую среду и природные ресурсы.

В-третьих, трубопроводы используются для передачи теплоносителя, такого как пар или горячая вода, для обеспечения теплом жилых и промышленных объектов. Это обеспечивает комфорт и эффективность использования энергии.

Наконец, трубопроводы играют ключевую роль в транспортировке различных

жидкостей, таких как нефть и природный газ, на большие расстояния. Это обеспечивает доступ к источникам энергии, необходимым для экономического развития и повышения уровня жизни населения [1].

Для обеспечения водой энергетических объектов используются природные источники, расположенные на поверхности земли (реки, озера, пруды и т. д.) и под землей (артезианские скважины). Эти источники представляют собой сложный динамический эколого-химический механизм, который содержит газы, минеральные и органические вещества в различных состояниях: молекулярном, растворенном, коллоидном и взвешенном [2]. В процессе использования теплотехнического оборудования сохранившиеся содержания вышеуказанных веществ провоцируют вопрос ухудшения процесса теплообмена, и, как результат, существенное снижение эффективности работы данной системы. Обрастание систем отопления отложениями влечет к спаду температуры, и, соответственно, вызывает увеличение энергетических затрат. Пропускная способность составляющих системы отопления падает, таким образом, расход воды снижается, ввиду чего скорость движения теплоносителя в системе отопления и режим течения жидкости в системе меняются [3-4].

В двухтрубной системе отопления, при равномерном образовании отложений внутри трубопровода и одновременном уменьшении его диаметра на 1 мм, расход теплоносителя в системе снижается на 10%. Это может привести к снижению эффективности системы отопления и увеличению затрат на ее эксплуатацию. Если же диаметр трубопровода уменьшится на 2 мм, то расход теплоносителя снизится уже на 22%, что может вызвать серьезные проблемы в работе системы отопления [5].

Одним из наиболее распространенных видов отложений, которые образуются на поверхностях нагрева в системах отопления, является накипь. Основу накипи составляет карбонат кальция, поэтому при использовании стальных трубопроводов в жилищно-коммунальном хозяйстве возможно повышенное образование накипи в этих трубах. Обеспечение надежной и эффективной эксплуатации этих трубопроводов является актуальной научной и практической задачей.

Повышение эксплуатационной надежности трубопроводов может быть достигнуто за счет применения новых материалов и технологий, а также совершенствования методов контроля и диагностики состояния трубопроводов. Кроме того, важным направлением является разработка методов и средств предотвращения образования отложений и удаления уже существующих отложений.

Важной составляющей повышения эффективности работы систем отопления является также оптимизация режимов их работы. Это включает в себя как оптимизацию параметров работы самих систем, так и выбор оптимальных режимов их эксплуатации.

Таким образом, повышение эксплуатационной надежности и эффективности работы систем отопления требует комплексного подхода, включающего как разработку новых технологий и материалов, так и совершенствование методов управления и контроля. Согласно ГОСТ 18353-79 в зависимости от особенностей используемого индикатора состояния (магнитное поле, рентгеновское излучение, проникающие вещества), выделяют следующие методы неразрушающего контроля, которые позволяют выявлять как наружные, так и внутренние дефекты. Основным критерием для классификации методов неразрушающего контроля (НК) являются физические принципы взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом. С точки зрения физики, лежащей в основе каждого из них, можно выделить следующие типы.

1. Электромагнитный метод, который работает на основе взаимодействия электромагнитного поля с исследуемым объектом или анализа электромагнитного поля, генерируемого объектом. Например, когда на объект подается электрическое напряжение, в местах дефекта регистрируется снижение напряжения, что помогает определить характер и размер повреждения.

2. Метод радиоволн, который используется для объектов, пропускающих радиоволны. Данные о дефектах получаются путем измерения изменений показателей радиоволн, взаимодействующих со сварочным швом.

3. Метод теплового контроля, основанный на активном виде контроля тепла, в котором исследуемый объект подвергается воздействию теплового излучения, регистрируемого датчиком. Повышенная или пониженная температура в определенных местах сварного шва свидетельствует о наличии дефектов. Этот метод применяется для обнаружения нарушений целостности (поры, расслоения, шлаковые включения) в сварочном шве, а также локализации проблемных областей в его структуре и определения

физико-химических характеристик материала.

4. Метод радиационного (радиографического) контроля, который работает следующим образом: радиоактивное излучение проходит через объект, и в местах дефектов оно поглощается больше, поэтому на специальной пленке они проявляются в виде светлых пятен. Существует несколько видов теплового контроля, наиболее распространенными из которых являются рентгенографический контроль, рентгеноскопия и методы гамма-излучения. Этот метод неразрушающего контроля широко применим, так как позволяет обнаруживать дефекты на всей протяженности объекта и предоставляет информацию об их свойствах, размерах и местоположении.

5. Виброакустический метод, в котором используются инфразвуковые, звуковые или ультразвуковые волны, воздействующие на объект или генерируемые в объекте. Он позволяет обнаруживать даже самые маленькие повреждения стенок трубопровода и может заменить радиографический метод при исследовании, например, углов трубопровода.

Анализ существующих методов контроля показывает, что для решения перечисленных задач наиболее подходящим является виброакустический метод неразрушающего контроля. Он обладает рядом преимуществ, включая возможность одностороннего доступа к объекту контроля без его разрушения [6].

В данной работе рассмотрен виброакустический метод колебаний, как один из способов технической диагностики энергетических трубопроводов. Этот метод неразрушающего контроля основан на использовании механических колебаний и волн любой частоты для обнаружения дефектов внутри исследуемого объекта без его разрушения. В процессе контроля создаются вибрационные колебания внутри объекта и анализируются их характеристики на заданном расстоянии от источника колебаний. Собственные колебания объекта предоставляют наиболее информативные данные, и их частота определяется свойствами исследуемого объекта.

В жидкости и газах могут распространяться только продольные механические волны. Это значит, что частицы среды в таких волнах колеблются вперед и назад вдоль направления распространения волны. Продольные волны являются наиболее распространенным типом волн, обнаруживаемым в жидкостях и газах.

Однако в твердых телах, помимо продольных, существуют еще и поперечные механические волны. Здесь частицы среды совершают колебания перпендикулярно направлению движения волны. Поперечные волны обычно быстрее и имеют более высокие частоты, чем продольные волны в тех же материалах.

Кроме этих двух типов волн, существуют и другие, которые могут распространяться в ограниченных твердых телах. Например, поверхностные волны Рэлея, нормальные волны слоев Лэмба, изгибные волны и нормальные стержневые волны Похгаммера.

Поверхностные волны Рэлея - это тип поверхностных акустических волн, которые распространяются вдоль поверхности твердого тела. Они могут использоваться для измерения свойств поверхности, таких как твердость, эластичность и шероховатость.

Нормальные волны слоев Лэмба - это особый тип волн, который может распространяться в слоистых средах. Скорость их распространения зависит от толщины слоя и частоты колебаний. Существуют два типа волн Лэмба: симметричные и асимметричные. Они отличаются движением частиц относительно среднего сечения слоя: симметричном и асимметричном соответственно. Каждый тип волн распространяется со своей скоростью (рис. 1). Изгибные волны есть частный случай асимметричных волн Лэмба нулевого порядка, когда длина волны намного больше толщины слоя [8].

Волны Лэмба представляют собой особый тип механических волн, которые могут распространяться в твердых телах слоистой структуры. Эти волны могут распространяться в различных материалах, включая плоские пластины из однородного изотропного материала. Также они могут распространяться в искривленных пластинах, которые имеют различные механические свойства в разных направлениях.

Волны Лэмба также могут распространяться в пластинах, вырезанных из кристаллов. В этих случаях пластины могут иметь различные механические свойства из-за разной ориентации кристаллических зерен.

Важно отметить, что волны Лэмба не могут распространяться во всех типах материалов. Для их распространения необходимо, чтобы материал имел слоистую структуру и был однородным и изотропным.

Эти волны используются для комплексного неразрушающего контроля слоистых

материалов и структур (обнаружение дефектов, измерение толщины объектов и т. д.) и в системах обработки электрических сигналов (сверх- и гиперзвуковые линии задержки электрических сигналов, фильтры и т. д.). В неразрушающем контроле волны Лэмба в диапазоне от 0,1 до 10 МГц успешно дополняют объемные ультразвуковые волны, которые позволяют проводить контроль только в толстых массивных объектах [9-12]. Важно отметить, что авторы работы использовали звуковой диапазон частот колебаний, что отличает данную работу от известных исследований по применению волн Лэмба.

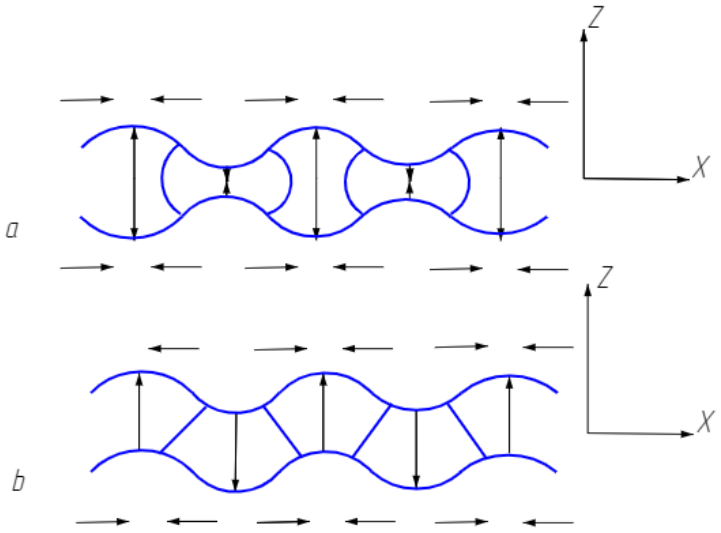


Рис. 1. Схематическое изображение распространения симметричных (а) и ассиметричных (б) волн Лэмба в пластине; стрелками показаны смещения по осям x и z

Fig. 1. Schematic representation of the motion of medium particles in plates during the propagation of symmetric (a) and asymmetric (b) Lamb waves in them; the arrows show the direction of displacements along the x and z axes

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

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Для проведения расчетов был выбран участок трубы длиной 1 000 мм с указанными характеристиками (165х5,5 мм). В качестве материала объекта была выбрана сталь, свойства которой соответствуют ГОСТ 3262-75 «Трубы стальные водогазопроводные».

Выбор материала обусловлен его активным использованием в прокладывании трубопроводов, а именно: не только в устойчивых грунтах, но и в оврагах, по эстакадам и мостам, под руслами рек и даже в сейсмоопасных районах или в высокопористых грунтах.

Отрез трубопровода условно закреплен по краям.

Для проведения модального анализа трубопровода использовался программный комплекс, который предназначен для проведения конечно-элементного анализа. Этот комплекс является универсальным и широко используется специалистами в области инженерных расчетов.

Модальный анализ позволяет определить собственные частоты и формы колебаний исследуемого объекта, в данном случае - участка трубопровода. Эта информация может быть использована для оценки устойчивости трубопровода, определения его резонансных частот и разработки методов снижения колебаний.

Результаты модального анализа могут быть использованы для оптимизации конструкции трубопровода, выбора оптимальных параметров его работы и определения требований к системам контроля и управления.

В данной работе проводится модальный анализ собственных частот участка трубопровода с помощью метода конечных элементов. Этот метод разбивает объект на множество малых элементов, которые затем анализируются по отдельности.

Сначала создается конечно-элементная сетка объекта. Затем решается уравнение движения элементов, чтобы получить общее решение для всего объекта. Из этого решения можно определить собственные частоты и формы колебаний объекта.

Принцип, по которому проводится модальный анализ, заключается в решении уравнений движения для каждого элемента и объединении этих решений в общее решение для всего объекта.

Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок, но является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач.

Собственные колебания системы описываются дифференциальным уравнением свободных колебаний. Это уравнение позволяет определить собственные частоты и формы колебаний системы. Эти данные имеют важное значение для анализа устойчивости системы, ее динамического поведения и способности противостоять внешним воздействиям. Решение этого уравнения позволяет определить собственные частоты и формы колебаний конструкции. (1):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0, \tag{1}$$

где [M] – матрица масс;
[K] – матрица жесткости.

Применение результатов решения этого уравнения позволяет определить резонансные частоты системы, на которых она будет наиболее подвержена внешним воздействиям, а также оценить степень влияния различных факторов, таких как изменение массы или жесткости, на собственные частоты и формы колебаний.

При анализе свободных колебаний конструкции предполагается, что она ведет себя как упругая система. Это означает, что при воздействии на конструкцию с определенной частотой, она будет колебаться с той же частотой и амплитудой (2):

$$\{x\} = \{\phi_i\}\cos(\omega_i t), \tag{2}$$

где ϕ_i определяет форму колебаний i-ой моды (собственный вектор);
ω_i собственная частота для i-ой моды.

Таким образом, ожидаемая реакция конструкции на внешнее воздействие будет гармонической. Это значит, что если приложить к конструкции периодическую силу, то она будет колебаться с той же периодичностью.

Однако следует отметить, что это предположение справедливо только для линейных систем, то есть систем, в которых нет нелинейных эффектов, таких как усталость материала, изменение свойств материала при нагрузке и т.д. Для нелинейных систем анализ свободных колебаний усложняется и требует применения более сложных методов.

С помощью подстановки в предыдущее уравнение можно определить собственные частоты ω_i (3):

$$([K] - \omega_i^2[M])\{\phi_i\} = 0 \tag{3}$$

При расчете свободных колебаний конструкции обычно предполагается, что материалы конструкции ведут себя как линейные упругие системы, то есть их свойства не изменяются при малых деформациях. Также предполагается использование теории малых деформаций, которая предполагает, что деформации конструкции малы и могут быть описаны линейными зависимостями.

Также обычно не учитывается воздействие внешних сил на конструкцию при расчете свободных колебаний, так как целью является определение собственных частот и форм колебаний без учета внешних воздействий. Однако, в некоторых случаях, когда внешние силы могут существенно влиять на колебания конструкции, их воздействие может быть учтено.

Наконец, конструкция может быть закреплена или свободна в зависимости от задачи и условий эксплуатации. Если конструкция закреплена, то ее перемещения ограничены связями, и это влияет на собственные формы и частоты колебаний. Если конструкция свободна, то она может колебаться в любом направлении, и это также влияет на ее собственные частоты и формы колебаний.

Авторами воссоздана математическая модель трубопровода с заданными параметрами, которая представлена на рисунке 2. Опоры модели заданы по краям трубопровода.

Данная модель представлена «чистой», без отложений и прочих дефектов.

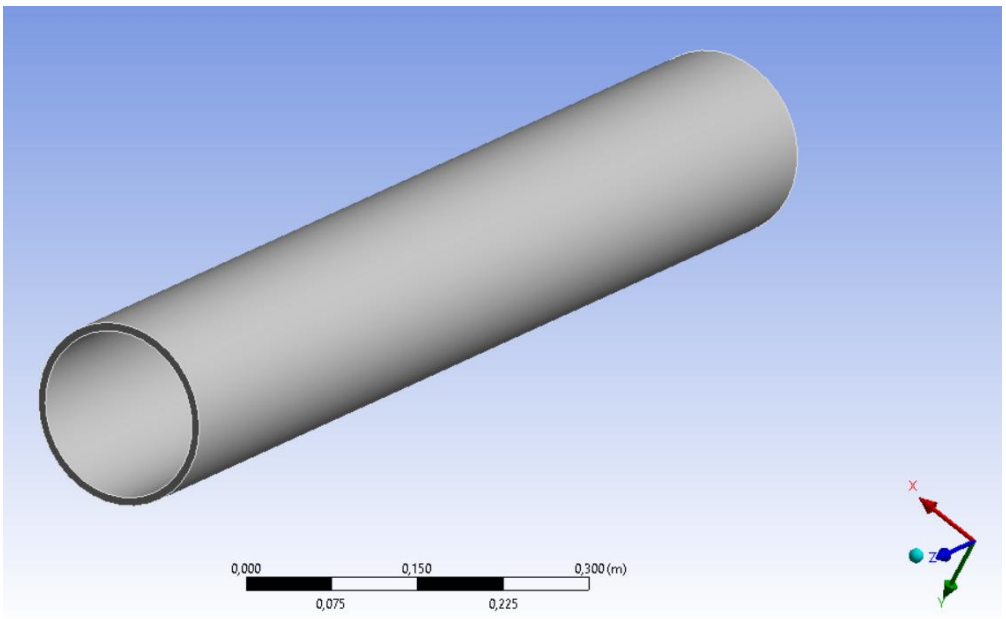


Рис. 2. Модель трубопровода *Fig. 2. Pipeline model*
**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Исследование разделено на несколько основных этапов.

На первом этапе выполнено проведение анализа собственных частот трубопровода без внутренних отложений. Количество ячеек и узлов начальной расчетной сетки составило 10302 и 68293 соответственно, размер ячеек был взят 0,02 мм. Сеточная модель трубопровода представлена на рисунке 3.

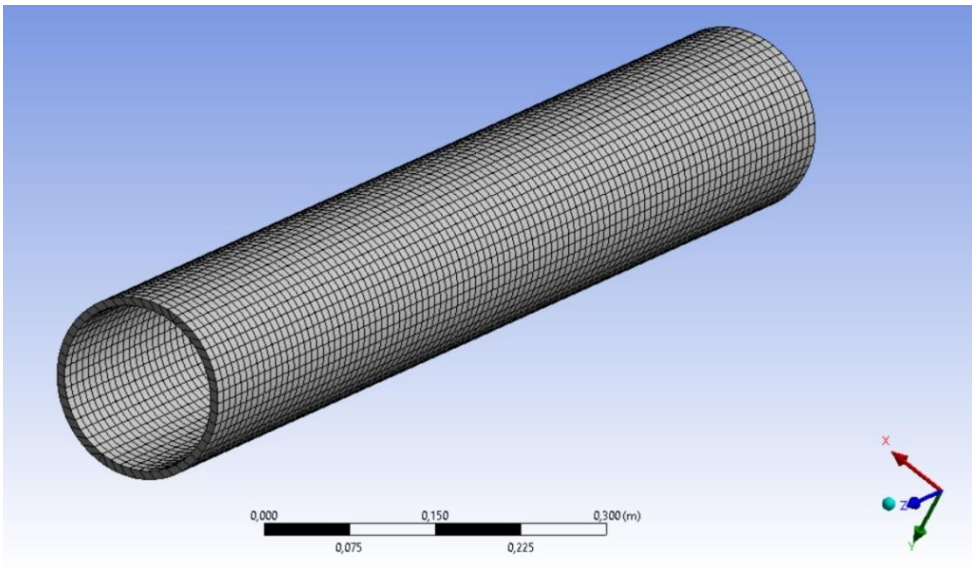


Рис. 3. Сеточная модель трубопровода *Fig 3. Grid model of the pipeline*
**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Значения частот собственных колебаний такой модели трубопровода составили диапазон от 724 до 3444 Гц.

Далее последовательно были построены математические модели отрезка трубы с внутренним слоем кальция следующих толщин: 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм. Условно принято, что зарастание отложениями происходит равномерно. Далее, по аналогии с первой математической моделью, был проведен анализ собственных частот трубопровода с добавленными внутренними отложениями.

Результаты и обсуждение *(Results and discussions)*

Результаты расчетов собственных частот колебаний отрезка трубы заданных параметров с кальциевыми отложениями и без них представлены в таблице 1. В ней представлены собственные частоты ν [Гц] (моды с 1 по 30).

Таблица 1
Table 1

Полученные результаты собственных частот колебаний участка трубопровода
The obtained results of the natural oscillation frequencies of the pipeline section

Мода	Частота, Гц					
	Труба без отложений	Труба с отложением 2 мм	Труба с отложением 4 мм	Труба с отложением 6 мм	Труба с отложением 8 мм	Труба с отложением 10 мм
1.	724,04	714,59	706,26	698,79	691,99	685,72
2.	724,3	714,84	706,5	699,03	692,2	685,94
3.	845,35	873,4	940,41	1045,4	1182,5	1342,9
4.	846,04	874,01	940,93	1045,8	1182,8	1343,2
5.	1105,0	1123,2	1176,0	1264,5	1385,5	1477,8
6.	1105,4	1123,5	1176,3	1264,8	1385,6	1531,8
7.	1543,6	1526,5	1511,8	1498,9	1487,6	1531,9
8.	1587,0	1592,6	1597,7	1581,8	1567,5	1554,7
9.	1587,0	1592,6	1597,7	1581,8	1567,5	1554,7
10.	1636,0	1615,7	1627,9	1695,1	1793,2	1917,6
11.	1636,0	1615,7	1627,9	1695,2	1793,3	1917,6
12.	2208,0	2202,5	2224,3	2275,6	2314,7	2294,3
13.	2208,0	2202,6	2224,4	2275,7	2356,3	2462,9
14.	2219,9	2304,2	2361,0	2336,8	2356,4	2463,0
15.	2221,7	2305,7	2496,0	2603,0	2580,0	2559,7
16.	2292,4	2376,4	2497,2	2603,3	2580,4	2560,1
17.	2294,1	2377,7	2568,5	2783,2	2975,3	2955,5
18.	2418,9	2388,0	2569,6	2784,1	3007,3	3104,1
19.	2441,9	2523,7	2628,8	2856,7	3007,3	3104,2
20.	2443,4	2524,8	2629,2	2857,5	3141,4	3541,0
21.	2686,1	2658,0	2714,0	2936,4	3142,5	3542,0
22.	2687,2	2658,4	2714,9	2936,4	3216,3	3589,6
23.	2690,9	2763,3	2894,6	2997,8	3217,3	3590,2
24.	2691,3	2764,2	2894,7	3001,1	3360,5	3617,4
25.	2897,0	2882,2	2948,9	3001,8	3361,4	3618,4
26.	2897,0	2882,2	2949,7	3232,1	3588,6	3762,1
27.	3025,0	3053,1	3023,5	3232,6	3589,4	3762,9
28.	3025,8	3096,3	3275,6	3553,0	3617,2	3792,2
29.	3087,1	3096,9	3276,0	3553,3	3617,8	3792,3
30.	3444,4	3509,5	3592,4	3629,9	3697,6	3988,6

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

Анализ полученных результатов показывает, что собственные частоты колебаний трубопровода увеличиваются с увеличением количества кальциевых отложений. Это означает, что трубопровод становится более жестким и менее гибким при увеличении количества отложений. Этот эффект может быть связан с изменением плотности и модуля упругости материала трубопровода при образовании отложений.

Кроме того, результаты показывают, что увеличение толщины кальциевого слоя приводит к значительному увеличению собственных частот колебаний. Это может быть связано с тем, что более толстые слои отложений оказывают большее влияние на жесткость трубопровода.

Полученные результаты анализа собственных частот и форм колебаний трубопровода с кальциевыми отложениями могут быть использованы для оценки его динамических характеристик и разработки мер по улучшению его работы. В частности, результаты могут помочь определить оптимальные параметры работы трубопровода, такие как скорость потока жидкости или газа, а также разработать методы снижения нежелательных колебаний и повышения устойчивости работы. Кроме того, результаты анализа могут быть использованы для выбора материалов и конструкций трубопровода, которые обеспечат его надежную и эффективную работу в условиях образования кальциевого отложения. Для наглядности представлен график увеличения частоты собственных колебаний шести моделей трубопроводов, показанный на рисунке 4.

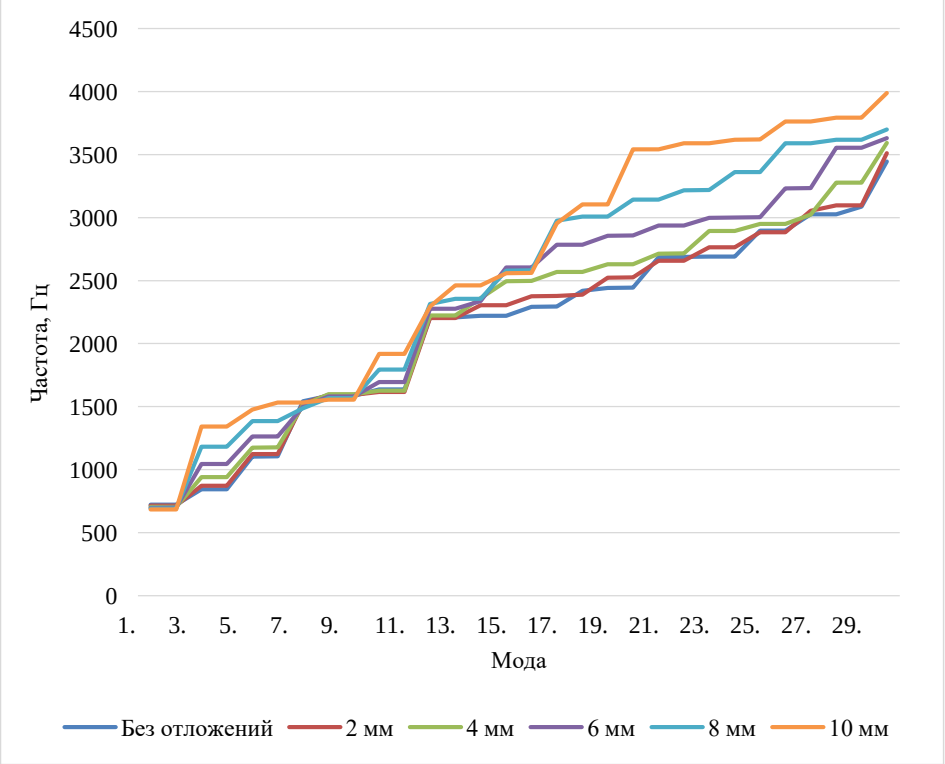


Рис. 4. График собственных частот трубопроводов

Fig. 4. Graph of natural frequencies of pipelines

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

Как видно из графика, рост частот происходит волнообразно. Информативная часть результатов модального анализа начинается с третьей моды. Наибольший рост значений показан на участках с 9 по 19 моду и с 23 по 30 моду. На участках 3-8, 10-12, 13-30 мод наблюдается высокий рост частот собственных колебаний моделируемых трубопроводов.

Визуальная оценка полученных значений показывает, что наибольшие значения частоты приобретают при моделировании на стенках трубопровода кальциевого отложения толщиной 10 мм. Результаты оценки данного явления демонстрируют закономерность изменения собственных частот трубопровода от толщины присутствующего на нем отложения.

Заключение или Выводы *(Conclusions)*

1. Построены математические модели стального трубопровода размером 165х5.5 мм без отложений и с различными толщинами кальциевого отложения (2, 4, 6, 8 и 10 мм). Выполнена разбивка модели на сетку с шагом 0.02 мм в программном комплексе для конечно-элементного анализа.

2. Проведен модальный анализ всех моделей в указанном программном комплексе.

3. Было проведено сравнение результатов расчетов собственных частот колебаний для разных толщин кальциевого отложения. Результаты показали, что собственные частоты колебаний увеличиваются с увеличением толщины отложения. Наибольшее увеличение было замечено при моделировании отложений толщиной 10 мм.

Литература

1. Ярославкина Е.Е., Суслов А.В. Теоретико-экспериментальное исследование зависимости собственных частот колебаний пластины от толщины отложений // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. №2.

2. Мастобаев Б.Н., Павлов В.Н., Валеев А.Р., Ташбулатов Р.Р., Каримов Р.М., Колчин А.В., Локшина Е.А. Об использовании системы магистральных трубопроводов для транспорта и снабжения пресной водой // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2021. №5-6.

3. Ушакова А.А., Журавлева Н.В. Роль примесей воды при ее использовании в энергетике // Вестник магистратуры. 2020. №5-3.

4. Ушакова А.А., Журавлева Н.В. Водоподготовка и ее влияние на окружающую среду // Вестник магистратуры. 2020. №5-3.

5. Zagretdinov A.R., Kazakov R.B., Mukatdarov A.A. Control the tightness of the pipeline valve

shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. Kazan: EDP Sciences, 2019. P. 03005.

6. Суслов А.В., Ярославкина Е.Е. Акустические методы контроля отложение парафина на внутренних стенках трубопроводов. // International Scientific Conference Proceedings “Advanced Information Technologies and Scientific Computing” PIT 2022. С 86-88.

7. Чанчина В.Е., Гапоненко С.О. Метод вынужденных колебаний при анализе возможного влияния грунтов различного типа на собственные колебания трубопровода // В сборнике: Тинчуринские чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалы Международной молодежной научной конференции. 2023. Т. 3. С. 467-470.

8. Чанчина В. Е., Гапоненко С. О., Кондратьев А. Е. и др. Применение методов математического моделирования для определения влияния грунта на частоты собственных колебаний трубопроводов // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 2. С. 142-147.

9. Zagretdinov A.R., Kazakov R.B., Mukatdarov A.A. Control the tightness of the pipeline valve shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals / // E3S Web of Conferences : 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019. Vol. 124. Kazan: EDP Sciences. 2019. P. 03005.

10. Nazarychev S. A., Gaponenko S. O., Kondratiev A. E., Shakurova R. Z. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects // Journal of Physics: Conference Series : Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma During the Deposition of Functional Coatings, Vol. 1328. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012054.

11. Загретдинов А.Р., Хайритдинов Р.Р., Логинов В.Н., Бусаров А.В. Измерительно-диагностический комплекс для виброакустического контроля технического состояния оборудования // ИВД. 2016. №4.

12. Галимова, А.Р. Виброакустический метод контроля оценки технического состояния трубопроводных транспортов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 118-1-118-2.

13. Ульябаева, Г.Ш. Математическое моделирование колебательного процесса бездефектного и дефектного трубопроводов // XXVI Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов. 2023. Т. 2. С. 102-106.

14. Gaponenko S.O., Shakurova R.Z., Kondratiev A.E. Identification of Diagnostic Information for Assessing the Technical Condition of Power Equipment // Proceedings 2021 International Russian Automation Conference, RusAutoCon – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 115-119.

15. Gaponenko S.O., Kondratiev A.E., Zagretdinov A.R. et al. Stand for the study of vibro-acoustic parameters of buried pipelines // AIP Conference Proceedings : IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY (ISPCIET 2021), Veliky Novgorod, Russia. Vol. 2486. Veliky Novgorod, Russia: AIP PUBLISHING, 2022. P. 020001.

16. Shvetsov I.V., Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R., Zhelnov D.V. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation // IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCIET'2020, Veliky Novgorod, Vol. 939. Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012074.

17. Gaponenko S., Kondratiev A. Improving the methodology for monitoring the technical condition of pipelines based on the correlation dependence of vibration diagnostic signals // Международный симпозиум "Устойчивая энергетика и энергомашиностроение - 2021: SUSE-2021" 2021. P. 539-544.

18. Умбетов С.В., Пронин С.П. Классификация и анализ средств контроля коррозийных повреждений внутренних поверхностей подземного металлического трубопровода // Вестник ЮГУ. 2020. №2.

Авторы публикации

Чанчина Вероника Евгеньевна – инженер 2 категории Управление научных исследований, инноваций и разработок, аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *veronika.zaharova.95@mail.ru*

Кондратьев Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *aekondr@mail.ru*

Анцупов Никита Алексеевич – студент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *anikita74rus@googlemail.com*

References

1. Yaroslavkina EE., Suslov AV. Teoretiko-eksperimental'noe issledovanie zavisimosti sobstvennyh chastot kolebanij plastiny ot tolshchiny otlozhenij. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2021; 2. (In Russ).

2. Mastobaev BN., Pavlov VN., Valeev AR., Tashbulatov RR., Karimov RM., Kolchin AV., Lokshina EA. Ob ispol'zovanii sistemy magistral'nyh truboprovodov dlya transporta i snabzheniya presnoj vodoj. *Transport i hranenie nefteproduktov.* 2021; 5-6. (In Russ).

3. Ushakova AA., Zhuravleva NV. Rol' primesej vody pri ee ispol'zovanii v energetike. *Vestnik magistratury.* 2020; 5-3. (In Russ).

4. Ushakova AA., Zhuravleva NV. Vodopodgotovka i ee vliyanie na okruzhayushchuyu sredu. *Vestnik magistratury.* 2020; 5-3. (In Russ).

5. Zagretdinov AR., Kazakov RB., Mukatdarov AA. Control the tightness of the pipeline valve shutter according to the change in the Hurst exponent of vibroacoustic signals. *E3S Web of Conferences: 2019 International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems, SES 2019*; *Kazan: EDP Sciences*; 2019. p. 03005.

6. Suslov AV., Yaroslavkina EE. Akusticheskie metody kontrolya otlozhenie parafina na vnutrennih stenkah truboprovodov. *International Scientific Conference Proceedings "Advanced Information Technologies and Scientific Computing";* PIT; 2022. pp. 86-88. (In Russ).

7. Chanchina VE., Gaponenko SO. Metod vynuzhdennyh kolebanij pri analize vozmozhnogo vliyaniya gruntov razlichnogo tipa na sobstvennye kolebaniya truboprovoda. *Tinchurinskie chteniya - 2023 "Energetika i cifrovaya transformaciya". Materialy Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii;* 2023; 3. pp. 467-470. (In Russ).

8. Chanchina VE., Gaponenko SO., Kondratiev AE. et al. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya vliyaniya grunta na chastoty sobstvennyh kolebanij truboprovodov. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki.* 2021; 14 (2). pp. 142-147. (In Russ).

9. Zagretdinov AR., Kazakov RB., Mukatdarov AA. Leakproofness control of the valve of pipeline fittings by changing the Hearst index of vibroacoustic signals. *E3S Web of Conferences : International Scientific and Technical Conference "Intelligent Energy Systems"*. Kazan: EDP Sciences. 2019; 124. pp. 03005.

10. Nazarychev SA., Gaponenko SO., Kondratiev AE., Shakurova RZ. Acoustic-resonance method for control of the location of hidden hollow objects. *Journal of Physics: Conference Series : Scientific Technical Conference on Low Temperature Plasma During the Deposition of Functional Coatings.* Kazan: Institute of Physics Publishing, 2019; 1238. pp. 012054.

11. Zagretdinov AR., Khairutdinov RR., Loginov VN., Busarov AV. Izmeritel'no-diagnosticheskij kompleks dlya vibroakusticheskogo kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya. *IVD*. 2016; 4. (In Russ).

12. Galimova AR. Vibroakusticheskij metod kontrolya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya truboprovodnyh transportov. *Energetika i energosberezhenie: teoriya i praktika : sbornik materialov VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni T.F. Gorbacheva. 2023. pp. 118-1-118-2.

13. Ulyabayeva GSh. Matematicheskoe modelirovanie kolebatel'nogo processa bezdefektnogo i defektnogo truboprovodov. *XXVI Vserossijskij aspirantsko-magisterskij nauchnyj seminar, posvyashchennyj dnyu energetika: materialy dokladov.* 2023; 2. pp. 102-106. (In Russ).

14. Gaponenko SO., Shakurova RZ., Kondratiev AE. Identification of diagnostic information for assessing the technical condition of power equipment. *Proceedings of the International Russian Conference on Automation 2021, RusAutoCon*. Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2021. pp. 115-119.

15. Gaponenko SO., Kondratiev AN., Zagretdinov AR., etc. Stand for the study of vibroacoustic parameters of buried pipelines. *Proceedings of the AIP conference: IV International scientific and practical conference on innovations in engineering and technology (ISPCIET 2021)*. Veliky Novgorod, Russia. AIP PUBLISHING HOUSE, 2022; 2486. p. 020001.

16. Shvetsov IV., Ziganshin ShG., Zagretdinov AR., Zhelnov DV. Assessment of the technical condition of pipelines in polyurethane insulation. *IOP conference series: materials science and engineering : The conference proceedings ISPCIET'2020*. Veliky Novgorod: IOP Publishing Ltd, 2020; 939. p. 012074.

17. Gaponenko SO, Kondratiev AE. Improving the methodology for monitoring the technical condition of pipelines based on the correlation dependence of vibration diagnostic signals. *Mezhdunarodnyj simpozium "Ustojchivaya energetika i energomashinostroenie - 2021: SUSE-2021"*

2021. pp. 539-544.

18. Umbetov S.V., Pronin S.P. Klassifikaciya i analiz sredstv kontrolya korrozijnyh povrezhdenij vnutrennih poverhnostej podzemnogo metallicheskogo truboprovoda. *Vestnik YUGU.* 2020; 2. (In Russ).

Authors of the publication

Veronika E. Chanchina - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *veronika.zaharova.95@mail.ru*

Aleksandr E. Kondratiev - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *aekondr@mail.ru*

Nikita A. Ancupov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *anikita74rus@googlemail.com*

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

Получено ***11.04.2024 г.***

Отредактировано ***07.06.2024 г.***

Принято ***29.07.2024 г.***

© Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р.

УДК 621.31:614 DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54

ПРОВЕРКА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРИ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДУГОВОГО ПРОБОЯ И ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Тюрин[1,3] А.Н., Солуянов[1,2,3] Ю.И., Ахметшин[2,3] А.Р.

[1]АО «Татэлектромонтаж», г. Казань, Россия
[2]Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
[3]Ассоциация «Росэлектромонтаж», г. Москва, Россия
turinal@rambler.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ. Разработать лабораторный стенд для испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. Провести испытания на лабораторном стенде с последующей разработкой требований по применению аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. МЕТОДЫ. При выполнении поставленной цели были использованы математические и статистические методы анализа. Лабораторные испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков при разных параметрах сети на корректность срабатывания при замыкании на землю. РЕЗУЛЬТАТЫ. Проведены лабораторные испытания при разных параметрах сети аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на корректность срабатывания при замыкании на землю. Осциллографом зафиксирована форма кривой напряжения и тока при замыкании на землю и время срабатывания аппаратов. Испытуемые аппараты продемонстрировали способность распознать и отключить замыкание на землю. Время отключения аппаратов варьируется, однако, не превышает установленных требований. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработан лабораторный стенд для проведения испытания аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание при замыкании на землю. С помощью данного стенда существует возможность проверки аппаратов на адекватность срабатывания при замыкании на землю с последующей сертификацией. Проведенные испытания демонстрируют необходимость разработки обязательных требований к аппарату для стандартизации их алгоритма работы. Установлено, что аппарат защиты позволяет отключить параллельный дуговой пробой на землю и таким образом повысить безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ с целью уменьшения количества пожаров, вызванных нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования.*

Ключевые слова: *устройства защиты; пожарная безопасность; распределительные сети низкого напряжения; короткие замыкания; дуговой пробой; искрение; УЗДП.*

Для цитирования: Тюрин А.Н., Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р. Проверка на работоспособность при замыкании на землю аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 41-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.

TESTING THE OPERATION OF PROTECTION DEVICES AGAINST PARALLEL ARC BREAKDOWN AND SPARK GAPS IN THE EVENT OF A GROUND FAULT

Tyurin[1,3] A.N., Soluyanov[1,2,3] Yu.I., Akhmetshin[2,3] A.R.

[1]JSC «Tatelektromontazh», Kazan, Russia
[2]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[3]"Roselectromontazh" Association, Moscow, Russia
turinal@rambler.ru

Abstract: *THE PURPOSE. Develop a laboratory rig for testing parallel arc fault and spark gap protection devices for tripping in the event of a ground fault. Conduct laboratory rig tests with subsequent development of requirements for the use of parallel arc fault and spark gap protection devices for tripping in the event of a ground fault. METHODS. Mathematical and statistical methods of analysis were used to achieve the stated objective. Laboratory tests of parallel arc fault and spark gap protection devices for different network parameters for correct tripping in the event of a ground fault. RESULTS. Laboratory tests of parallel arc fault and spark gap protection devices for correct tripping in the event of a ground fault were conducted with different network parameters. The oscilloscope recorded the shape of the voltage and current curve in the event of a ground fault and the tripping time of the devices. The tested devices demonstrated the ability to recognize and disconnect a ground fault. The tripping time of the devices varies, however, does not exceed the established requirements. CONCLUSION. A laboratory stand has been developed for testing parallel arc breakdown and spark gap protection devices for operation during a ground fault. This stand makes it possible to test devices for adequate operation during a ground fault with subsequent certification. The tests conducted demonstrate the need to develop mandatory requirements for the device to standardize their operating algorithm. Therefore, the use of this protection device can contribute to safer operation of low-voltage electrical networks by preventing emergency situations and reducing the risk of fires. This is an important technical aspect for improving the reliability and safety of power supply.*

Keywords: *protective devices; fire safety; low voltage distribution networks; short circuits; arcing; sparking; AFCI; AFDD.*

For citation: Tyurin A.N., Soluyanov Yu.I., Akhmetshin A.R. Testing the operation of protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps in the event of a ground fault. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 41-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-41-54.

Введение (*Introduction*)

На протяжении последних лет пожары, вызванные нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования, занимают второе место по частоте возникновения [1]. Дуговые пробои, предшествующие возгоранию и образованию пожаров, делятся на несколько видов (рис. 1): последовательный дуговой пробой; параллельный дуговой пробой фаза-ноль; параллельный дуговой пробой фаза-земля.

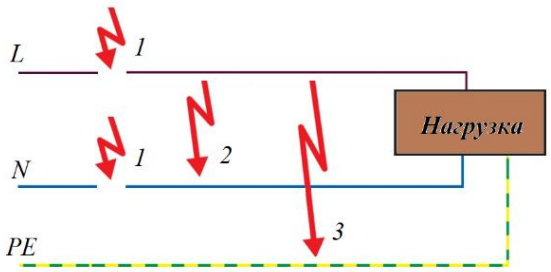


Рис. 1. Дуговые пробои: 1 - последовательный дуговой пробой; 2 - параллельный дуговой пробой фаза-ноль; 3 - параллельный дуговой пробой фаза-земля

Fig. 1. Arc breakdowns: 1 - Serial arc breakdown; 2 - Parallel arc breakdown phase-zero; 3 - Parallel arc breakdown phase-earth

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

Последовательный дуговой пробой возникает в результате повреждения токопроводящего проводника («плохой контакт»). Этот вид пробоя достаточно трудно выявить, поэтому он представляет серьезную опасность. При последовательном дуговом пробое протекающий ток в цепи уменьшается, а обычный автоматический выключатель не сработает на снижение величины тока в цепи. Параллельные дуговые пробои «фаза-ноль» и «фаза-земля» сопровождаются увеличением тока в цепи. Время до возгорания при этом может быть настолько коротким, что его не хватит для срабатывания обычного аппарата защиты, способного отключить поврежденный участок цепи [2, 3].

С целью исключения пожаров, вызванных дуговыми пробоями, разработано и успешно внедряется специальное устройство защиты при дуговых пробоях и искровых промежутках (УЗДП) [4, 5].

УЗДП – это специализированное электронное устройство, которое постоянно контролирует работу защищаемого участка электросети. Его основная задача - предотвращение возникновения пожара путем обнаружения и устранения дугового пробоя (искрения). Когда прибор фиксирует наличие дугового пробоя, анализируя сразу несколько параметров сети: силу тока, напряжение, форму, полярность и длительность сигналов, он автоматически отключает соответствующую линию, на которой была выявлена неисправность, предотвращая, таким образом, возгорание. При этом устройство не реагирует на импульсы с параметрами ниже заданных производителем пороговых значений [3-7].

УЗДП не способны обнаруживать замыкание на линии и перегрузку по току. Поэтому они не заменяют, а дополняют традиционные автоматические выключатели (АВ) и устройства защитного отключения (УЗО), которые выполняют эти функции (рис. 2).

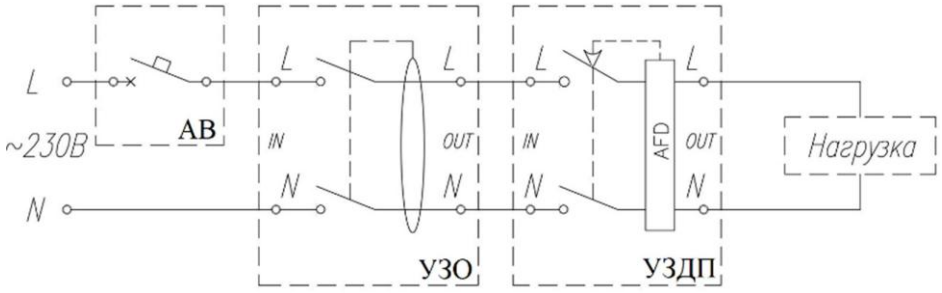


Рис. 2. Подключение двухполюсного УЗДП, однополюсного АВ, двухполюсного УЗО

Fig. 2. Connecting a two-pole AFCI, single-pole AB, two-pole RCD

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

Основными элементами УЗДП являются электронный блок обнаружения дугового пробоя и механизм отключения защищаемой цепи. Блок обнаружения дугового пробоя контролирует силу тока в цепи с помощью токовых трансформаторов и мгновенное напряжение в сети, при обнаружении признаков дугового пробоя через тиристорный ключ приводит в действие расцепитель и отключает нагрузку (рис. 3).

Рис. 3. Блок обнаружения дугового пробоя

Fig. 3. Arc fault detection unit

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

Применение УЗДП получило широкое распространение во многих странах. Так, в Соединенных Штатах Америки УЗДП стали обязательными к применению в жилых домах еще с 2001 г., предписывая их установку во всех электрических цепях жилых зданий, за исключением ванных комнат, гаражей и уличных электропотребителей. С

2017 г. в Федеративной Республике Германии УЗДП являются обязательными в ряде помещений жилых и общественных зданий, таких как спальни, помещения с горючими материалами, общественные места с большим скоплением людей.

Первые модели УЗДП появились в Российской Федерации в 2017 году. К 2021 году несколько отечественных и зарубежных производителей наладили их серийный выпуск (рис. 4).

УЗДП производства Соединенных Штатов Америки, устанавливаемые в щитах, имеют однополюсное исполнение, в отличие от отечественных производителей.

а б в г

Рис. 4. Виды УЗДП (а – Российская Федерация; б – Французская Республика; в - Соединенные Штаты Америки; г- Федеративная Республика Германия)

Fig. 4. Types of AFDD (a – Russian Federation; b – French Republic; c – United States of America; d – Federal Republic of Germany)

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

В 2020 г. разработанные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» рекомендации по применению УЗДП утверждены приказом[1] в виде Изменений № 4 к Федеральному своду правил СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (СП).

В 2024 г. разработанные Ассоциацией «Росэлектромонтаж» обязательные требования по применению УЗДП утверждены приказом[2] в виде Изменений № 6 к вышеуказанному СП.

На основании Изменений № 6 к СП УЗДП для защиты групповых сетей следует применять в следующих жилых и общественных зданиях:

- дошкольных образовательных и общеобразовательных учреждениях;
- образовательных учреждениях с круглосуточным пребыванием обучающихся;
- спальных корпусах организаций отдыха детей и их оздоровления;
- организациях, предназначенных для осуществления медицинской деятельности, в том числе: диспансерах, поликлиниках, госпиталях, больницах и др.;
- специализированных домах для престарелых и инвалидов неквартирного типа;
- жилых помещениях зданий, предоставляемых для проживания работников предприятия либо учащихся;
- гостиницах с размещением от 1 до 12 человек в номере, а кухни, холл и санузел, вынесены в отдельные помещения, являются местами общего пользования– хостелах;
- жилых зданиях, высотой более 50 м.

Требования по применению УЗДП приведены в СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования» и СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования».

По мнению специалистов МЧС России, системное внедрение УЗДП позволит существенно повысить пожарную безопасность электрических сетей и значительно снизить количество пожаров и связанных с ними трагических последствий. УЗДП

[1] Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30.12.2020 N 919/пр.

[2] Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28.12.2023 г. № 1005/пр.

должны соответствовать требованиям, указанным в нормативных документах[3].

Литературный обзор (*Literature Review)*

В работе [8] рассмотрены признаки появления дугового пробоя в распределительных сетях низкого напряжения, которые позволят вовремя определить и отключить это повреждение. Описана методика и приведены результаты эксперимента по изучению дуговых пробоев и маскировочного эффекта нагрузки. Представлена модель дугового пробоя, реализованная в программном комплексе Matlab/Simulink.

По своей природе дуговое замыкание представляет собой беспорядочное явление с различной временной устойчивостью и переменной способностью воспламенить пожар [9]. В настоящее время не существует требований к минимальному постоянству дуги во время стандартного испытания последовательной дуги, а также нет четких указаний о том, как измерить временную устойчивость дуги и подтвердить, что испытание привело к успешному последовательному дуговому замыканию. Целью работы [9] является усовершенствование стандартов путем предложения простого метода точного определения устойчивости дуги во время испытания на дуговое замыкание. Используя в качестве входных данных только ток дуги и напряжение дуги, можно принять или отклонить стандартный последовательный сигнал дуги на основании измеренного уровня временной устойчивости дуги.

Основной причиной возникновения возгораний и пожаров в электроустановках являются аварийные дуговые замыкания. Высокая температура горения электрической дуги, достигающая порядка 3000°C [10], представляет серьезную пожарную опасность.

Для предотвращения таких аварийных ситуаций в новых устройствах применяется принцип непрерывного мониторинга процессов в контролируемых электрических цепях. Эта система позволяет выявлять сигналы, свидетельствующие о наличии дугового пробоя, будь то параллельный или последовательный. При обнаружении повреждения происходит незамедлительное отключение питания поврежденного участка сети.

В работе [10] описан подробный алгоритм решения задачи распознавания возникновения дуговых пробоев и искровых промежутков в электроустановке. Он основан на общем представлении о коммутационных процессах и вводит ключевое понятие нестационарного коммутационного процесса. Предложенный способ позволяет выделить из суммарных электрических сигналов электроустановки параметры тока нагрузки и напряжения на нагрузке, характеризующие возникновение дугового пробоя. Это дает возможность своевременно идентифицировать наличие повреждения и оперативно обесточить поврежденный участок, предотвращая возникновение пожара.

В работе [11] анализировались оба типа повреждений последовательные и параллельные во временной и частотной областях, а затем сравнивались с невозмущенным током нагрузки. Анализ Фурье показал, что определенные диапазоны частотного спектра могут использоваться как индикаторы дугового замыкания.

Процесс образования электрической дуги в электроустановках низкого напряжения представлен в статье [12]. Описано негативное влияние электрической дуги на безопасность человека и электрооборудования, а также приведена статистика. Рассмотрены группы дуговых пробоев, а также приведены их свойства и причины возникновения. Помимо вышеизложенного представлено описание существующих в настоящее время способов защиты от повреждений, связанных с электроснабжением, и вероятностью их обнаружения при возникновении дугового пробоя. Дано описание изготовленной экспериментальной установки для образования дугового пробоя низкого напряжения, приведены результаты экспериментов.

Рассмотрены международные и российские нормативные документы в статье [13], определяющие порядок применения УЗДП в электроустановках низкого напряжения в жилых и общественных зданиях. Показаны возможные случаи ложных срабатываний УЗДП и способы снижения таких отключений.

В работе [14] приведен анализ действующей нормативной документации и практики применения этих аппаратов в Европе, США и Канаде. Изложены принципы работы УЗДП и требования нормативных документов по проведению испытаний и подтверждению их основных характеристик. Представлены результаты эксперимента по применению этих устройств на реальном объекте.

Некоторые сведения об УЗДП как нового продукта в бытовых энергосистемах в Соединенных Штатах Америки для защиты от условий, которые могут вызвать пожар,

[3] ГОСТ IEC 62606-2016 «Устройства защиты бытового и аналогичного назначения при дуговом пробое. Общие требования».

представлены в [15]. Так же рассмотрены перспективы УЗДП как развивающейся технологии, которая может найти применение в промышленности, поскольку потенциальные применения станут достаточно хорошо изучены.

Потенциал использования устройств защиты от дуговых пробоев (УЗДП) в Европейских странах широко раскрыт в работе [16]. Практически все крупнейшие производители аппаратов защиты выпускают свои версии УЗДП, что свидетельствует о широком признании данной технологии. Важным вопросом является также идентификация и обеспечение полноценной работы в нормальных условиях некоторых промышленных устройств, внутри которых возникает электрическая дуга, например, сверлильных станков, отрезных станков и т.п. Эти устройства должны выполнять свои функции без ложного отключения аппаратами защиты. Для этого необходимо изучение симметрии сигнала тока по отношению к синусоидальной форме волны. Данная работа предлагает анализ электрических параметров, производимых в результате нормальной работы некоторого вида оборудования (сверлильных станков, фрезерных станков, электрических дисковых резчиков), в котором наличие дуговых пробоев может присутствовать в штатном режиме работы совместно с зародившимся дефектом. В случае нормальной работы форма волны электрического тока симметрична относительно обоих полупериодов сигнала питания. В то время как при возникновении дефекта и дугового пробоя, форма тока становится ассиметричной. Таким образом, анализ симетрии формы тока является ключевым методом для УЗДП, позволяющим отличать нормальные режимы работы с допустимыми дуговыми разрядами от аварийных ситуаций с опасными дуговыми пробоями. Это обеспечивает корректную работу устройств защиты без ложных срабатываний в промышленных условиях.

В работе [17] проведена серия экспериментов с дуговыми замыканиями и сравнительный анализ характеристик работы различных УЗДП. Это важное исследование, которое поможет лучше понять особенности работы УЗДП и их способность предотвращать пожары из-за дуговых замыканий.

Метод обнаружения последовательных дуговых замыканий с приведённой программной схемой и принципами его прикладной аппаратной реализации предложен в работе [18]. Прототип УЗДП на номинальное напряжение 220 В и номинальный ток 40 А был протестирован в соответствии с экспериментальными методами, предусмотренными китайским национальным стандартом. Результаты экспериментов показывают, что предложенный метод обнаружения прост и практичен, и может быть реализован с использованием недорогого микропроцессора. Предлагаемый метод послужит хорошим теоретическим руководством для продвижения исследований и разработок УЗДП.

В Южной Корее предотвращение электрических пожаров с помощью последовательной дуги применяется редко, поскольку не существует национального стандарта для УЗДП, как это описано в статье [19]. Поэтому для предотвращения электрических пожаров Южной Кореи по-прежнему необходимы многочисленные исследования работы УЗДП по надежному обнаружению и анализу дуги. В исследовании [19] был проведен анализ последовательных дуговых сигналов для низковольтных электрических устройств, таких как обогреватели, компьютеры, холодильники и кондиционеры. Фаза обнаруженных сигналов последовательной дуги анализировалась в соответствии с типами нагрузки, и, наконец, был предложен новый алгоритм, основанный на результатах анализа последовательной дуги с фазовым разрешением, для идентификации типов нагрузок.

В патенте [20] представлен способ работы УЗДП, техническим результатом которого является повышение точности определения случаев искрения, снижения количества ложных срабатываний устройства защиты от искрения, увеличение зоны обслуживания, количества подключенных электроприборов, протяженности и разветвленности защищаемой цепи.

Устройство для тестирования УЗДП на последовательный дуговой пробой представлено в статье [21]. Установлено, что различные типы УЗДП способны отключать последовательный дуговой пробой и соответственно повысить безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ.

В работе [22] предложен метод испытаний на эффективность срабатывания УЗДП на дуговые пробои под определенные условия сети и даны рекомендации по его реализации с целью возможности подборки наиболее оптимального оборудования.

Генератор электрической дуги, который позволяет генерировать электрическую дугу в электроустановках переменного тока, с последующим применением его для диагностики УЗДП приведен в патенте [23].

Одним из ключевых показателей работоспособности УЗДП определена время-токовая характеристика, которая требует расчета предельно допустимого времени отключения при заданном токе дугового замыкания [24].

Целью исследования [25] явилась разработка метода экспериментальных испытаний для проверки правильного функционирования магнитотермических выключателей с функцией защиты от электрической дуги при возникновении дуговых замыканий. Результаты показывают, что предложенный метод адекватно определяет правильные операции и время отключения при использовании различных ограничителей перенапряжения. Предлагаемая система закладывает основу портативной испытательной системы для периодической проверки электрических систем, в которых установлены УЗДП.

В статье [26] сравнивались характеристики трёх биполярных устройств обнаружения дуговых замыканий. Испытания УЗДП должны проводиться для каждой его функции. Тесты каждой функциональности требуют различной схемы, которая должна учитывать достаточное напряжение для питания электронных схем внутри устройств. Устройства УЗДП тестируются отключенными для каждого стандартного моделирования. Для срабатывания защиты специально разработана схема, имитирующая как возникновение электрической дуги последовательно с потребителем для однофазной цепи, дуги параллельно между двухфазными проводниками, так и перенапряжения более 270 В соответствующей обнаружению дуги.

Многочисленность публикаций, посвящённых анализу работы и совершенствованию УЗДП, подтверждает актуальность темы, затронутой авторами в статье.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Для проверки УЗДП на последовательных дуговых пробоях используется устройство, содержащее генератор электрической дуги [23]. Вышеописанное устройство положительно зарекомендовало себя и позволяет обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики всех типов аппаратов защиты от дугового пробоя и искровых промежутков как отечественных, так и зарубежных производителей.

В процессе создания нового испытательного оборудования для проверки УЗДП, помимо вышеуказанного устройства, было разработано устройство, которое позволяет проверить на заявленные характеристики УЗДП как при последовательных, так и при параллельных дуговых пробоях и искровых промежутках [21]. Данное устройство проверки аппаратов защиты от последовательного и параллельного дуговых пробоев и искровых промежутков помимо источника электрической дуги, генерирующего дугу последовательно включенного в цепь, содержит источник для параллельного дугового пробоя в виде образца кабеля с параллельными проводниками, при протекании тока формируется параллельный дуговой пробой путем создания карбонизированного проводящего пути через изоляцию между двумя проводниками кабеля, ток которого определяют величиной и характером регулируемой нагрузки, возникающий параллельный дуговой пробой запускает секундомер, при этом на исправном аппарате защиты под воздействием параллельного дугового пробоя происходит его срабатывание с отключением измерителя времени и прекращением горения дуги, а секундомер фиксирует время срабатывания аппарата защиты.

Недостатком вышеописанных устройств является то, что в них отсутствует возможность проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю.

Проверка на срабатывание УЗДП при замыкании на землю является актуальной задачей, так как на сегодняшний день на рынке электрооборудования представлено большое количество этих аппаратов, которые не соответствуют заявленным характеристикам. Для выполнения проверки на срабатывание УЗДП при замыкании на землю на базе АО «Татэлектромонтаж» разработан лабораторный стенд на основании [27]. Лабораторный стенд представляет из себя испытательное оборудование, способное воспроизвести аварийные режимы для достоверного заключения о соответствии и работоспособности аппаратов УЗДП заявленным характеристикам при замыкании на землю.

Исследования в этой области необходимы с целью совершенствования уже имеющихся способов и методов по выявлению некачественных УЗДП.

Проверяемые устройства в условиях лабораторных испытаний позволяют получить информацию по некорректным срабатываниям УЗДП. В дальнейшем эта информация может быть использована производителями УЗДП для выявления брака и

совершенствования алгоритмов работы УЗДП. Потребители в свою очередь получат качественный и надежный УЗДП.

Проверка на соответствие срабатыванию УЗДП возможна только в лабораторных условиях при наличии соответствующего испытательного оборудования с фиксацией времени срабатывания с последующим сопоставлением с нормативными значениями согласно требованиям[3].

Проведение лабораторных испытаний решает задачу по проверке УЗДП от параллельных дуговых пробоев на землю, результаты экспериментов будут направлены на повышение надежности и пожарной безопасности электрических сетей и электроустановок.

Разработанное устройство проверки УЗДП позволяет обеспечить безопасную проверку на заявленные характеристики всех типов УЗДП отечественных и зарубежных производителей и реализуется с помощью схемы, представленной на рисунке 5.

Данное устройство (рис. 5) было использовано при разработке лабораторного стенда для проверки серийных образцов УЗДП при реальных параллельных дуговых пробоях на землю.

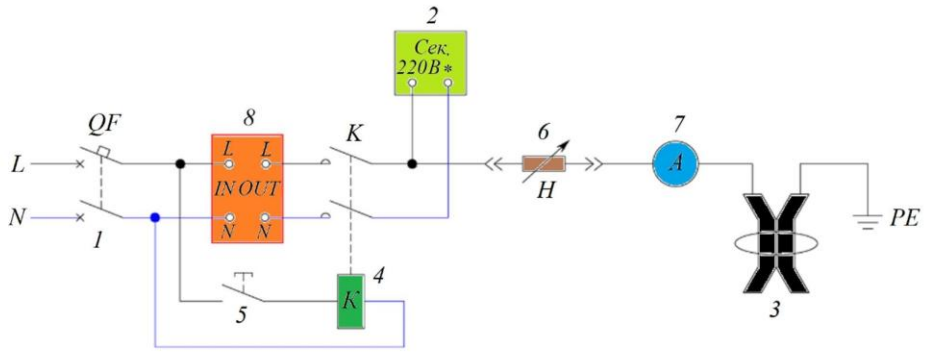


Рис. 5. Схема устройства для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю

Fig. 5. Scheme of the device for testing the AFDD from parallel arc breakdown and spark gaps to ground

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

Лабораторный стенд для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю, разработанный на основании схемы (рис. 5), представлен на рисунке 6.

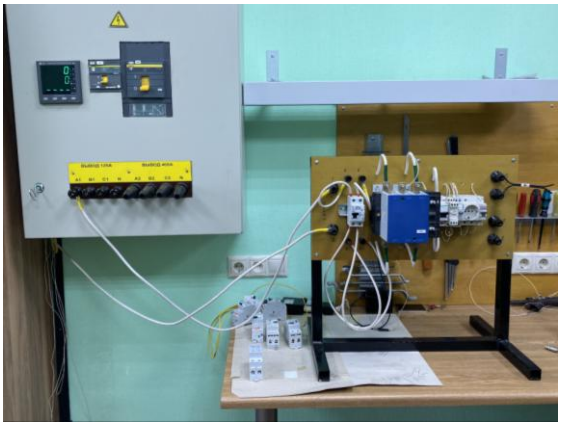


Рис. 6. Лабораторный стенд для проверки УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю

Fig. 6. Laboratory stand for testing AFDD from parallel arc breakdown and spark gaps to ground

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

Испытательный стенд для проверки на срабатывание УЗДП при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю в соответствии со схемой (рис. 5) собран следующим образом:

- подключение УЗДП (8) к сети осуществляется через автоматический выключатель (1);

- катушка управления контактора (4) через кнопку включения (5) подключается на питающий вход УЗДП (8);

- на выходе УЗДП (8) подключены силовые контакты контактора (4);

- на выходе УЗДП (8) присоединены две цепи: первая параллельная содержит секундомер (2); вторая – последовательно соединены регулируемая нагрузка (6), амперметр (7) и образец кабеля с параллельными проводниками (3).

Соединения между элементами выполнены разборными контактами путем свинчивания в соответствии с требованиями нормативных документов.

Испытательный стенд для проверки на срабатывание УЗДП при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю в соответствии со схемой (рис. 5) работает в следующем порядке:

1. Одновременно с кнопкой включения (5) срабатывает контактор (4) и запускается секундомер (2).

2. Ток, текущий в цепи, фиксируется амперметром (7).

3. Под воздействием параллельного дугового пробоя на землю, происходит срабатывание исправного УЗДП с одновременным отключением цепи, с последующим прекращением горения дуги.

4. Время срабатывания УЗДП фиксируется секундомером.

Параллельный дуговой пробой на землю является начальным этапом короткого замыкания на землю и сопровождается большими токами. На рисунке 7 представлен момент протекания процесса параллельного дугового пробоя на землю во время испытания на лабораторном стенде (рис. 6).

Рис. 7. Параллельный дуговой пробой на землю на образце кабеля

Fig. 7. Parallel arc breakdown to ground on a cable sample

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

Параллельный дуговой пробой на землю в дальнейшем сопровождается выделением большого количества тепла (рис. 7) с последующим переходом в металлическое короткое замыкание, что и наблюдалось при проведении экспериментов. Помимо выгорания изоляционного слоя кабеля, также наблюдалось и выгорание токопроводящей жилы образца кабеля (рис. 8).

Рис. 8. Образец кабеля после завершения параллельного дугового пробоя на землю

Fig. 8. Cable sample after completion of parallel arc fault to ground

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

Осциллограммы тока и напряжения, снятые при вышеописанном эксперименте, при параллельном дуговом пробое на землю выглядят несколько иначе, чем при последовательном дуговом пробое, и представлены на рисунке 9.

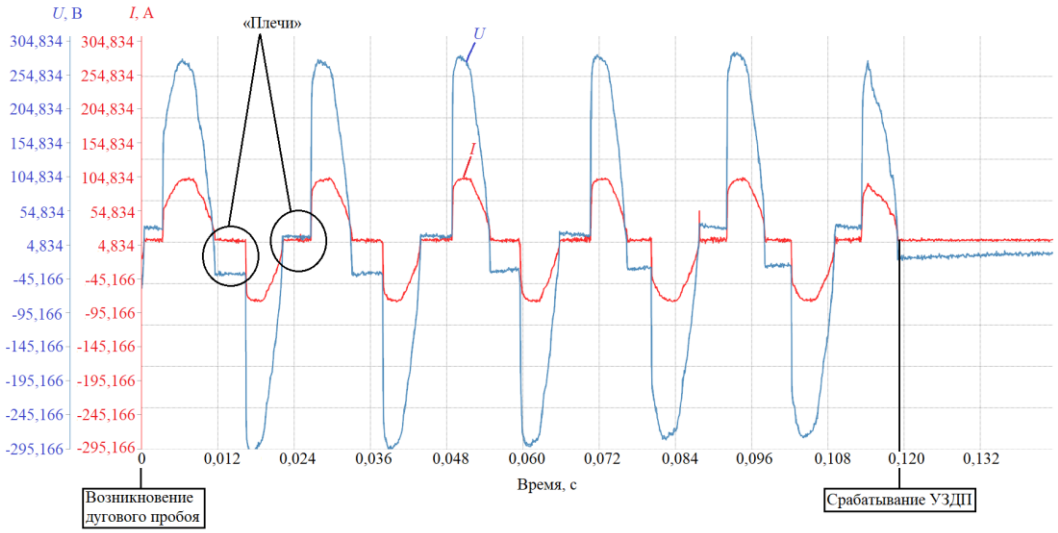


Рис. 9. Осциллограммы тока дуги и напряжения при параллельном дуговом пробое на землю

Fig. 9. Oscillograms of arc current and voltage during parallel arc breakdown to ground

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

На рисунке 9 демонстрируется графики кривых тока и напряжения при параллельном дуговом пробое на землю. На графиках кривых тока и напряжения (рис. 9) можно наблюдать форму с «плечами», являющейся индикатором срабатывания УЗДП.

***Результаты** (Results)*

Применение лабораторного стенда позволяет определить параметры УЗДП и сравнить его с требованиями нормативной документации[3] при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю. Появилась возможность определения условий срабатывания УЗДП различных производителей при параллельном дуговом пробое и искровых промежутках на землю. На данный лабораторный стенд для проверки УЗДП на параллельный дуговой пробой и искровые промежутки на землю получен патент на полезную модель [27].

Предлагаемый лабораторный стенд позволяет фиксировать фактическое срабатывание УЗДП от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю за определенное время при использовании изменяемой нагрузки.

***Обсуждение** (Discussions)*

Дуговые пробои или искровые промежутки в электрооборудовании зданий и сооружений – одна из основных причин пожаров, ежегодно приводящая к гибели и травмированию большого количества людей и значительным материальным потерям.

Исходя из статистики МЧС за 2023 г. подобных пожаров в стране довольно много [1]. Полноценной защитой от пожаров, возникающих из-за дуговых пробоев и искрения в электросети, может быть УЗДП.

Для снижения риска возникновения пожара УЗДП должны выявлять, фиксировать и подавать сигнал при возникновении:

- дугового пробоя в групповой сети на землю;
- параллельного дугового пробоя;
- последовательного дугового пробоя.

Электротехнические характеристики УЗДП должны отвечать требованиям следующих структурных элементов:

- по номинальному току Iн;
- по номинальному напряжению Uн;
- по номинальной частоте;
- по номинальным включающей и отключающей способностям Im;
- по номинальным включающей и отключающей способностям в одном полюсе Im1;
- по степени защиты;
- по номинальному условному току короткого замыкания Inc;

- по номинальному условному току короткого замыкания на одном полюсе Inc1;
- по способу присоединения.

Практически все производители электрооборудования выпускают свою версию УЗДП, что вызывает необходимость в проведении испытаний на адекватность срабатывания для определения соответствия этих устройств установленным требованиям, указанным в нормативной документации[3].

Проведённые лабораторные испытания УЗДП при разных параметрах сети на корректность срабатывания при замыкании на землю. Осциллографом зафиксирована форма кривой напряжения и тока при замыкании на землю и время срабатывания УЗДП. Испытуемые УЗДП продемонстрировали способность распознать и отключить замыкание на землю.

Проведение экспериментальных исследований с различными видами нагрузок, одновременно с изменением величины испытательных токов, позволит получить осциллограммы, анализ которых позволит разработать общие критерии для адекватного срабатывания всех УЗДП.

Выводы *(Conclusions)*

Разработан лабораторный стенд для проведения испытания УЗДП на срабатывания при замыкании на землю. С помощью данного стенда существует возможность проверки УЗДП на адекватность срабатывания при замыкании на землю с последующей сертификацией. Проведенные испытания демонстрируют необходимость разработки обязательных требований к УЗДП для стандартизации их алгоритма работы. Установлено, что УЗДП способен выявить и затем отключить параллельный дуговой пробой на землю, что соответственно повышает безопасность эксплуатации электрических сетей до 0,4 кВ с целью уменьшения пожаров, вызванных нарушением правил устройства и эксплуатации электрооборудования.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности срабатывания различных моделей УЗДП при различных условиях эксплуатации (с различной нагрузкой, в силовых и осветительных сетях) с последующей выработкой необходимых рекомендаций по их совершенствованию.

Литература

1. Гончаренко В.С., Чечетина Т.А., Сибирко В.И. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информ.- аналитич. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России. 2023. 80 с.

2. Гордиенко Д.М., Лагозин А.Ю., Рябиков А.И. и др. Новый вид защиты электрических сетей // Пожарное дело. 2021. № 5. С. 50-51. EDN QCRTJV.

3. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садыков Р.Р. Некоторые особенности исследования основных показателей надежности низковольтных аппаратов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. No 1 (29). С. 105–115.

4. Zhang J., Su G., Chen T., et al. Glowing contact in electrical fires: Experimental investigation and modeling on its heat intensity and thermal hazards // Case Studies in Thermal Engineering. Vol. 45. Art. no. 102880. 2023. doi: 10.1016/j.csite.2023.102880.

5. Soluyanov Y., Tyurin A., Akhmetshin A. Test of Arc Fault Detection Devices for Operation from Spark Gaps and Arc Fault in an Electric Circuit of 0.4 kV // 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2023. pp. 374-378. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291069.

6. Королёв И.В., Кондратьев О.Е., Валуев П.В., и др. Анализ целесообразности применения устройств обнаружения дугового пробоя для комплексной защиты от пожаров, вызванных неисправностями электрооборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 2(47). С. 128–131.

7. Грачева Е.И., Сафин А.Р., Садыков Р.Р. Исследование и оценка функциональных параметров низковольтных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 5-6. С. 13-21. EDN XWBLWH.

8. Рашевская М.А., Гудожников А.С., Куликов А.И., и др. Определение характерных признаков дугового пробоя в распределительных сетях низкого напряжения // Промышленная энергетика. 2022. № 8. С. 12-21. doi: 10.34831/EP.2022.33.78.002. EDN PJXMLP.

9. Vasile C., D'Orchymont V., Meunier-Carns J., et al. Arcing Persistency Measurement for IEC62606 Arc-Fault Detection Device Certification // 2019 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCE Austin). 2019. doi: 10.1109/SPCE47297.2019.8950836.

10. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Козырев А.А. Принцип работы устройства защиты электроустановок от дуговых замыканий // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая политика. 2014. No 1. С. 28-30.

11. Müller P., Tenbohlen S., Maier R., et al. Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain // 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2010. pp. 1-7.

12. Дубинин Д.В., Кутейников П.Д., Рашевская М.А. Изучение характеристик электрической дуги низкого напряжения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 1(357). С. 34-38. doi: 10.33979/2073-7408-2023-357-1-34-38. EDN BDHYRG.

13. Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя // Пожаровзрывобезопасность. 2021. Т. 30, № 2. С. 117-122. EDN ZLMDVI.

14. Пехотиков В.А., Смелков Г.И., Рябиков А.И. и др. Перспективы и проблемы применения устройств защиты от дугового пробоя // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 11. С. 18-23. doi: 10.24000/0409-2961-2019-11-18-23. EDN XGBSUO.

15. Gregory G.D., Scott G.W. The arc-fault circuit interrupter, an emerging product // 1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Conference Record. Papers Presented at the 1998 Annual Meeting (Cat. No.98CH36202). 1998. doi: 10.1109/ICPS.1998.692533.

16. Hnatiuc B., Turcu F., Hnatiuc M., et al. Detection of electric arc faults by Arc Fault Detection Devices // EPE 2022 - Proceedings of the 2022 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2022. pp. 239–244. doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959773.

17. Ra W., Kong H. Comparison Study of Operation Characteristics of AFCI Products // International Journal of Membrane Science and Technology. 2023. Vol. 10. No. 1. pp. 201-208. doi: 10.15379/ijmst.v10i1.1446.

18. Lu Q., Ye Z., Zhang Y., et al. Analysis of the Effects of Arc Volt–Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults // Energies. Vol. 12. Iss. 2. 2019. doi: 10.3390/en12020323.

19. Ji H.-K., Kim S.-W., Kil G.-S. Phase Analysis of Series Arc Signals for Low-Voltage Electrical Devices. Energies. Vol. 13. Iss 20. 2020. doi: 10.3390/en13205481.

20. Патент № 2660285 C1 Российская Федерация, МПК G01R 31/08, G01R 15/14, H02H 7/26. Устройство защиты от искрения и способ его работы: № 2017135565: заявл. 05.10.2017: опубл. 05.07.2018 / А. С. Мкртумов, А. Н. Немцов, Ф. Н. Немцов. EDN IOHXTI.

21. Ерашова Ю.Н., Ившин И.В., Тюрин А.Н., и др. Испытания устройства защиты от дугового пробоя и искровых промежутков на срабатывание // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 3. С. 168-180.

22. Королев И.В., Валуев П.В., Бурдюков Д.А. Моделирование срабатывания УЗДП в электрических сетях 0,4 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 6(57). С. 124-127. EDN FOGLJW.

23. Патент на полезную модель № 199462 U1 Российская Федерация, МПК H02H 7/00, G01R 31/12, G01R 31/08. Генератор электрической дуги: № 2020116974: заявл. 22.05.2020: опубл. 02.09.2020 / А. Н. Тюрин, Ю. И. Солуянов, М. И. Шмуклер, И. В. Ившин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». EDN XZOSJX.

24. Монаков В.К., Кудрявцев Д.Ю., Пешкун В.А. Защита от дугового замыкания. Время-токовая характеристика устройства // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 6. С. 5-8. doi: 10.18635/2071-2219-2016-6-5-8. EDN XENJZZ.

25. Bucci G., Ciancetta F., Fioravanti A., et al. Testing System for the On-Site Checking of Magneto-Thermal Switches with Arc Fault Detection // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 18. doi: 10.3390/en13184652.

26. Hnatiuc B., Dordescu M. Tests de laboratoire pour les dispositifs AFDD // Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement. 2019. doi: ff10.18145/jitipee.v5i2.218.

27. Патент на полезную модель № 223814 U1 Российская Федерация, МПК G01R 31/28. Устройство для проверки аппаратов защиты от параллельного дугового пробоя и искровых промежутков на землю: № 2023131575: заявл. 01.12.2023: опубл. 05.03.2024 / И. В. Ившин, Ю. И. Солуянов, А. Н. Тюрин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет». EDN KDACAB.

Авторы публикации

Тюрин Александр Николаевич – канд. техн. наук, главный технолог, АО «Татэлектромонтаж». *Email: turinal@rambler.ru.*

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, профессор, почетный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент Ассоциации

«Росэлектромонтаж», председатель совета директоров АО «Татэлектромонтаж», председатель технического комитета по стандартизации ТК 337 «Электроустановки зданий», председатель комитета Российского Союза Строителей по энергоресурсосбережению, энергообеспечению предприятий и безопасности зданий и сооружений. *Email: info@roselmon.su.*

Ахметшин Азат Ринатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета. *Email: ahmetshin.ar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4424-7761.*

References

1. Goncharenko VS, Chechetina TA, Sibirko VI, et al. *Fires and fire safety in 2022: information and analytical collection.* Balashikha: FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia. 2023. (In Russ).

2. Gordienko DM, Lagozin AYu, Ryabikov AI, et al. New type of electrical network protection. *Fire fighting*. 2021;5:50-51. (In Russ).

3. Gracheva EI, Naumov OV, Sadykov RR. Some features of the study of the main reliability indicators of low-voltage devices. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2016;29(1):105–115. (In Russ).

4. Zhang J, Su G, Chen T, et al. Glowing contact in electrical fires: Experimental investigation and modeling on its heat intensity and thermal hazards. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023;45:102880. doi: 10.1016/j.csite.2023.102880.

5. Soluyanov Y, Tyurin A, Akhmetshin A. Test of Arc Fault Detection Devices for Operation from Spark Gaps and Arc Fault in an Electric Circuit of 0.4 kV. *2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2023;374-378. doi: 10.1109/UralCon59258.2023.10291069.

6. Korolev IV, Kondratyev OE, Valuev PV, et al. Analysis of the feasibility of using arc fault detection devices for comprehensive protection against fires caused by electrical equipment malfunctions. *Electric Power. Transmission and Distribution.* 2018; 47(2):128–131. (In Russ).

7. Gracheva EI, Safin AR, Sadykov RR. Research and evaluation of functional parameters of low-voltage devices. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(5–6):13–21. (In Russ).

8. Rashevskaya MA, Gudozhnikov AS, Kulikov AI, et al. Determination of characteristic signs of arc fault in low-voltage distribution networks. *Industrial Power Engineering*. 2022;8:12-21. doi: 10.34831/EP.2022.33.78.002. (In Russ).

9. Vasile C, D'Orchymont V, Meunier-Carns J, et al. Arcing Persistency Measurement for IEC62606 Arc-Fault Detection Device Certification. *2019 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering (SPCE Austin)*. 2019. doi: 10.1109/SPCE47297.2019.8950836.

10. Monakov VK, Kudryavtsev DYu, Kozyrev AA. Operating principle of the device for protecting electrical installations from arc faults. *ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical engineering policy*. 2014;1:28-30. (In Russ).

11. Müller P, Tenbohlen S, Maier R, et al. Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain. *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2010;1-7. doi: 10.1109/HOLM.2010.5619539.

12. Dubinin DV, Kuteinikov PD, Rashevskaya MA. Study of characteristics of low voltage electric arc. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2023;357(1):34-38. doi: 10.33979/2073-7408-2023-357-1-34-38. (In Russ).

13. Kharlamenkov AS. Feasibility of using arc flashover protection devices. *Fire and explosion safety*. 2021;30(2):117-122. (In Russ).

14. Pekhotikov VA, Smelkov GI, Ryabikov AI, et al. Prospects and problems of using arc flashover protection devices. *Occupational safety in industry*. 2019;11:18-23. doi: 10.24000/0409-2961-2019-11-18-23. (In Russ).

15. Gregory GD, Scott GW. The arc-fault circuit interrupter, an emerging product. *1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Conference Record. Papers Presented at the 1998 Annual Meeting (Cat. No.98CH36202)*. 1998. doi: 10.1109/ICPS.1998.692533.

16. Hnatiuc B, Turcu F, Hnatiuc M, et al. Detection of electric arc faults by Arc Fault Detection Devices. *EPE 2022 - Proceedings of the 2022 12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2022;239–244. doi: 10.1109/EPE56121.2022.9959773.

17. Ra W, Kong H. Comparison Study of Operation Characteristics of AFCI Products. *International Journal of Membrane Science and Technology*. 2023;1(1):201-208. doi: 10.15379/ijmst.v10i1.1446.

18. Lu Q, Ye Z, Zhang Y, et al. Analysis of the Effects of Arc Volt–Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults. *Energies*. 2019;12(2). doi: 10.3390/en12020323.

19. Ji H-K, Kim S-W, Kil G-S. Phase Analysis of Series Arc Signals for Low-Voltage Electrical Devices. *Energies*.2020;13(20). doi: 10.3390/en13205481.

20. Patent No. 2660285 C1 Russian Federation, IPC G01R 31/08, G01R 15/14, H02H 7/26. Spark protection device and its operating method: No. 2017135565: declared 05.10.2017: published 05.07.2018 / A. S. Mkrtumov, A. N. Nemtsov, F. N. Nemtsov. (In Russ).

21. Erashova YuN, Ivshin IV, Tyurin AN, et al. Tests of arc flash and spark gap protection device for operation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):168-180. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-168-180. (In Russ).

22. Korolev IV, Valuev PV, Burdyukov DA. Modeling the response of the UZDP in 0.4 kV electrical networks. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2019;57(6):124-127. (In Russ).

23. Patent for utility model No. 199462 U1 Russian Federation, IPC H02H 7/00, G01R 31/12, G01R 31/08. Electric arc generator: No. 2020116974: declared. 22.05.2020: published. 02.09.2020 / A. N. Tyurin, Yu. I. Soluyanov, M. I. Shmukler, I. V. Ivshin; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University". (In Russ).

24. Monakov VK, Kudryavtsev DYu, Peshkun VA. Arc fault protection. Time-current characteristic of the device. *Energy safety and energy saving*. 2016;6:5-8. doi: 10.18635/2071-2219-2016-6-5-8. (In Russ).

25. Bucci G, Ciancetta F, Fioravanti A, et al. Testing System for the On-Site Checking of Magneto-Thermal Switches with Arc Fault Detection. *Energies*. 2020;13(18). doi: 10.3390/en13184652.

26. Hnatiuc B, Dordescu M. Tests de laboratoire pour les dispositifs AFDD. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*. 2019. doi: ff10.18145/jitipee.v5i2.218.

27. Patent for utility model No. 223814 U1 Russian Federation, IPC G01R 31/28. Device for testing protection devices against parallel arc breakdown and spark gaps to earth: No. 2023131575: declared 01.12.2023: published 05.03.2024 / I. V. Ivshin, Yu. I. Soluyanov, A. N. Tyurin [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan State Power Engineering University". (In Russ).

Authors of the publication

Alexander N. Tyurin – "Tatelektromontazh" JSC, Kazan, Russia. *Email: turinal@rambler.ru.*

Yuri I. Soluyanov – "Roselectromontazh" Association, Moscow, Russia. *Email: info@roselmon.su.*

Azat R. Akhmetshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *Email: ahmetshin.ar@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4424-7761.*

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено ***01.07.2024 г.***

Отредактировано ***14.07.2024 г.***

Принято ***30.07.2024 г.***

© Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В.

(cc) BY

УДК 620.179 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64**

КОНТРОЛЬ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В.

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

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ. На предприятиях в эксплуатации находится большое количество теплообменников, которые работают в различных температурных условиях. В качестве греющего агента применяется пар, горячая вода, нагретые продукты нефтепереработки и других производств, в которых могут присутствовать окислы железа, алюминия, сульфат кальция, силикаты и др. От состояния поверхностей нагрева теплообменного оборудования зависит эффективность его работы. Загрязнения этих поверхностей различными отложениями резко снижают коэффициент теплопередачи, что приводит к значительному увеличению расхода тепла. Характер отложений зависит от свойств греющего агента и нагреваемой среды. ЦЕЛЬ. Цель заключается в оценке возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний. Наличие отложений изменяет массу конструкций и, следовательно, собственные частоты колебаний, по анализу которых можно определить не только наличие и толщину отложений, а также их вид. МЕТОДЫ. В работе показаны результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью аппаратно-программного комплекса, и расчетов собственных колебаний поверхностей теплообменного оборудования в программном комплексе ANSYS для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений. В качестве поверхностей теплообмена были смоделированы пластина, труба, также труба под давлением. РЕЗУЛЬТАТЫ. Результаты, полученные экспериментальным и расчетным путем, совпали, и был сделан вывод, что метод свободных колебаний позволяет определять не только наличие отложений на теплообменных поверхностях, но их толщину и вид. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Методом свободных колебаний можно своевременно обнаруживать отложения и контролировать их состояние, что в свою очередь позволит сократить общие эксплуатационные затраты, повысить энергоэффективность и продлить срок службы.*

Ключевые слова: *неразрушающий контроль; отложения; собственные частоты; теплообменное оборудование; метод свободных колебаний; ANSYS.*

Благодарности*: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена по Государственному заданию Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-03-2024-226/1 от 15.02.2024 г.*

Для цитирования: Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64.

CONTROL OF DEPOSITS ON PIPELINE SYSTEMS BY THE METHOD OF FREE OSCILLATIONS

Garnyshova E.V., Izmaylova E.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
garnyshova@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE. There are a large number of heat exchangers in operation enterprises that operate under various temperature conditions. Steam, hot water, heated products of oil refining and other industries, which may contain oxides of iron, aluminum, calcium sulfate,*

silicates, etc., are used as a heating agent. The efficiency of the heat exchange equipment depends on the condition of the heating surfaces. Contamination of these surfaces with various deposits dramatically reduces the heat transfer coefficient, which leads to a significant increase in heat consumption. The nature of the deposits depends on the properties of the heating agent and the heated medium. THE PURPOSE. The purpose is to assess the possibility of controlling deposits on the surfaces of heat exchange equipment by the free oscillation method. The presence of deposits changes the mass of structures and, consequently, the natural frequencies of vibrations, the analysis of which can determine not only the presence and thickness of deposits, as well as their appearance. METHODS. The paper shows the results of experimental studies conducted using a hardware and software package and calculations of natural vibrations of the surfaces of heat exchange equipment in the ANSYS software package to identify their dependence on the thickness and density of deposits. A plate, a pipe, and a pressurized pipe were modeled as heat transfer surfaces. RESULTS. The results obtained experimentally and computationally coincided, and it was concluded that the free oscillation method makes it possible to determine not only the presence of deposits on heat exchange surfaces, but their thickness and appearance. CONCLUSION. The free oscillation method can detect deposits in a timely manner and monitor their condition, which in turn will, reduce overall operating costs, increase energy efficiency and extend service life.

Keywords: *non-destructive testing; deposits; natural frequencies; heat exchange equipment; free oscillation method; ANSYS.*

Acknowledgements*: The work on the results of which the article was completed was carried out according to the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Agreement No. 075-03-2024-226/1 dated 02/15/2024.*

For citation: Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the method of free oscillations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 55-64. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64.

Введение *(Introduction)*

Цель исследования заключается в оценке возможности контроля отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний.

Зарастание поверхностей теплообменного оборудования и трубопроводных систем происходит из-за физических, химических и биологических процессов [1]. В качестве греющего агента применяется пар, горячая вода, нагретые продукты нефтепереработки и т.д. В воде находится много различных растворенных веществ, начиная от карбонатов кальция, магния и заканчивая различными солями. Все это в зависимости от температуры, давления, кипения оседает или выпадает в осадок, что становится причиной зарастания труб.

Задача неразрушающего контроля (НК) состоит в обнаружении дефектов и определении степени их допустимости. К эффектам разрушения можно отнести образование трещин, отложений, нарушение внутренней структуры материала и т.д. При решении задач НК используют акустические методы контроля. Это связано с тем, что они не требуют прямого контакта с контролируемым изделием, механически не нагружают объект контроля и не опасны для жизни и здоровья находящихся рядом людей [2].

В работе рассматривается один из методов НК – метод свободных колебаний (МСК), принцип которого заключается в изменении собственных частот детали или материала (объект контроля (ОК), при возникновении дефектов, что используется как информационный признак наличия дефекта. Иными словами, в основу МСК положены зависимости между упругими константами материала ОК и такими его свойствами, как прочность, пористость, упругость. Метод контроля, основанный на измерении частот собственных колебаний (ЧСК), находит применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литья, изделий [3, 4], используемых на железнодорожном транспорте, для контроля состояния трубопроводных систем и т.д.

Наряду с другими методами неразрушающего контроля, МСК кажется наиболее привлекательным и перспективным из-за безопасности и простоты операций контроля, малой трудоемкости, исключения субъективности в принятии решения, экономичности, возможности получения информации в документальной форме, способности контроля сложных изделий в труднодоступных местах, высокой чувствительности, экологической

чистоты [5, 6]. Рассматриваемый метод позволяет проводить диагностику объектов в условиях эксплуатации, учитывая форму и размеры изделий, без предварительной подготовки поверхности контроля, что существенно ускоряет и удешевляет процесс контроля [7].

Установлены следующие общие закономерности МСК, применяемые в современных дефектоскопах:

- наличие дефектов в ОК приводит к изменению спектра колебаний по сравнению с эталонным образцом. Если детализировать эту закономерность, то можно сказать, что в ОК появляются дополнительные моды колебаний, связанные с наличием нарушений во внутренней структуре. Колебательный процесс будет «дрожащим» из-за появления новых синусоидальных составляющих, вносимых дефектами;
- величина сдвига спектра зависит от места нахождения дефекта;
- наличие множественных дефектов во внутренней структуре ОК влечет за собой уменьшение длительности акустического отклика на возбужденные колебания;
- если дефект находится в «пучности» колебаний, то соответствующая частота сдвигается на «максимальную» величину для данного размера дефекта;
- нахождение дефекта в «узле» колебаний не приводит к сдвигу соответствующей частоты [3].

В процессе контроля измеряется частота собственных колебаний (ЧСК) изделия, соответствующая определенному виду колебаний, затем рассчитывается приведенная скорость распространения акустических волн (стержневая скорость звука C_i) по известной формуле:

$$f_i = F_i - C_i,$$

где f_i – частота собственных колебаний определенного вида *i*;

F_i – коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделия, вида возбуждаемых колебаний и коэффициента Пуассона.

$$C_i = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль нормальной упругости;
ρ – плотность.

По предварительно заданным корреляционным зависимостям определяются необходимые физико-механические свойства. Параметр C является информативным и достаточно полно характеризует физико-механические свойства изделий, определяющие их поведение при эксплуатации. При контроле МСК используется слышимый диапазон частот 20 Гц – 20 кГц.

МСК относится к методам, которые используют эталон. В качестве эталона формируют спектр акустических колебаний того или иного объекта. Поэтому основной проблемой при измерениях бывают трудности, связанные с формированием такого эталона [8]. Если же каждый объект имеет произвольные размеры и форму, то эти трудности возрастают пропорционально числу диагностируемых объектов. Именно это обстоятельство, как оказалось на практике, является основной причиной ограничения широкого применения метода свободных колебаний. В связи с этим, метод чаще всего используют на однотипных объектах, которые встречаются в большом количестве при серийном производстве или находятся в эксплуатации [9].

Научная значимость исследования состоит в разработке методики обнаружения и идентификации дефектов на поверхностях теплообменного оборудования по параметрам свободных колебаний, а также создании мобильного и компактного оборудования со специальным программным обеспечением, которое позволяет проводить экспресс контроль отложений в режиме реального времени.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики и оборудования, в получении результатов, которые могут быть использованы при контроле опасных производственных объектов и всех поверхностях теплообменного оборудования, а также в возможности внедрения на действующие производства.

Литературный обзор *(Literature review)*

Для реализации метода наиболее широкое распространение в отечественной промышленности нашли специальные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» двух модификаций: «Звук-203» и «Звук-107», в основу которых положен метод

свободных колебаний. Из известных зарубежных аналогов наиболее широкое применение в мировой практике нашли приборы типа «Grindo Sonic» бельгийской фирмы и «J.W. Lemmens N.V.», действие которых основано на использовании метода свободных колебаний, но с применением несколько отличающейся методики измерения и расшифровки спектра ЧСК. При этом приборы «Grindo Sonic», также как «Звук-203», не могут использоваться для контроля малогабаритных изделий [10, 11]. Совместные разработки с фирмой «Абразив» (Чехия) позволили применить этот метод не только в отечественной промышленности, но и в ряде зарубежных фирм, в таких развитых странах как Австрия, Германия, Индия, Италия, Китай, Польша, США, Чехия, Швейцария и др. не только для контроля абразивных инструментов, но и изделий из других материалов.В работах Гельмана Л.М. [12] по выявлению зависимости между декрементом затухания виброакустического сигнала и размера трещины в титановой лопатке первой ступени компрессора, установлена связь размера трещины с изменением декремента затухания. Наряду с Л.М. Гельманом исследования колебаний упругих тел с «дышащей» несплошностью (или трещиной) материала проводили Матвеев В.В. [13] и Ройтман А.Б. [14]. Эти методы используют различные параметры колебательного процесса, начиная от изменения собственных частот объекта исследования, и заканчивая такими характеристиками, как асимметрия волны цикла колебаний по длительности и максимальному отклонению на полуциклах разного знака. Также большой вклад в изучение, исследование и развитие МСК внесли Ваньков Ю.В. [5, 8], Ившин И.В., Кондратьев А.Е.

Наиболее широкое применение в отечественной и мировой практике указанный МСК нашел при контроле таких изделий с физико-механическими свойствами как: абразивные, огнеупорные, углеродные и углеграфитовые, из высокопрочной керамики и синтетических высокотвердых материалов, отливок из чугуна и других металлов; а также при контроле строительных изделий и диагностики состояний зданий, сооружений и других строительных конструкций, и частот собственных колебаний турбинных лопаток [15]. Применяемые в авиационной и космической технике многослойные конструкции из полимерных материалов наиболее эффективно контролируются именно МСК, хорошие результаты получены по применению этого метода для контроля сварных швов камер сгорания, разработаны методики для диагностики равноосных рабочих лопаток компрессора авиационного двигателя.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Ранее авторами были проведены экспериментальные исследования [16] с помощью аппаратно-программного комплекса по контролю отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний, состоящего из устройства для контроля толщины отложений и специализированной программы для регистрации, записи, обработки и анализа сигналов (рис. 1) [17].

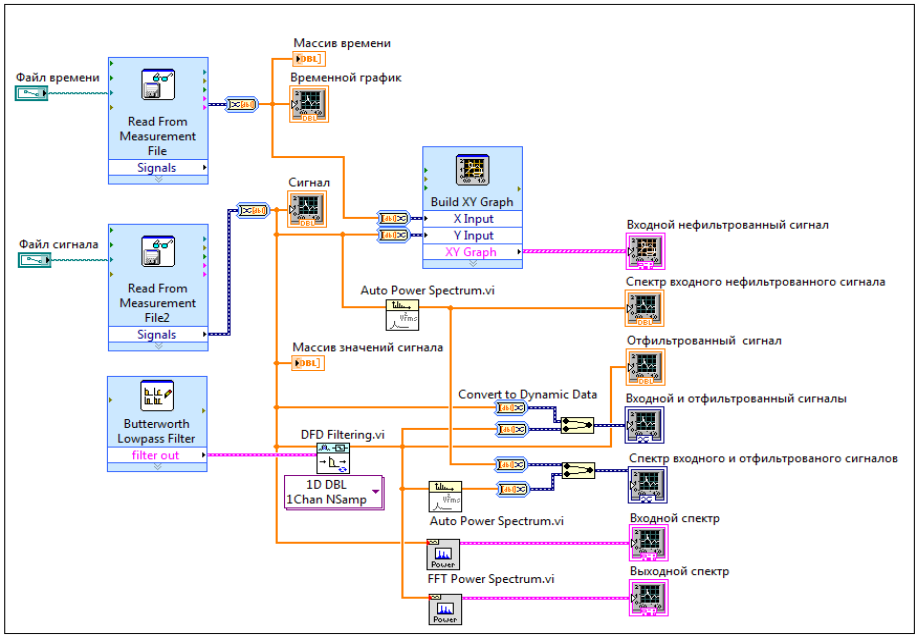


Рис. 1. Часть блок-диаграммы программы в LabVIEW

Fig. 1. Part of the block diagram of the program in LabVIEW

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

Программа позволяет переводить односторонний сигнал во временной области, и автоматически строить спектр мощности; усреднять спектр мощности сигнала времени; непрерывно фильтровать входной сигнал; вычислять предельную интеграцию сигнала путем интегрирования спектрограммы сигнала вдоль временной или частотной осей; отображать спектрограмму сигнала на графике интенсивности.

Для устранения недостатка, при котором колебания распространяются по всей площади поверхности теплообменного оборудования, применяется демпфирующая рамка, которая прижимается к исследуемой поверхности и ограничивает распространение колебаний только на интересующем нас участке. В качестве моделей поверхности теплообменного оборудования использовали пластину из структурной стали размером 400x160x2 мм и участок трубы длиной 400 мм из того же материала без дефектов, внешним диаметром – 159 мм, и толщиной 4 мм (рис. 2).

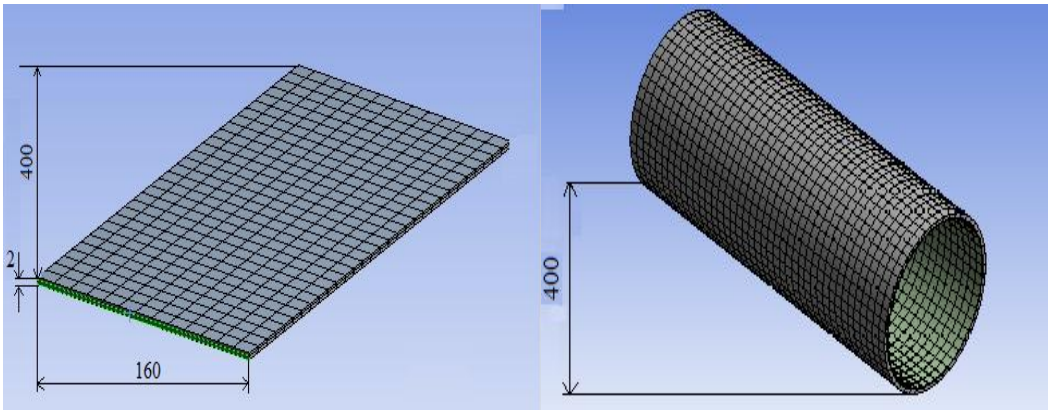


Рис. 2. Смоделированные чистые пластина и труба в ANSYS

Fig. 1. Simulated clean plate in ANSYS

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

Методика контроля заключается в возбуждении собственных колебаний контролируемого объекта, записи и обработки сигналов, проведении анализа спектра собственных частот и выдаче заключения о состоянии изделия [18]. В контрольно - измерительной аппаратуре, использующей МСК, обычно производят возбуждение колебаний в изделии с помощью удара. При этом необходимо обеспечить такие параметры удара и ударного устройства, при которых в изделии будут наилучшим образом возбуждаться колебания в необходимом для измерения частотном диапазоне [19].

По результатам экспериментальных исследований можно судить о том, что с увеличением толщины и плотности отложений частоты собственных колебаний увеличиваются. Далее в программном комплексе ANSYS были проведены расчеты собственных частот колебаний поверхностей теплообменного оборудования для выявления зависимости их от толщины и плотности отложений [20].

На них были добавлены отложения (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 мм) с разной плотностью. В качестве отложений были взяты оксиды кремния, кальция, магния, железа – характеристики которых приведены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Характеристики отложений, использованных в ANSYS

Characteristics of deposits used in ANSYS

Характеристики	**SiO_2**	**CaO**	**MgO**	**Fe_2O_3**
Плотность, г/см^3	*2.65*	*3.37*	*3.58*	*7.8*
Коэффициент Пуассона	0.262	0.25	0.3	0.29
Модуль Юнга, дин/см^2	$16.9\cdot10^{11}$	$2.0\text{-}2.5\cdot10^{11}$	$4.25\cdot10^{11}$	$21.2\cdot10^{11}$

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

***Результаты и обсуждение** (Results and Discussions)*

В таблице 2 и 3 приведены результаты расчета частот колебаний пластины и трубы с разными видами отложений в ANSYS. Толщина отложений для каждого вида 2.5 мм [21].

Таблица 2
Table 2

Результаты расчета некоторых частот колебаний пластины с разными видами отложений
Results of calculation of some oscillation frequencies of a plate with different types of deposits

№ моды	Частота (Гц)			
	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3
1	90.26	97.29	114.34	266.87
5	487.75	525.58	617.74	1443.11
10	975.76	1052.41	1231.22	2882.75
25	2627.76	2659.32	3118.33	7523.93
50	5361.94	5589.73	6573.45	15933.01
75	7948.53	8525.74	9985.71	23651.25
100	10576.21	11178.12	13051.46	31106.13

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

Таблица 3
Table 3

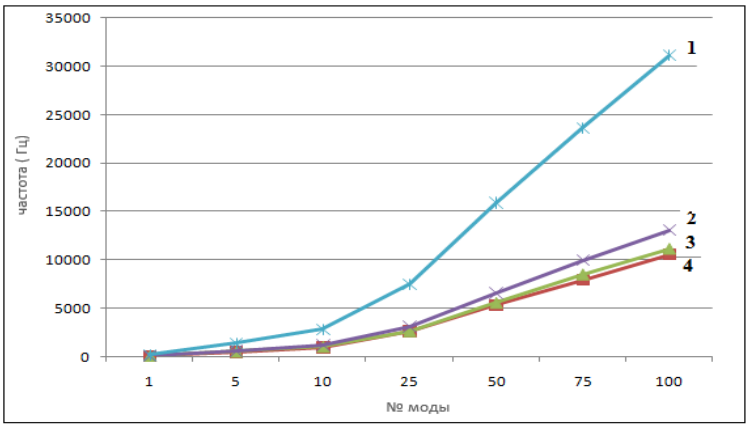
Результаты расчета некоторых частот колебаний трубы с разными видами отложений
Results of calculation of some oscillation frequencies of pipes with different types of deposits

№ моды	Частота (Гц)			
	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3
1	1352.7	1395.1	1584.8	1866.5
5	2287.9	2382.1	2564.4	3001.1
10	2632.9	2803.9	3101.6	3654.7
25	4383.6	4749.2	5565.1	6577.4
50	6549.8	7086.2	8764.1	10284.2
75	8100.3	8848.1	10409.2	12272.4
100	9481.5	9992.5	12190.1	14396.1

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

На рисунке 3 показаны зависимости собственных частот колебаний конструкций (а – пластина, б – труба) от плотности отложений, где цифрами на графиках обозначены: 1 – Fe_2O_3, 2 – MgO, 3 – CaO, 4 – SiO_2. Толщина отложений для каждого вида 2.5 мм.

а)



б)

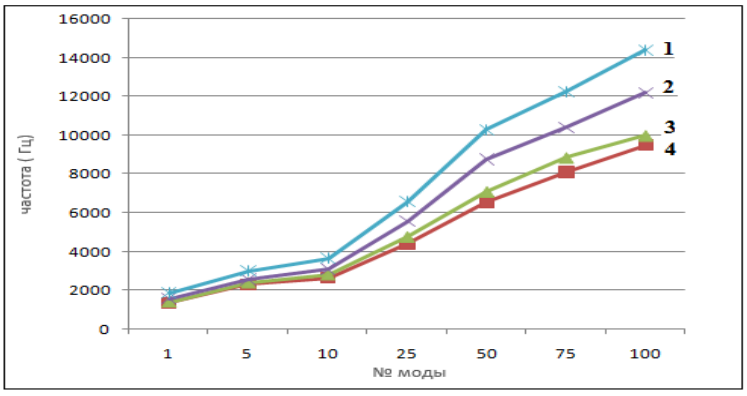


Рис. 3. График зависимости собственных частот колебаний от плотности отложений, где а) пластина, б) труба

Fig. 3. Graph of the dependence of natural frequencies of oscillations on sediment density, where a) plate, b) pipe

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

По графикам на рисунке 3 (а, б) видно, что с увеличением плотности отложений возрастают собственные частоты колебаний конструкции, как плоской, так и объемной формы.

Для того чтобы правильно продиагностировать состояние трубопроводов по анализу собственных частот, необходимо еще учитывать давление транспортируемой среды. Давление жидкости влияет на амплитудно-частотную характеристику трубопровода. Для определения изменения частот при нагружении трубопровода давлением, было смоделировано воздействие среды на внутреннюю стенку трубопровода (1 МПа) и осуществлен анализ структурно-жидкостного взаимодействия в ANSYS (TotalDeformation).

В таблице 4 приведены некоторые полученные собственные частоты колебаний конструкции объемной формы (трубы) при разных условиях. В качестве отложения использовался оксид кальция толщиной 2.5 мм.

Таблица 4
Table 4

Собственные частоты колебаний трубы при разных условиях
Natural frequencies of pipe vibrations under different conditions

№ моды	Частоты трубы с отложением без давления	Частоты трубы с отложением с давлением 1 МПа
1	432.3	475.1
15	1219.4	1286.4
25	2327.3	2516.6
50	3746.3	3855.7
75	5462.6	5769.1
100	7641.9	7949.5

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

На рисунке 4 показан график зависимости собственных частот колебаний трубы при созданном в нем давлении в 1 МПа.

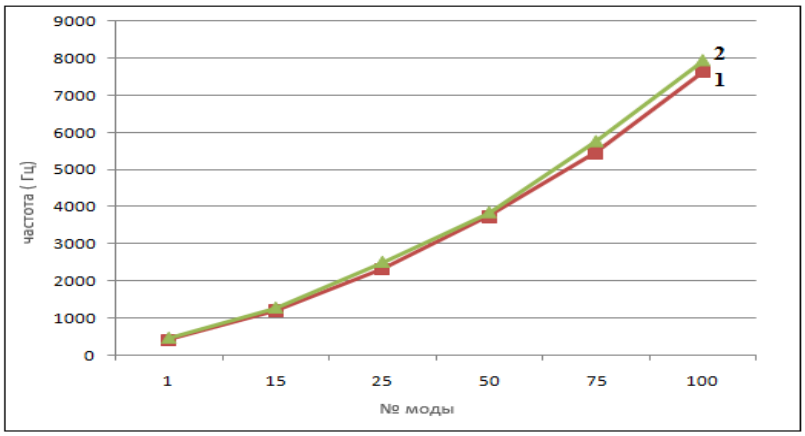


Рис. 4. График зависимости собственных частот колебаний трубы при созданном в нем давлении: 1 – чистая труба, 2 – труба с отложением

Fig. 4. Graph of the dependence of the natural frequencies of vibration of the pipe at the pressure created in it: 1 – clean pipe, 2 – pipe with deposits

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

Анализ графика на рисунке 4 показывает, что собственные частоты колебаний трубы (как чистой, так и с дефектами) возрастают при нагружении давлением. Причем у участков трубы с отложением изменение частоты больше, чем у чистой трубы.

Сделанный вывод по расчетам, выполненных в программном комплексе ANSYS, о том, что с увеличением толщины и плотности отложений увеличиваются частоты собственных колебаний конструкции, совпал с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований.

***Заключение** (Conclusions)*

Актуальной проблемой настоящего времени является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по созданию тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Проблемы энергоэффективности, уменьшение потерь теплоты, существенно влияют на технико-экономические показатели и капитальные затраты [22]. Методом свободных колебаний можно своевременно обнаруживать отложения и контролировать их состояние, что в свою

очередь позволит сократить общие эксплуатационные затраты, повысить энергоэффективность и продлить срок службы. Наличие отложений изменяет массу конструкций, следовательно, и собственные частоты колебаний, по анализу которых можно определить не только наличие и толщину отложений, но и их вид, так как разные отложения имеют разную плотность.

Литература

1. Wisner B.; Mazur K., Perumal V., et al. Acoustic emission signal processing framework to identify fracture in aluminum alloys. Eng. Fract. Mech. 2019. Pp. 367–380.

2. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. Materials & Design. 2020. vol. 196. pp.109093. doi: 10.1016 j.matdes .2020.109093.

3. Bonab M.M. Effects of different parameters on initiation and propagation of stress corrosion cracks in pipeline steels: A review. Metals 2019, 9, P. 590.

4. Mambetov R.F., Kushnarenko V.M., Hafizov, F.S. Causes of the field flowline weld joint rust-through damage. Pipeline Sci. Technol. 2020, 4. Pp. 98–107.

5. Ваньков Ю.В. Низкочастотные методы контроля. Метод свободных колебаний. Казань. Издательство КГЭУ, 2003. – 140 с.

6. Хатьков Д.Н. Применение информационного подхода к решению задачи дефектоскопии методом свободных колебаний. Журнал Труды МАИ. 2016. №88.

7. Козар, Н.К., Козар А.Н. Метод свободных колебаний для обнаружения межкристаллитной коррозии металлов: Монография. - Москва: Русайнс, 2016. - 205 с.

8. Ваньков Ю.В., Яковлева Э.Р. Об одном подходе к оценке затухания колебаний. Техническая акустика. 2005. Т.5. С.251–265.

9. Коварская Е.З., Московенко И.Б. Использование частот собственных колебаний при неразрушающем контроле физико-механических свойств материалов и изделий. Журнал «В мире НК». 2012. №4 (58). С.5–8.

10. Деловой журнал Точка опоры. №223 Февраль 2017 тема: Неразрушающий контроль https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/vehi-istorii-nerazrushaushego-kontrolya-v-rossii.

11. Интернет ресурс: https://armada-ndt.ru/articles/8341/?ysclid=lpcic4e0mv20670480.

12. Gelman Leonid M., Gorpinich Sergey V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation. Mechanical System and Signal Processing. Vol. 14. Iss. 3. May 2000. P. 343–351.

13. Матвеев В.В., Богинич О.Е. Приближенное аналитическое определение вибродиагностических параметров наличия трещины в упругом теле при супергармоническом резонансе. Проблемы прочности. 2010. № 4. С. 5–19.

14. Ройтман А.Б. Вибрационная диагностика «дышащих» трещин в изделиях. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. № 1. С. 58–66.

15. Ваньков Ю.В., Бусаров А.В., Александрович Ю.П. Контроль клепаного соединения лопаток ГТУ методом свободных колебаний. Журнал «В мире НК». 2012. №4 (58). С.10–12.

16. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний. ИВУЗ. Проблемы энергетики. 2020. Т.22. № 4. С.106-114.

17. Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., Гарнышова Е.В., и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615470 «2RSoundSA». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 апреля 2019.

18. Shvetsov I.V., Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., et al. Reducing labor input of monitoring condition of heat exchange equipment surfaces. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 939 (2020) 012072.

19. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Ульябаева Ш.У. Анализ результатов численного моделирования колебательных процессов в бездефектных и дефектных трубопроводах. Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14 № 3 (55). С. 38 – 47.

20. Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., Ваньков Ю.В. Определение информативных критериев для контроля трубопровода с применением ANSYS. Сборник нац. науч.-практ. конф. «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве». – Казань: КГЭУ, 2020. Т. 1, С. 413 – 416.

21. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В., и др. Контроль отложений поверхностей теплообмена по анализу их частот колебаний. Сборник материалов 78-й Науч.-техн. конф. Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2023 СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 493 с.

22. Ваньков Ю.В., Измайлова Е.В., Гарнышова Е.В., и др. Повышение энергоэффективности контролем трубопроводных систем: Монография – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 142 с.

Авторы публикации

Гарнышова Елена Владимировна – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6320-9926. garnyshova@mail.ru*

Измайлова Евгения Вячеславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *evgeniya-izmailova@yandex.ru*

References

1. Wisner B.; Mazur K., Perumal V., et al. Acoustic emission signal processing framework to identify fracture in aluminum alloys. Eng. Fract. Mech. 2019, 210, Pp. 367–380.

2. Kong I.Y., Bennett C.J., Hyde C.J. A review of non-destructive testing techniques for the in-situ investigation of fretting fatigue cracks. Materials & Design. 2020, vol. 196, pp.109093. doi: 10.1016 j.matdes.2020.109093

3. Bonab, M.M. Effects of different parameters on initiation and propagation of stress corrosion cracks in pipeline steels: A review. Metals 2019, 9, P. 590.

4. Mambetov, R.F.; Kushnarenko, V.M.; Hafizov, F.S. Causes of the field flowline weld joint rust-through damage. Pipeline Sci. Technol. 2020, 4. Pp. 98–107.

5. Vankov Yu.V. Low frequency control methods. Free vibration method. Kazan. Publishing house KGEU, 2003. – P. 140.

6. Khatkov D.N. Application of information approach to the solution of a problem of a defectoscopy by a method of free oscillations. The journal Proceedings of MAI. 2016. No.88.

7. Kozar, N.K., Kozar A.N. Free oscillation method for detecting intercrystalline corrosion of metals: Monograph. - Moscow: Rusains, 2016. - 205 p.

8. Vankov Yu.V., Yakovleva E.R. About one approach to an estimation of free vibrations decay. Technical acoustics. 2005. T.5. P.251 – 265.

9. Kovarskaya E.Z., Moskovenko I.B. Use of natural oscillation technique in non-destructive evaluation of physical mechanical properties of materials and products. In the world of non-destructive testing. 2012. No. 4 (58). P.5 – 8.

10. Business magazine Point of Support. No. 223 February 2017 topic: Non-destructive testing https://www.to-inform.ru/index.php/arkhiv/item/vehi-istorii-nerazrushaushego-kontrolya-v-rossii.

11. Internet resource: https://armada-ndt.ru/articles/8341/?ysclid=lpcic4e0mv20670480.

12. Gelman Leonid M., Gorpinich Sergey V. Nonlinear vibroacoustical free oscillation method for crack detection and evaluation. Mechanical System and Signal Processing. Vol. 14. Iss. 3. May 2000. P. 343–351.

13. Matveev V.V., Boginich O.E. Approximate analytical determination of the vibration diagnostic parameters of the presence of a crack in an elastic body with superharmonic resonance. Strength problems. 2010. No. 4. Pp. 5–19.

14. Roitman A.B. Vibration diagnostics of "breathing" cracks in products. Technical diagnostics and non-destructive testing. 2000. No. 1. Pp. 58–66.

15. Vankov Yu.V., Busarov A.V., Alexandrovich Yu.P. Gas-turbine unit blades. Inspection of riveted connection with free oscillation technique. The magazine "In the world of NK". 2012. №4 (58). Pp.10–12.

16. Garnyshova E.V., Izmailova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. Institute of Higher Educational Institutions. Energy problems. 2020. T.22. No. 4. P.106 – 114.

17. Izmailova E.V., Vankov Yu.V., Garnyshova E.V., Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R. Certificate of state registration of the computer program No. 2019615470 “2RSoundSA”. Registered in the Register of Computer Programs on April 26, 2019.

18. Shvetsov I.V., Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Y.V., Zagretdinov A.R. Reducing labor input of monitoring condition of heat exchange equipment surfaces. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 939 (2020) 012072, doi:10.1088/1757-899X/939/1/012072.

19. Gaponenko S.O., Kondratyev A.E., Ulyabaeva G.Sh. Numerical simulation of oscillatory process in defect-free and defective pipelines. Bulletin of the Kazan State Energy University. 2022. T. 14. No. 3 (55). pp. 38 – 47.

20. Izmailova E.V., Garnyshova E.V., Vankov Yu.V. To identify informative criteria for pipeline

monitoring with the use of ANSYS. Collection of National scientific-practical conf. “Instrumentation and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services.” – Kazan: KGEU, 2020. T. 1, pp. 413-416.

21. Garnyshova E.V., Izmailova E.V., Vankov Yu.V., Zagretdinov A.R. Control of deposits of heat exchange surfaces by analyzing their vibration frequencies. Collection of materials 78th Scientific and Technical. conf. St. Petersburg NTO RES named after. A.S. Popov, dedicated to Radio Day. 2023 SPb.: SPbSETU "LETI". 493 pp.

22. Vankov Yu.V., Izmailova E.V., Garnyshova E.V., Zagretdinov A.R. Increasing energy efficiency by monitoring pipeline systems: Monograph – Kazan: Kazan University Publishing House, 2022. – 142 p.

Authors of the publication

Elena V. Garnyshova – Kazan State Power Engineering University (KSPEU). *ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6320-9926. garnyshova@mail.ru*

Evgeniya V. Izmaylova – Kazan State Power Engineering University (KSPEU). *evgeniya-izmailova@yandex.ru*

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

Получено ***06.06.2024 г.***

Отредактировано ***10.06.2024 г.***

Принято ***17.06.2024 г.***

© Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Немировский А.Е., Valtchev S.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

(cc) BY

УДК 621.215.2 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74**

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СРОКА СЛУЖБЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ

Цицонь И.И.[1], Абдуллазянов Э.Ю.[1], Грачева Е.И.[1], Немировский А.Е.[2], Valtchev S.[3]

[1]Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия
[2]Вологодский Государственный Университет, г. Вологда, Россия
[3]Universidade NOVA of Lisbon, Portugal
honey.roditel@mail.ru[1]

Резюме: *В работе представлена методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий (КЛ) напряжением 10 кВ для различных видов изоляции и условий эксплуатации. Разработаны зависимости, рекомендуемые для уточнения параметров КЛ с учетом различных эксплуатационных режимов. Результаты исследования могут быть использованы для практического применения и будут способствовать уменьшению числа аварий, возникающих вследствие тепловых пробоев КЛ из-за неверного выбора параметров КЛ. ЦЕЛЬ. Исследовать температурные параметры КЛ 10 кВ с учетом различных способов их прокладки и коэффициентов загрузки для климатических условий Республики Татарстан. МЕТОДЫ. Используются методы расчета температурных параметров КЛ и их срока службы, методы статистической обработки данных, методы аппроксимации функций. Применяется программный комплекс «ELCUT» для осуществления визуализации полученных результатов при проведении расчетов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Представлены результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ), изоляцией из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ) и изоляцией из полиэтилена (ПЭ) при их прокладке в воздухе, в земле, в земле в трубе с учетом коэффициентов загрузки кабельных линий. Показаны результаты расчетов сроков службы КЛ. Определены значения оптимальных коэффициентов загрузки КЛ для снижения скорости теплового старения изоляции при различных условиях эксплуатации. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты проведенных исследований и выполненных расчетов могут быть использованы для оценки и выбора оптимальной загрузки КЛ 10 кВ на этапах эксплуатации и проектирования систем электроснабжения.*

Ключевые слова: *кабельные линии; температурные параметры; старение изоляции; срок службы; визуализация температурных процессов; коэффициент загрузки.*

Для цитирования: Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Немировский А.Е., Valtchev S. Методика расчета температурных параметров и срока службы кабельных линий напряжением 10 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74.

METHOD OF CALCULATION OF TEMPERATURE PARAMETERS AND SERVIC LIFE OF CABLE LINES WITH A VOLTAGE OF 10 kV

Tsitson I.I.[1], Abdullazyanov E.Yu.[1], Gracheva E.I.[1], Nemirovsky A.E.[2], Valtchev S.[3]

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
[2]Vologda State University, Vologda, Russia
[3]Universidade NOVA of Lisbon, Portugal
honey.roditel@mail.ru[1]

Abstract: *RELEVANCE. The paper presents a method for calculating the temperature parameters and service life of cable lines (CL) with a voltage of 10 kV for various types of insulation and operating conditions. Dependencies have been developed that are recommended for clarifying the parameters of the CL, taking into account different operating modes. The results of the study can be used for practical application and will contribute to reducing the number of accidents resulting from thermal breakdowns of CL due to incorrect selection of CL parameters. PURPOSE. To investigate the temperature parameters of 10 kV CL, taking into account various methods of laying them and load factors for the climatic conditions of the Republic of Tatarstan. METHODS. Methods for calculating the temperature parameters of CL and their service life, methods of statistical data processing, and methods for approximating functions are used. The ELCUT software package is used to visualize the results obtained during calculations. results. The results of calculations of the temperature parameters of 10 kV CL with paper-impregnated insulation (BPI), polyvinyl chloride plastic (PVC) insulation and polyethylene (PE) insulation during their laying in air, in the ground, in the ground in a pipe, taking into account the load coefficients of cable lines, are presented. The results of calculations of the service life of the CL are shown. The values of the optimal load coefficients of the CL are determined to reduce the rate of thermal aging of insulation under various operating conditions. conclusion. The results of the conducted research and calculations can be used to evaluate and select the optimal load of 10 kV CL at the stages of operation and design of power supply systems.*

Keywords: *cable lines; calculation of temperature parameters; insulation aging; service life of cable lines; visualization of temperature processes; loading factor.*

For citation: Tsitson I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Nemirovsky A.E., Valtchev S. Method of calculation of temperature parameters and servic life of cable lines with a voltage of 10 kV. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 65-74. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-65-74.

Введение *(Introduction)*

Современная инфраструктура электротехнических комплексов развивается в ускоренном режиме, что приводит к увеличению мощности нагрузок на промышленных предприятиях. КЛ, как известно, являются одними из основных видов электрооборудования, предназначенным для передачи электроэнергии. Правильный выбор таких характеристик, как, тип изоляции, способы прокладки и сечения для конкретных условий эксплуатации является одной из важных задач при проектировании систем электроснабжения. Однако, в ряде случаев КЛ выходят из строя до истечения паспортного срока службы ($T_{сл}$), который заявлен производителем. В предлагаемой статье представлена методика расчета температурных параметров КЛ, а также определения скорости старения изоляции, определяющей расчетный $T_{сл}$ для КЛ.

Целью исследования является проведение расчетов температурных параметров и анализ технических характеристик КЛ 10 кВ с различными типами изоляции, материалами жилы, способами прокладки и $k_{зг}$, а также определение расчетных $T_{сл}$ исследуемых КЛ и расчет их оптимальной загруженности.

Научной значимостью исследования является проведение расчетов с помощью специализированного программного комплекса ELCUT и получение результатов в виде температурных диаграмм и графиков, а также анализ полученных зависимостей с помощью аппроксимации.

Практической значимостью исследования является получение в результате расчетов итоговых $k_{зг}$, которые позволят наиболее точно выбирать режим загрузки КЛ 10 кВ, что позволит избежать нежелательного перегрева при эксплуатации сетей и предотвратить снижение $T_{сл}$. Полученные в результате расчетов коэффициенты являются новыми полученными результатами, числовые значения которых отсутствуют в учебных пособиях и технической литературе.

Ниже представлен анализ некоторых работ ученых, проводящих исследования в данной области.

Так, авторами Грачевой Е.И. и Муравьевым Г.Г. в [1] исследованы температурные режимы и параметры КЛ. В работе выявлены зависимости влияния технических характеристик и $k_{зг}$ кабеля на температуру и потери вследствие нагрева.

Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. в [2] провели оценку потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения с учетом нагрева проводов и

КЛ. Приведены расчеты температуры жилы КЛ с учетом температуры окружающей среды. Полученные результаты позволяют установить, как влияет температура окружающей среды на тепловые потери в КЛ в различных эксплуатационных режимах. А в [3] выявлены возможные погрешности при расчете потерь на нагрев в КЛ при учете таких параметров, как сопротивление линии и температура окружающей среды. Показана зависимость потерь мощности от нагревания проводников, вследствие токов нагрузки различной величины.

Грачевой Е.И. и Гиззатуллиной Е.Е. в [4] представлены разработанные модели для оценки надежности элементов системы электроснабжения.

Титковым В.В. в [5] дан анализ и оценка теплового режима работы трехфазной КЛ, а также исследовано влияние токов экранов на тепловой режим. Предложена математическая модель расчета температурного поля КЛ при различных сочетаниях токов нагрузок в жилах КЛ с учетом взаимообратной магнитной связи. Данная модель позволяет визуально оценить температурное поле вокруг КЛ, а ученым Ковригиным Л.А. в [6] исследованы параметры теплового состояния КЛ 10кВ при оценке температурных полей и токовых нагрузок в программном комплексе ANSYS. С помощью данной программы автор смоделировал рассеивание температурных полей в КЛ при различных токовых нагрузках, условиях прокладки и температуры окружающей среды.

Гладышева М.М., Сухачева Е.К., Хатюшина Т.В. в [7] исследовали технические характеристики КЛ, а также возможные математические модели для выбора параметров КЛ, расчета удельного сопротивления материала кабеля с учетом температуры окружающей среды и потерь напряжения.

Грачевой Е.И., Горловым А.Н., Шакуровой З.М., Табачниковой Т.В. в [8] показан алгоритм оценки эквивалентного сопротивления схем цеховых сетей с учетом нагрева проводников и предложена методика расчета температуры жил проводников с учетом температуры окружающей среды.

Коржов А.В., Сидоров А.И., Томашева Е.В. в [9] исследовали магнитное поле в КЛ, обусловленное различными токовыми нагрузками и физическими процессами при различных температурах окружающей среды и оценили степень разрушающего воздействия негативных факторов, в том числе тепловых, на изоляцию КЛ.

Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. в [10] предложили методику расчета температуры нагрева изоляции КЛ с учетом влияния рядом проложенных КЛ при использовании поправочных коэффициентов и Ильичевым Н.Б. и Вермаховским А.Н. в также [11] проведено исследование температуры изоляции жил КЛ по разработанной авторами методике.

Лебедев Д.В., Зайцев Е.С. в [12] предложили математический алгоритм расчета температуры жилы высоковольтного однофазного кабеля с изоляцией из СПЭ в режиме реального времени на основе данных о распределенной температуре экрана и токовой нагрузке в жиле, а Зализный Д.И. и Широков О.Г. в [13] разработали математическую модель тепловых процессов трехжильных силовых КЛ, позволяющую в реальном времени рассчитывать температуры жил на основе известных значений температуры его поверхности и температуры окружающей среды. Для подтверждения достоверности полученных результатов авторами проведены лабораторные и экспериментальные испытания.

R. Gono, S. Rusek, M. Kratky и Z. Leonowicz в [14] исследуют параметры надежности элементов распределительных систем, а также возможности оптимизации технического обслуживания систем электроснабжения, в том числе КЛ.

K. Chen, Y. Yue, Y. Tang в [15] предлагают метод оценки температуры жил КЛ 10 кВ с помощью специальных датчиков на примере железнодорожных линий электропередач. Представлены и проанализированы также различные методы определения температуры жил и выявлено влияние негативных факторов, которые приводят к снижению $T_{сл}$ изоляции.

R. Jongen; E. Gulski; J. Smit в [16] исследовали и установили, как температура окружающей среды влияет на неисправности соединений КЛ среднего напряжения, а также на нагрев изоляции жил КЛ, разработки по данной тематике представили в [17] R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smit; A.L.J. Janssen.

Итальянскими авторами T.Bragatto; A.Cerretti; L.D'Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Maccioni в [18] проведено исследование процессов нагрева КЛ токами короткого замыкания, протекающими через экраны кабеля. Предложена тепловая модель, применяемая для оценки эффектов CR при нагреве КЛ и соединений во время отказов.

Как показывает практика, исследования, связанные с анализом температурных параметров КЛ среднего напряжения, являются актуальными.

Отличие представленной работы от результатов исследований, проводимых советскими, российскими и зарубежными учеными, заключается в разработанной методике расчета параметров нагрева элементов конструкции КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации и использовании программного обеспечения для оценки температурных характеристик.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Методика расчета температурных параметров кабельных линий

Для исследования температурных параметров КЛ при различных условиях эксплуатации и способах прокладки- в воздухе, в траншее или в земле в трубе, рассмотрим трехжильные КЛ сечением 70 мм^2 с расчетным током $I_р$=120 А. Среднемесячная летняя температура по республике Татарстан составляет 20°С согласно климатическим и метеорологическим данным за 2023 год.

Марка, вид изоляции и материал жил КЛ представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Марка, вид изоляции и материал жил КЛ
Brand, type of insulation and material of the cores

Марка КЛ	Изоляция	Материал жилы	Наличие брони
ВВГ	ПВХ изоляция	Медь	Отсутствует
АВВГ		Алюминий	
ААШв	БПИ	Алюминий	Отсутствует
ППГ	Изоляция из полиэтилена	Медь	Отсутствует
АППГ		Алюминий	

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

Для проведения расчетов приняты следующие $k_{зг}$ в зависимости от материала токопроводящих жил КЛ с постоянной нагрузкой:

– для алюминиевых жил $k_з$= 0,88,

– для медных жил $k_з$= 0,7.

Значения $k_{зг}$ приняты на основании данных ПУЭ.

На рисунке 1 представлена типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ с обозначением термических сопротивлений. Для исследования приняты трехжильные КЛ сечением 70мм^2.

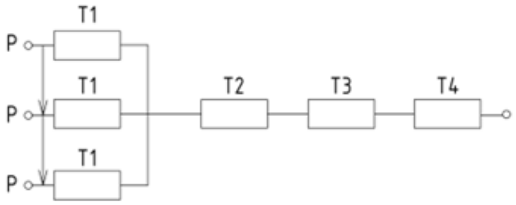


Рис. 1. Типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ

Fig. 1. Typical thermal equivalent circuit of a three-core cable

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

Описание элементов схемы замещения:

Р-потери в жилах КЛ;

T_1- тепловое сопротивление между жилой и оболочкой КЛ;

T_2- тепловое сопротивление между оболочкой и броней;

T_3- тепловое сопротивление наружного защитного покрытия;

T_4- тепловое сопротивление среды, окружающей КЛ.

Расчет проводится на основании действующего на территории РФ ГОСТ Р МЭК 60287-2-1-2009, в котором представлена методика с соответствующими формулами для определения тепловых сопротивлений КЛ 10кВ и температур жил для различных способов прокладки, с различными типами изоляции и для различной температуры окружающей среды.

В таблице 2 представлены результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах прокладки, с $k_{зг}$=0,88 для алюминиевых жил, $k_{зг}$=0,7 для медных жил.

Таблица 2
Table 2

Результаты расчетов температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах прокладки, с $k_{зг}$=0,88 для алюминиевых жил, $k_{зг}$=0,7- для медных жил
The results of calculations of temperature parameters of cable 10 kV for various laying methods, with cpu=0.88 for aluminum cores, cpu= 0.7 for copper cores

Марка КЛ	Способ прокладки	T_1 К·м/Вт	T_2 К·м/Вт	T_3 К·м/Вт	T_4 К·м/Вт	$T_{каб}$ При $t_{окр}$=20 °С
ААШв	Земля	0,05	0	0,064	0,88	65,7 °С
	Земля+труба	0,05	0	0,064	1,03	77,6 °С
	Воздух	0,05	0	0,064	0,8	69,8 °С
ВВГ	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	47,4 °С
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	54,6 °С
АВВГ	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	65,1 °С
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	77,0 °С
ППг	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	46,3 °С
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	55,4 °С
АППг	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	63,3 °С
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	78,4 °С

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

Таким образом установлено, что температура жил КЛ зависит от $k_{зг}$, способа прокладки и температуры окружающей среды. КЛ с алюминиевыми жилами, работающими с $k_{зг}$=0,88 и проложенными в земле в трубе имеют наибольший нагрев из-за условий прокладки и нарушения теплообмена с окружающей средой, что приводит к ускоренному старению изоляции.

Проведение расчетов в программном комплексе ELCUT

Для визуализации расчетов и определения теплового распределения внутри КЛ 10 кВ использован программный комплекс ELCUT. Данное программное обеспечение позволяет визуально оценить распределение температуры внутри конструкции КЛ на основании расчетных данных и оценить степень нагрева оболочки изоляции. Для проведения расчетов в качестве примера рассмотрим КЛ марки АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{зг1}$=0,7 и $k_{зг2}$=0,88 с температурой окружающей среды 20°С, чтобы оценить влияние этого параметра на нагрев жил КЛ.

В результате исследования получены температурные диаграммы рассеивания тепла внутри конструкции КЛ с цветовым эффектом ранжирования температур. Структура диаграммы представлена для трехжильной КЛ с многослойной оболочкой и различной степенью нагрева каждого из слоев.

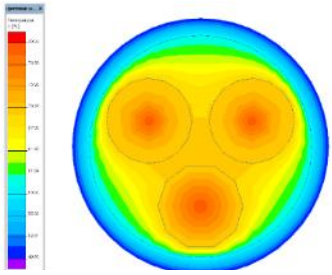


Рис. 2. Диаграмма термических процессов внутри КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг1}$=0,7 при прокладке в земле в трубе

Fig. 2. Diagram of thermal processes inside the cable AVVG-3x-70 10 kV with k_{zg1}=0.7 when laying in the ground in a pipe

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

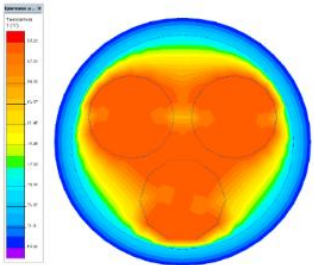


Рис. 3. Диаграмма термических процессов внутри КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг2}$=0,88 при прокладке в земле в трубе

Fig. 3. Diagram of thermal processes inside the cable AVVG-3x-70 10 kV with k_{zg2}=0.88 when laying in the ground in a pipe

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

Для контроля и ранжирования температур по цвету используется шкала соответствия, представленная на рисунке 4. Красная зона соответствует температуре выше 80°С, оранжевая зона соответствует температурному диапазону 56-80°С, желтая зона соответствует температурному диапазону 42-56°С, зеленая зона соответствует температурному диапазону 35-42°С и голубая зона соответствует температурному диапазону ниже 35°С.

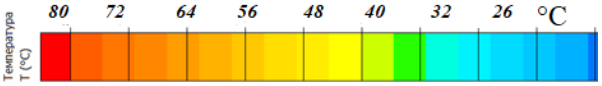


Рис. 4. Шкала соответствия ранжирования температур по цветам

Fig. 4. Correspondence scale for ranking temperatures by colors

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

В результате исследований тепловых параметров КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{зг1}$=0,7, $k_{зг2}$=0,88 с помощью программы Elcut получены температурные диаграммы с указанием температур каждого слоя исследуемой КЛ. При этом показано, что наибольший нагрев имеет токопроводящая жила и ее оболочка- при $k_{зг2}$=0,88 это значение варьируется в диапазоне 77-79°С (вблизи красной зоны), для $k_{зг1}$=0,7 это значение составляет 57-59°С (вблизи желто-оранжевой зоны). С переходом от внутреннего к внешнему слою температура жил КЛ снижается, что показывает шкала соответствия (рис.4). При этом точное значение изменения температуры при переходе от слоя к слою оценить сложно, так как существуют погрешности при проведении расчетов.

Результаты исследований с помощью температурных диаграмм показали, что КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг2}$=0,88 при прокладке в земле в трубе нагревается сильнее КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ с $k_{зг1}$=0,7 на 19-21 °С с учетом погрешности применяемого программного комплекса, равной 2-3°С.

Расчет скорости старения изоляции КЛ

При проведении исследования установлено, что распределение тепла от токопроводящей жилы к оболочке происходит быстрее при прокладке КЛ в воздухе, так как в данном случае не нарушен теплообмен с окружающей средой. Проведем расчет скорости старения и расчетного $T_{сл}$ изоляции для АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг1}$=0,82 и $k_{зг2}$=0,88 при прокладке в земле в трубе, так как при таком режиме эксплуатации КЛ испытывает наибольший нагрев. При $k_{зг1}$=0,82 температура нагрева жил исследуемой КЛ составляет 70°С, что является длительно допустимой температурой жилы в нормальном режиме для ПВХ изоляции по справочным данным.

Для расчета скорости старения изоляции используем закон Аррениуса. Уравнение зависимости скорости термической реакции от температуры КЛ по закону Аррениуса определяется соотношением (1)

$$t_{p1} e^{\frac{-W_a}{kT_1}} = t_{p2} e^{\frac{-W_a}{kT_2}} \quad (1),$$

где

t_{p1} и t_{p2} – расчетный $T_{сл}$ при значениях температур T_1 и T_2 соответственно;

W_a – энергия активации в расчете на одну молекулу;

k – постоянная Больцмана (1,381649×10^{-23} Дж/К);

T_1 и T_2 – значения абсолютных температур исследуемых КЛ соответственно.

Исследуем динамику старения изоляции для КЛ АВВГ-3х-70 10кВ с $k_{зг1}$=0,82 (что соответствует нормальной температуре эксплуатации 70°С для данного типа изоляции) и $k_{зг2}$=0,88 (что соответствует расчетному значению температуры =77°С при эксплуатации КЛ в земле в трубе).

$$\frac{t_{p(70)}}{t_{p(77)}} = e^{\frac{62450}{8,31}\left(\frac{1}{273+70}-\frac{1}{273+77}\right)} = 1,55 \quad (2)$$

Таким образом, в течение длительной работы КЛ (более 3 часов непрерывной работы в сутки) при $k_{зг2}$=0,88 и соответствующей температуре= 77°С - реакция термической деструкции в ПВХ-изоляции протекает в 1,55 раз быстрее, чем при аналогичных условиях и температуре жил КЛ= 70°С с $k_{зг1}$=0,82.

Паспортный $T_{сл}$ для КЛ составляет 30 лет или 262800 часов. Учитывая, что при перегрузке на 9% относительно допустимого $k_{зг1}$=0,82, изоляция из ПВХ подвергается

воздействию повышенной температуры =77°С, при этом паспортный $T_{сл}$ снижается на 27-30% и составляет, примерно, 19-20 лет с учетом погрешности 5%.

Построим график зависимости расчетного $T_{сл}$ для АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ и аппроксимируем полученную функцию. В качестве примера покажем график функции для экспоненциальной зависимости на основании проведенных расчетов.

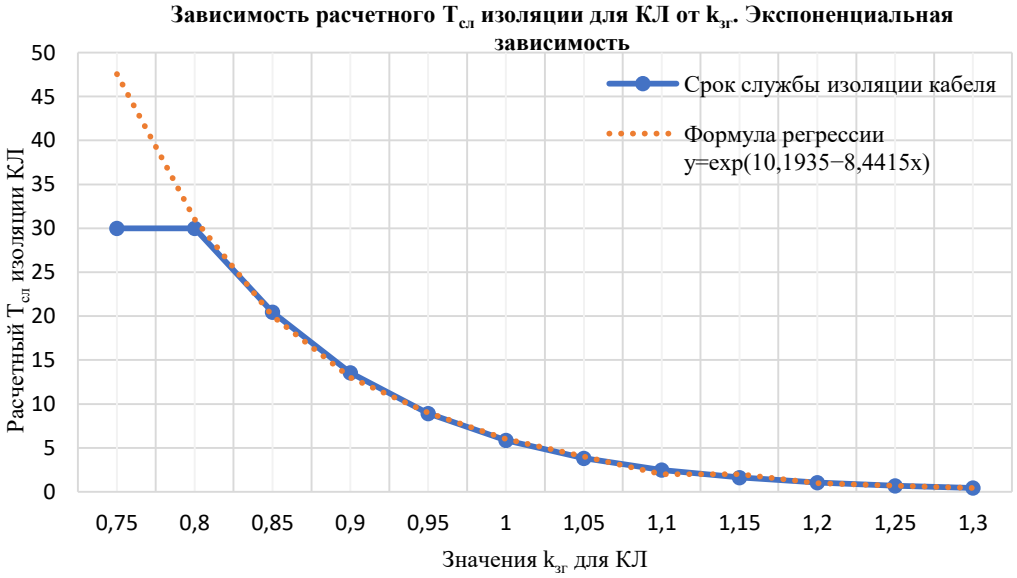


Рис. 5. График зависимости расчетного $T_{сл}$ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$, выраженной экспоненциальной зависимостью

Fig. 5. Dependence of the service life of the AVVG-3x-70 10kV cable when laying in the ground in a pipe on the load factor of the cable line, expressed as an exponential dependence

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

В таблице 3 приведены результаты вычислений параметров рассматриваемых аппроксимирующих функций.

Таблица 3
Table 3

Аппроксимирующие функции
Approximating functions

Марка КЛ	Уравнение аппроксимации	Вид аппроксимирующей функции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
АВВГ-3х-70	$y=-430,1165x^3+1537,8834x^2-1839,1736x+737,0477$	Полином 3-ей степени (кубическая)	0,9973	13,9
	$y=-51,369x+62,031$	Линейная	0,7855	193,8
	$y=exp(10,1935-8,4415x)$	Экспоненциальная	0,9984	1,5
ААШв-3х-70	y=exp(9,4081-8,3726x)	Экспоненциальная	0,9795	4,6
АППГ-3х-70	y=exp(9,7698-8,1386x)	Экспоненциальная	0,9284	7,6

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

Проведенные расчеты и полученные результаты показывают, что наиболее достоверной функцией, описывающей зависимость расчетного $T_{сл}$ КЛ 10кВ от $k_{зг}$ является экспоненциальная, так как значение средней ошибки аппроксимации для данной зависимости составляет наименьшее значение, а коэффициент детерминации близок к единице. Таким образом, зависимость расчетного $T_{сл}$ изоляции КЛ от $k_{зг}$ наиболее достоверно можно описать уравнением

$$t=exp(10,1935-8,4415k) \quad (3),$$

где

t – расчетный $T_{сл}$ при принятом паспортном $T_{сл}$ = 30 лет;

k – $k_{зг}$ для КЛ.

На основании полученного в процессе исследования экспоненциального уравнения были проведены соответствующие расчеты для определения расчетного $T_{сл}$ изоляции КЛ 10кВ в зависимости от $k_{зг}$ для различных типов изоляции, а именно ПВХ изоляции, ПЭ изоляции и БПИ изоляции.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе оптимальными $k_{зг}$ с точки зрения технического состояния изоляции, соответствующими паспортному $T_{сл}$, равному 30 лет, для КЛ, в зависимости от типа изоляции являются:

- 0,797-0,822 для КЛ с ПВХ-изоляцией;
- 0,788-0,812 для КЛ с ПЭ изоляцией;
- 0,709-0,731 для КЛ с БПИ изоляцией.

При значениях $k_{зг}$, меньших, полученных в данном исследовании, КЛ 10кВ при прокладке в земле в трубе не будут испытывать чрезмерного перегрева в процессе эксплуатации. Полученные значения $k_{зг}$ позволяют наиболее точно выбрать режим работы и сечение КЛ на этапе проектирования.

***Обсуждение** (Discussions)*

В результате проведенных исследований установлены оптимальные значения коэффициентов загрузки для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе для различных типов изоляции-ПВХ, БПИ и ПЭ, что позволяет регулировать режимы работы КЛ в процессе эксплуатации и уточнять параметры на этапе проектирования.

***Выводы** (Conclusions)*

1. Представлен анализ и дополнение методики расчета температурных параметров КЛ 10кВ при различных способах прокладки и с различными типами изоляции с учетом климатических условий Республики Татарстан.

2. Получены результаты расчета температурных параметров КЛ по предлагаемой методике.

3. Проведены расчеты в программном комплексе ELCUT и представлены результаты температурного распределения внутри кабельных оболочек, показаны степени нагрева с учетом теплового рассеивания.

4. Предложена методика вычисления расчетного $T_{сл}$ для КЛ 10 кВ в зависимости от их $k_{зг}$ и получены аппроксимирующие функции.

5. Получены оптимальные значения $k_{зг}$ для КЛ 10 кВ при прокладке в земле в трубе для регулирования режимов эксплуатации.

Литература

1. Грачева Е.И., Муравьев Г.Г. Исследование температурных режимов и параметров кабельных линий электрооборудования электрических станций // НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. 2020.Т.4.С.151-154.

2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019.Т. 11. №4(44). С. 22-29.

3. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92.

4. Грачева Е.И., Гиззатуллина Е.Е. Анализ надежности цеховых сетей // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. №5-6.

5. Титков В.В. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля // КАБЕЛЬ-News. 2018. №10. С. 3-10.

6. Ковригин Л. А. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS // КАБЕЛЬ-News. 2009. № 4. С. 2-6.

7. Гладышева М.М., Сухачева Е.К., Хатюшина Т.В. Математическая модель программного обеспечения автоматизированной системы для выбора кабельных линий промышленных предприятий // СибАК. 2015. №12(48). С. 20-23.

8. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В. Эквивалентное сопротивление промышленных электрических сетей - как одна из основных характеристик в расчетах потерь электроэнергии // ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД В ТОПЛИВНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. 2022. С. 540-544

9. Коржов А.В., Сидоров А.И., Томашева Е.В. Влияние магнитного поля кабелей 6-10кВ на их изоляцию // Электричество. 2009. С. 46-53.

10. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Горлов А.Н. Расчет температуры нагрева изоляции кабеля с учетом влияния рядом проложенных кабелей // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2 (42). С. 56-64.

11. Ильичев Н.Б., Вермаховский А.Н. Расчет температуры жил кабелей при проектировании распределительных сетей // Эффективные технологии проектирования систем электроснабжения и автоматики. Решения группы компаний CSoft. ЗАО «СиСофт Иваново», ЗАО «СиСофт». Иваново-Москва, 2012. С. 22-28.

12. Лебедев Д.В., Зайцев Е.С. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. № 4. С. 11-16.

13. Зализный Д.И., Широков О.Г. Адаптивная математическая модель тепловых процессов трехжильного силового кабеля // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2014. № 2 (57). С. 51-63.

14. R. Gono, S. Rusek, M. Kratky and Z. Leonowicz, Reliability analysis of electric distribution system, 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

15. K. Chen, Y. Yue, Y. Tang, Research on Temperature Monitoring Method of Cable on 10 kV Railway Power Transmission Lines Based on Distributed Temperature Sensor, Energies 2021, 14(12), 3705; https://doi.org/10.3390/en14123705

16. R. Jongen; E. Gulski; J. Smit, Failures of medium voltage cable joints in relation to the ambient temperature, CIRED 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution; DOI: 10.1049/cp.2009.0832

17. R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smit; A.L.J. Janssen, Influence of ambient temperature on the failure behavior of cable joints, 2007 Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; DOI: 10.1109/CEIDP.2007.4451520

18. T.Bragatto; A.Cerretti; L.D'Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Maccioni, Thermal Effects of Ground Faults on MV Joints and Cables; Energies 2019, 12(18), 3496; https://doi.org/10.3390/en12183496

Авторы публикации

Цицонь Иван Иванович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета.

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского Государственного Энергетического Университета.

Грачева Елена Ивановна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского Государственного Энергетического Университета.

Немировский Александр Емельянович – докт. техн. наук, профессор кафедры «Электрооборудование» Вологодского Государственного Университета.

Valtchev S – профессор Университета NOVA в Лиссабоне, Португалия.

Referensces

1. Gracheva E.I., Muravyov G.G. Investigation of temperature regimes and parameters of cable lines of electrical equipment of power plants // NAUKA. technologies. INNOVATIONS. 2020.T.4.pp.151-154.

2. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Research and assessment of electricity losses in in-house power supply systems // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2019.T. 11. No.4(44). pp. 22-29.

3. Gracheva E.I., Alimova A.N. Possible errors in the calculation of electricity losses in shop industrial networks // Izvestia of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2018. Vol. 20. No. 11-12. pp. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92

4. Gracheva E.I., Gizzatullina E.E. Reliability analysis of workshop networks // News of universities. Energy problems. 2003. No.5-6.

5. Titkov V.V. On the issue of introducing a thermal regime of a three-phase LNG cable line // CABLE-News. 2018. No.10. pp. 3-10.

6. Kovrigin L. A. Calculation of temperature fields and current load in ANSYS // CABLE-News. 2009. No. 4. pp. 2-6.

7. Gladysheva M.M., Sukhacheva E.K., Khatyushina T.V. Mathematical model of software for an automated system for selecting cable lines of industrial enterprises // SibAK. 2015. No. 12(48). pp. 20-23.

8. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Tabachnikova T.V. Equivalent resistance of industrial electric networks as one of the main characteristics in calculations of electricity losses // INSTRUMENTATION AND AUTOMATED ELECTRIC DRIVE IN THE FUEL AND ENERGY COMPLEX AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES. 2022. pp. 540-544

9. Korzhov A.V., Sidorov A.I., Tomasheva E.V. The influence of the magnetic field of cables 6-10 kV on their insulation // Electricity. 2009. pp. 46-53.

10. Biryulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Calculation of the heating temperature of cable insulation taking into account the influence of nearby laid cables // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2019. Vol. 11. No. 2 (42). pp. 56-64.

11. Ilyichev N.B., Vermakhovsky A.N. Calculation of the temperature of cable cores in the design of distribution networks // Effective technologies for designing power supply and automation systems. Reorganization of the CSoft Group of companies. CJSC "SiSoft Ivanovo", CJSC "SiSoft". Ivanovo-Moscow, 2012. pp. 22-28.

12. Lebedev D.V., Zaitsev E.S. Calculation of the core temperature of a single-phase high-voltage cable with cross-linked polyethylene insulation in real time // Bulletin of the Ivanovo State Energy University. 2015. No. 4. pp. 11-16.

13. Zalizny D.I., Shirokov O.G. Adaptive mathematical model of thermal processes of a three-core power cable // Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2014. No. 2 (57). pp. 51-63.

14. R. Gono, S. Rusek, M. And Kratki Z. Leonovich, Reliability analysis of the electric power distribution system, 2011. 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi identifier: 10.1109/EEEIC.2011.5874842.

15. K. Chen, Yu. Yue, Yu. Tang, Investigation of the method of cabin temperature control on 10 kV railway power lines based on a distributed temperature sensor, Energy 2021, 14 (12), 3705; https://doi.org/10.3390/en14123705

16. R. Jongen; E. Gulsky; J. Smith, Failures of medium voltage cable connections depending on ambient temperature, CIRED 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Power Distribution; doi number: 10.1049/WED.2009.0832

17. R.A. Jongen; P.H.F. Morshuis; J.J. Smith; A.L.J. Janssen, The influence of ambient temperature on the behavior of cable connections during failure, Annual Report of the Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena for 2007; doi identifier: 10.1109/CEIDP.2007.4451520

18. T.Bragatto; A.Cerretti; L.D'Orazio; F.Massimo Gatta; A.Geri; M.Macchioni, Thermal effects of earth faults on high-voltage connections and cables; energy, 2019, 12(18), 3496; https://doi.org/10.3390/en12183496

Authors of the publication

Ivan I. Tsitson – Kazan State Power Engineering University.

Edward Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Alexander Ye. Nemirovsky – Vologda State University.

Valtchev S. **–** Universidade NOVA of Lisbon, Portugal.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено ***03.03.2024 г.***

Отредактировано ***31.03.2024 г.***

Принято ***02.04.2024 г.***

© Степанова А.И., Хальясмаа А.И., Матренин П.В.

УДК 621.316:004.891 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-75-88**

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ПРЕДПРИЯТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И АДДИТИВНОГО ОБЪЯСНЕНИЯ ШЕПЛИ

Степанова А.И., Хальясмаа А.И., Матренин П.В.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3484-2295, a.i.stepanova@urfu.ru*

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке системы краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности с учетом технологических факторов и интерпретацией формируемых прогнозов. ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы краткосрочного прогнозирования. Проверить применимость мультиагентного подхода для выделения факторов, используемых для построения модели краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности. Построить модели краткосрочного прогноза потребления на базе алгоритмов машинного обучения. Исследовать влияние технологических факторов на точность прогнозирования. Применить и проанализировать метод аддитивного объяснения Шепли для интерпретации результатов прогноза. МЕТОДЫ. Предобработка данных, построение и тестирование моделей машинного обучения при решении поставленных задач было выполнено на языке программирования Python 3 с применением библиотек с открытым исходным кодом Scikit-Learn, XGBoost, LightGBM, Shap. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности в рамках ESG-подхода. Разработан метод выбора признаков, используемых для построения модели машинного обучения с использованием мультиагентного подхода. Построены модели машинного обучения. Проведены эксперименты с учетом ретроспективы потребления и технологических факторов. Сделана интерпретация формируемых моделью прогнозов с использованием алгоритма адаптивного объяснения Шепли. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование технологических факторов потребления электрической энергии компрессорными цехами и аппаратами воздушного охлаждения позволило уменьшить среднюю относительную ошибку прогноза потребления электрической энергии рассматриваемого предприятия с 8,82 % до 3,65 %. Применение адаптивного объяснения Шепли позволяет интерпретировать прогнозы моделей машинного обучения и подтверждает необходимость учета технологических факторов при решении задачи краткосрочного прогнозирования нагрузки предприятия нефтегазовой промышленности.*

Ключевые слова: *анализ системных свойств и связей; структурный анализ предприятия нефтегазовой промышленности; методы машинного обучения; повышение энергетической эффективности; краткосрочное прогнозирование потребления электрической энергии; аддитивное объяснение Шепли.*

Благодарности: *Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEUZ-2022–0030 Разработка интеллектуальной мультиагентной системы для моделирования глубоко интегрированных технологических систем в электроэнергетике).*

Для цитирования: Степанова А.И., Хальясмаа А.И., Матренин П.В. Краткосрочное прогнозирование нагрузки предприятия нефтегазовой промышленности с использованием технологических факторов и аддитивного объяснения Шепли // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 75-88. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-75-88.

SHORT-TERM FORECASTING OF CONSUMPTION OF THE OIL AND GAS ENTERPRISES USING TECHNOLOGICAL FACTORS AND SHAPLEY ADDITIVE EXPLANATIONS

Stepanova A.I., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V.

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3484-2295, a.i.stepanova@urfu.ru*

Abstract: *RELEVANCE of the study lies in the development of system for the short-term forecasting of power consumption by the enterprise of the oil and gas industry with consideration of technological factors and interpretation of their influence on the result of the forecast. THE PURPOSE. To consider the problems of short-term forecasting. To test the applicability of the multi-agent approach to determine the features used to build a machine learning model of short-term forecasting of power consumption. To build machine learning models. To study the influence of technological factors on the accuracy of forecasting of power consumption. To apply the SHapley Additive exPlanations and analyze its interpretation of the forecasting results. METHODS. Pre-processing of the dataset, construction and testing of machine learning models were made in the programming language Python 3 using opensource libraries Scikit-Learn, XGBoost, LightGBM, Shap. RESULTS. The article describes the relevance of the topic of short-term forecasting of power consumption by the enterprise of the oil and gas industry within the ESG-approach. The method of selecting the features used using a multi-agent approach to build a machine learning model was developed. Machine learning models were built. Experimentations with the consideration of different features were made. Interpretation of results using SHapley Additive exPlanations was made. CONCLUSION. The use of technological factors of power consumption of compressor yards and natural gas air coolers allowed to increase the accuracy of forecast of power consumption from 8.82 % to 3.65 %. The application of the SHapley Additive exPlanations allows to interpret the results of machine learning models and confirms the need to consider technological factors in the task of short-term forecasting of power consumption of oil and gas industry.*

Keywords: *analysis of system properties and connections; structural analysis of the oil and gas industry enterprise; machine learning; increase of energy efficiency; short-term forecasting of power consumption; SHapley Additive exPlanations.*

Acknowledgments: *The research was carried out within the state assignment with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subject No. FEUZ-2022–0030 Development of an intelligent multi-agent system for modeling deeply integrated technological systems in the power industry).*

For citation: Stepanova A.I., Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V. Short-term forecasting of consumption of the oil and gas enterprises using technological factors and Shapley additive explanations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 75-88. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-75-88.

Введение (*Introduction)*

В настоящее время при внедрении инвестиционных проектов и проведении научно-исследовательских и конструкторских работ применяется ESG-подход, который учитывает экологические (environmental), социальные (social), управленческие (governance) факторы. В статье Jagyasi D. и Raut A. R. [1] для оценки долгосрочных результатов инвестиционных проектов приведен анализ применения ESG-факторов вместе с традиционными методами, который показывает необходимость учета влияния экологических, социальных, управленческих факторов на финансовую перспективу предприятия. В исследовании [2] коллектив авторов под руководством Forliano C. привел анализ инвестиционных показателей 688 компаний, на основании которого была выявлена высокая корреляция между получением государственной поддержки компаниями и их ESG-факторами. В статье [3] Cabaleiro-Cervino G и Mendi P. провели анализ внедрения ESG-подхода при разработке направлений развития компаний. Одним из направлений внедрения ESG-подхода является разработка Системы энергетического

менеджмента и внедрение в данную систему мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности [4].

Предприятия нефтегазовой промышленности для соответствия правилам ESG-подходу и правилам эксплуатации критической инфраструктуры внедряют энергетические программы, которая направлены на повышение энергетической эффективности и социальной ответственности персонала, работа которого влияет на энергетическую эффективность объектов; снижение потребления и затрат на энергетические ресурсы [4].

Аллаххах Х. и Максимова Т. Г. в статье [5] рассматривают следующие направления повышения энергетической эффективности: преобразование природного газа в жидкое топливо, использование природного газа для выработки электрической энергии, использование возобновляемых источников энергии при добыче природных ископаемых.

Также предприятия нефтегазовой промышленности для повышения энергетической эффективности проводят мероприятия по строительству и модернизации объектов с высокими показателями энергетической эффективности, внедряют технологии для оптимизации режима работы систем электроснабжения и её структурной перестройки [4].

Все рассмотренные меры являются техническими, требующими значительных капиталовложений. Кроме них можно внедрять организационные меры, заключающиеся в экономии топливно-энергетических ресурсов за счет нормирования энергопотребления. Одной из организационных мер может быть внедрение систем краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии. Lee E. в статье [6] рассматривает стимулирование внепикового потребления электрической энергии за счет внедрения сетки тарифов на оптовом рынке электрической энергии. Точный прогноз потребления электрической энергии предприятием может снизить расходы на электроэнергию на оптовом рынке электрической энергии и мощности, а также помочь оптимизировать график потребления. Однако из-за того, что технологический процесс предприятий нефтегазовой промышленности зависит от плана добычи, транспортировки, хранения полезных ископаемых и других технологических факторов, внедрение системы прогнозирования потребления электрической энергии предприятия становится затруднительным.

Существующие исследования, в основном, посвящены краткосрочному прогнозированию нагрузки областных и региональных электроэнергетических систем. Серебряков Н. А. в статье [7] рассматривает прогнозирование для сбытовой компании с учетом календарных признаков, ретроспективы фактического потребления, метеоданных. В статье [8] группа исследователей под руководством Li K. решает задачу краткосрочного прогнозирования нагрузки электроэнергетической системы с учетом экономических индексов. Средняя точность прогноза нагрузки электроэнергетических систем областного и регионального уровня составляет 98–99%.

Из-за стохастического характера технологических факторов и высокой доли апериодической составляющей точность прогноза потребления промышленного предприятия может составлять 50–60% [10]. Себельдин А. С. в статье [11] приводит анализ методов краткосрочного прогнозирования потребления предприятиями нефтегазовой промышленности и делает вывод, что в настоящее время нет подходов, которые могли бы решить проблему планирования потребления электрической энергии данными предприятиями.

Для краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности могут использоваться методы машинного обучения, которые позволяют учитывать множество факторов, в том числе метеорологические и технологические. В статье [12] авторский коллектив под руководством Madhukumar M. при построении модели краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии университетом учитывал метеорологические факторы. В статье [13] приведено исследование, приведено исследование, проведенное Сергеевым Н. и Матрениным П., в котором для прогнозирования потребления электрической энергии горнодобывающим предприятием использовались производственные факторы.

Кроме того, следует отметить, что в настоящее время исследования в области прогнозирования потребления электрической энергии электроэнергетическими системами и промышленными предприятия направлены на повышение точности прогноза, в то время как задаче объяснения не уделяется внимания. Отсутствие

понимания принципов работы интеллектуальных информационных систем уменьшает доверие экспертов и затрудняет их внедрение. Для решения этой проблемы проводятся исследования в области объяснимого искусственного интеллекта. В исследовании [14] под руководством Ahmed I. приведен обзор данных методов. Объяснение сложных моделей, не поддающихся интерпретации, может базироваться на апостериорных объяснениях, каких как интерпретируемые модельно-независимые объяснения и аддитивные объяснения Шепли. Применение данных методов в электроэнергетике находится на ранней стадии. Одним из исследований, в котором используются методы объяснимого искусственного интеллекта в электроэнергетике, является статья группы авторов под руководством Матренина П. [15], где аддитивное объяснение Шепли используется для интерпретации прогнозов солнечной радиации.

Цель данной работы заключается в разработке системы краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности и разработке способов интерпретации результатов модели краткосрочного прогнозирования потребления с помощью адаптивного объяснения Шепли.

Научная значимость исследования состоит в использовании технологических факторов в задаче краткосрочного прогноза потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности с интерпретацией их влияния на каждый отдельный формируемый моделью прогноз.

Практическая значимость исследования заключается в том, что количественно обоснована эффективность использования технологических факторов предприятия нефтегазовой промышленности для снижения расходов на электроэнергию, а также предложен метод повышении доверия к интеллектуальным системам поддержки принятия решений.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Исходные данные

В работе использованы данные потребления электрической энергии предприятия нефтегазовой промышленности, расположенного в Ямало-Ненецком автономном округе. Предприятие является компрессорной станцией, обеспечивающей транспорт газа по магистральному газопроводу, и состоит из трех компрессорных цехов, которые включают группу газоперекачивающих агрегатов, технологические системы очистки газа, аппараты воздушного охлаждения газа.

Изначальная выборка данных включала двухлетние данные:

- потребления электрической энергии предприятием с дискретизацией 1 час, полученные от автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ);
- потребления электрической энергии компрессорными цехами с дискретизацией 1 день;
- потребления электрической энергии аппаратами воздушного охлаждения с дискретизацией 1 день.

На рисунках 1, 2 приведены фрагменты почасового графика потребления электрической энергии предприятия, которые представляют собой графическую интерпретацию потребления электрической энергии. График демонстрирует высокую долю апериодической составляющей и высокую стохастичность.

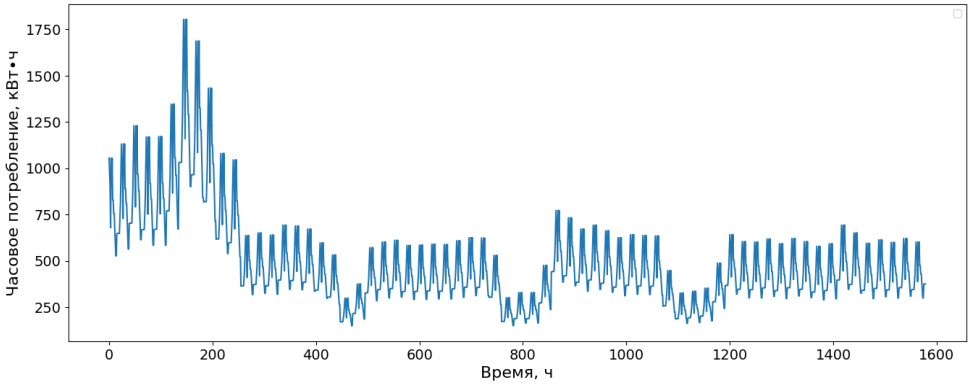


Рис. 1. Потребление электрической энергии с февраля по март

Fig. 1. Actual power consumption from February to March

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

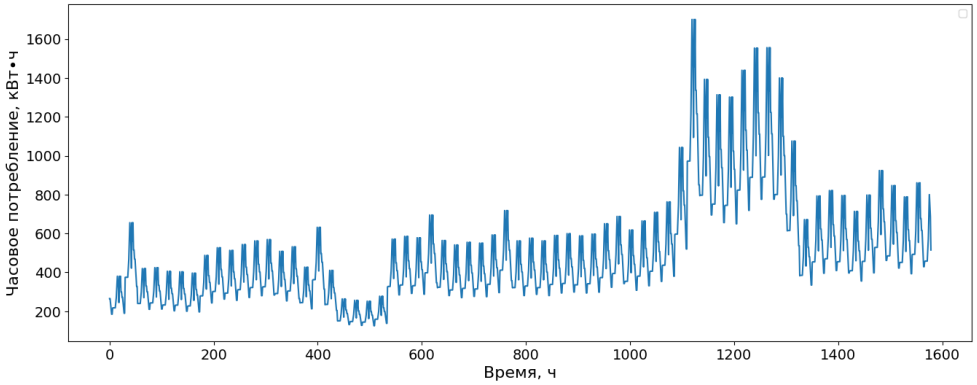


Рис. 2. Потребление электрической энергии с сентября по октябрь

Fig. 2. Actual power consumption from September to October

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

Формирование выборки данных

При прогнозировании временных рядов необходимо выбрать признаки для формирования исходной выборки данных. Функция прогноза потребления в *i*-момент времени обычно включает функцию ретроспективных фактических значений потребления электрической энергии и прочие признаки:

$$y_i^* = f\left(g\left(y_{i-h}, y_{i-h-1}, \ldots, y_{i-h-w}\right), X\right), \quad (1)$$

где y_i^* – прогнозное потребление электрической энергии в *i*-й момент времени, f – прогнозирующая модель, g – функция, которая задает правило выбора ретроспективных фактических значений потребления электрической энергии, h – горизонт прогнозирования, w – ширина окна ретроспективных данных, X – прочие признаки.

В данной работе для определения прочих признаков, включаемых в выборку данных, используется мультиагентный подход. Применение мультиагентного подхода позволяет рассматривать реальный объект как систему слабосвязанных автономных объектов, которые взаимодействуют друг с другом для достижения целей. Под агентом при этом понимается объект, который на основании данных об окружающей среде формирует свои действия [16].

Мультиагентные системы применяются для решения различных оптимизационных задач, связанных с работой электротехнических комплексов и систем. Группа исследователей под руководством Bui V.-H. разработала систему с использованием мультиагентного подхода для управления режимами работы умных сетей с учетом различных типов потребителей и накопителей [17]. В статье Li Q. мультиагентный подход используется для решения задачи управления умной сетью с объектами на возобновляемых источниках энергии [18].

Для определения агентов была спроектирована модель данных, представленная на рисунке 3, которая отражает логически-информационную взаимосвязь объектов, необходимых при разработке системы краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии компрессорной станцией. Объект «График прогноза потребления предприятия» формируется на основании взаимодействия с объектами:

- «Фактическое потребление предприятия»: данные ретроспективного потребления предприятия с АСКУЭ;
- «Метеопараметры»: температура воздуха, давление, относительная влажность воздуха, скорость ветра;
- «Производственный план»: производственные и рабочие процессы;
- «Экспертные поправки»: изменения, которые может внести Эксперт в «График прогноза потребления».

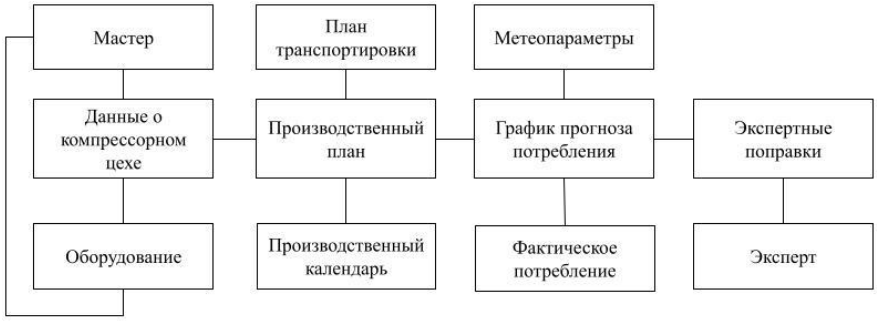


Рис. 3. Модель данных, используемая для проектирования системы краткосрочного прогнозирования потребления предприятием нефтегазовой промышленности

Fig. 3. Data model used to design short-term forecasting of power consumption of the oil and gas industry enterprise

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

В свою очередь объект «Производственный план» формируется на основании взаимодействия с объектами:

- «План транспортировки», описывающим план транспортировки газа через компрессорную станцию;
- «Производственный календарь», описывающим данные о рабочих, нерабочих и выходных днях;
- «Данные о компрессорном цехе», описывающим данные о компрессорном участке.

Объект «Данные о компрессорном цехе» заполняется Мастером и связан с объектом «Оборудование», который описывает сведения об оборудовании на компрессорном цехе, например, график ремонтов, загрузка оборудования, его номинальные параметры. Сведения объекта «Оборудование» также вводятся Мастером.

Предварительный корреляционный анализ показал, что метеорологические факторы не влияют на точность прогнозирования потребления электрической энергии рассматриваемого предприятия нефтегазовой промышленности, поэтому в данном исследовании данные объекта «Метеопараметры» не учитываются.

На основании анализа связи объектов в модели данных можно заключить, что прочие признаки (X) могут описываться:

- календарными признаками, описывающими объект «Производственный календарь»:
  - номер часа;
  - номер дня месяца;
  - номер дня недели;
  - номер месяца;
- технологическими факторами, которые описывают «План транспортировки»:
  - потребление электрической энергии комплектными трансформаторными подстанциями первого, второго и третьего компрессорных цехов в j-ый день– КТП_КЦ_1, КТП_КЦ_2, КТП_КЦ_3, соответственно;
  - потребление электрической энергии всеми комплектными трансформаторами подстанциями компрессорных цехов в j-ый день (КТП_КЦ);
  - потребление электрической энергии аппаратами воздушного охлаждения первого, второго и третьего компрессорных цехов в j-ый день – АВО_1, АВО_2, АВО_3, соответственно;
  - потребление электрической энергии аппаратами воздушного охлаждения всеми компрессорными цехами в j-ый день (АВО).

Также в ходе анализа было определено, что для прогнозирования потребления электрической энергии предприятием достаточно использовать ретроспективные данные с шагом 12 и глубиной 3 дня. Таким образом, выражение (1) принимает вид:

$$y_i^* = f\left(y_{i-24}, y_{i-36}, y_{i-48}, y_{i-60}, y_{i-72}, X\right) \quad (2)$$

Предобработка данных, построение и тестирование моделей машинного обучения выло выполнено на языке программирования Python 3 с применением библиотек с открытым исходным кодом: Scikit-Learn, XGBoost, LightGBM.

Методы машинного обучения

В данной работе используются ансамблевые методы ввиду того, что их точность

сопоставима с точностями моделей, использующими нейронные сети, но при этом они демонстрируют простоту настройки гиперпараметров и высокую скорость обучения. Данные выводы были представлены Антоненкова Д.В. и Матренина П.В. [19].

Для проведения экспериментов были выбраны методы: случайный лес (Random Forest), адаптивный бустинг (AdaBoost), экстремальный градиентный бустинг (XGBoost) и быстрый бустинг (LightGBM). Данные методы основаны на концепции градиентного бустинга, который может быть выражен как [20]:

$$f(x) = \sum_{q=1}^{Q} \alpha_q T(x), \tag{3}$$

где $f(x)$ – целевая функция, Q – количество обучающихся моделей, α_q – весовой коэффициент q-й модели, x – обучающий набор данных, $T(x)$ – q-я модель.

Функция потерь в градиентном бустинге представляет собой функцию потерь, которая увеличивается в направлении градиента ошибки ансамбля в соответствии с:

$$L\left(F_j(x), Y\right) < L\left(F_{j-1}(x), Y\right), \tag{4}$$

где $L(F_j(x), Y)$ – функции потерь для j-й итерации $F_j(x)$ – выходные значения модели на j-й итерации, Y – истинное целевое значение в выборке обучающих данных.

Объяснимый искусственный интеллект

Интеллектуальные системы, использующие методы машинного обучения, не вызывают доверия экспертов, так как представляют собой модели вида «черный ящик». Для решения данной проблемы разрабатываются методы объяснимого искусственного интеллекта [14]. Концепция объяснимого искусственного интеллекта заключается в следовании принципам объяснимости результатов, адаптации объяснения под пользователя, точности объяснения. В данной работе предлагается применение алгоритма адаптивного объяснения на основе вектора Шепли, которое основано на алгоритме теоретически оптимальных значений Шепли из теории игр, где для результата модели оценивается влияние признаков [15]:

$$\varphi_i(f, Z_i) = \sum_{s \subseteq Z\{j\}} \frac{|S|!\left(m - |S| - 1\right)!}{m!} \left[f_{Z_i}\left(S \cup \{j\}\right) - f_x(S) \right], \tag{5}$$

где m – общее число признаков, S – подмножество признаков, Z – множество всех возможных признаков s, j – признак.

В результате оценка важности j-го признака происходит путем анализа его влияния на результаты модели с ним и без него при различных наборах остальных признаков.

Результаты и обсуждение *(Results and Discussions)*

Результаты прогнозирования потребления электрической энергии

В работе было проведено два эксперимента с построением моделей машинного обучения для краткосрочного прогноза потребления электрической энергии предприятием при учете различных факторов.

Для сопоставления результатов рассчитывались:

- средняя по модулю ошибка (MAE);
- средняя по модулю ошибка в процентах (MAPE);
- корень средней квадратичной ошибки (RMSE);
- коэффициент детерминации (R^2).

В первом эксперименте учитывались календарные факторы и ретроспектива потребления (y_{i-24}, y_{i-36}, y_{i-48}, y_{i-60}, y_{i-72}), результаты приведены в таблице 1. Лучший результат по критерию MAPE на тестовой выборке продемонстрировал метод LightGBM – 8,92 %.

Во втором эксперименте к признакам, используемым в первом эксперименте, были добавлены признаки технологических факторов: КТП_КЦ_1, КТП_КЦ_2, КТП_КЦ_3, КТП_КЦ, АВО_1, АВО_2, АВО_3, АВО, результаты приведены в таблице 2. Лучший результат (по MAPE) на тестовой выборке показали метод XGBoost – 3,65 %. Таким образом, учет технологических факторов снизил ошибку прогноза на 5,27 %.

Таблица 1
Table 1

Результаты прогнозирования потребления электрической энергии предприятия нефтегазовой промышленности с учетом ретроспективы потребления
Results of forecasting the consumption of electric energy of the oil and gas industry enterprise with regard to retrospective consumption

Название модели	MAE, кВт ч		MAPE, %		RMSE, кВт ч		R^2	
	обуч.	тест.	обуч.	тест.	обуч.	тест.	обуч.	тест.
AdaBoost	29,18	34,49	6,94	11,72	36,06	63,35	1,00	0,77
XGBoost	43,29	27,87	8,11	9,23	63,63	55,03	0,99	0,83
Random Forest	55,54	28,54	9,08	9,04	85,93	56,69	0,98	0,81
Light GBM	47,09	27,95	8,61	8,92	70,49	56,48	0,98	0,82

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

Таблица 2
Table 2

Результаты прогнозирования потребления электрической энергии предприятия нефтегазовой промышленности с учетом ретроспективы потребления и технологических факторов
Results of forecasting the consumption of electric power by the oil and gas industry enterprise taking into account retrospective consumption and technological factors

Название модели	MAE, кВт ч		MAPE, %		RMSE, кВт ч		R^2	
	обуч.	тест.	обуч.	тест.	обуч.	тест.	обуч.	тест.
AdaBoost	11,67	15,53	3,15	6,12	14,65	21,00	1,00	0,97
XGBoost	13,70	11,33	2,37	3,65	19,65	22,73	1,00	0,97
Random Forest	30,99	16,86	5,01	5,71	48,26	27,07	0,99	0,96
Light GBM	19,04	12,47	3,20	4,01	27,90	24,04	1,00	0,97

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

На рисунках 4, 5 приведено наложение графика прогнозного потребления электрической энергии на график фактического потребления электрической энергии на график фактического потребления.

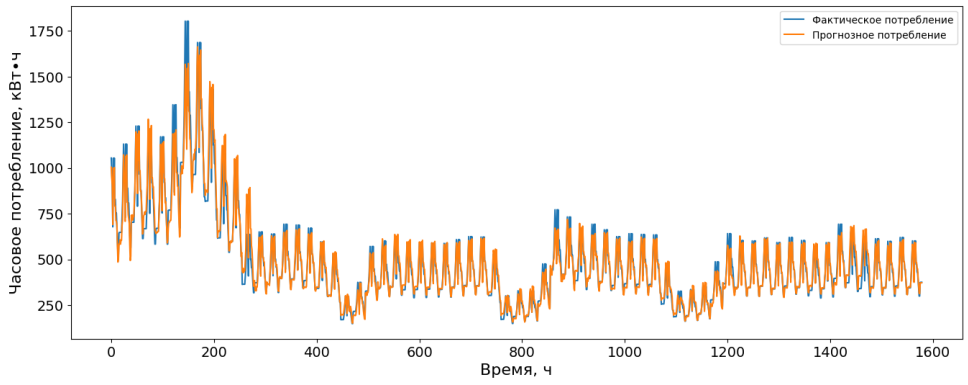


Рис. 4. Фактическое и прогнозное потребления электрической энергии с февраля по март
Fig. 4. Actual and forecasted power consumption from February to March
**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

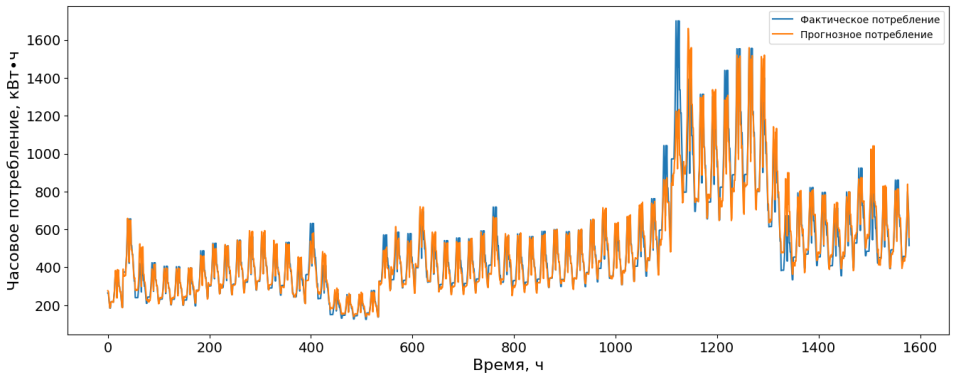


Рис. 5. Фактическое и прогнозное потребления электрической энергии с сентября по октябрь

Fig. 5. Actual and forecasted power consumption from September to October

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

Объяснение результатов

Применение алгоритма аддитивного объяснения Шепли позволяет получать формализированное отображение значимости признаков, повлиявших на формирование прогноза потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности для каждого часа, которые могут интерпретироваться экспертом и использоваться при внесении экспертных поправок.

На рисунке 6 представлено отображение признаков, повлиявших на прогноз одного часа зимнего периода. Высокое превышение потребления ($f(x)$ = 1387,272 кВт·ч) от среднего значения ($E[f(X)]$ = 721,157 кВт·ч), обосновано высоким потреблением за 24 и 36 часов до прогнозируемого часа, а также технологическими факторами: высокой нагрузкой АВО всех компрессорных цехов (АВО), АВО газа второго компрессорного цеха (АВО_2).

Признаки выстраиваются по порядку убывания влияния на результат отклонения прогнозируемого значения потребления электрической энергии $f(x)$ от среднего значения $E[f(X)]$.

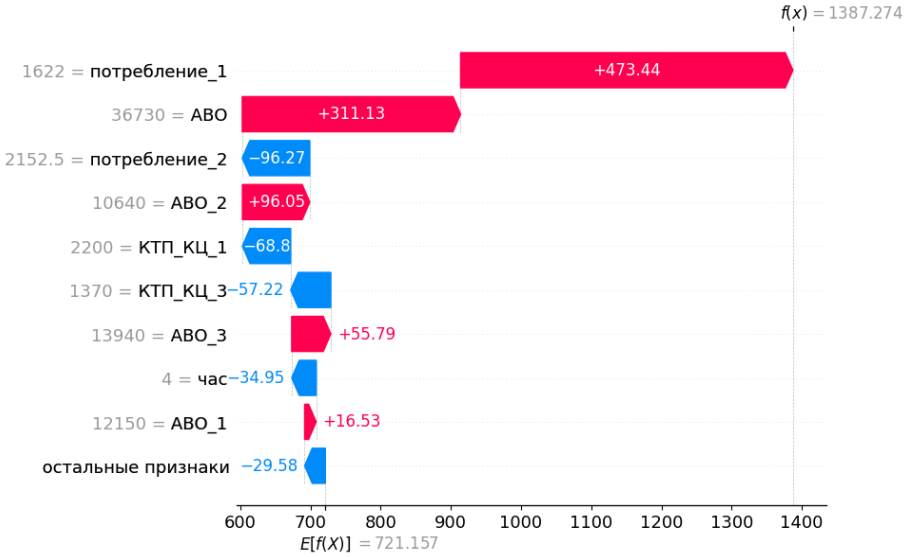


Рис. 6. Отображение признаков, повлиявших на прогноз потребления электрической энергии ($f(x)$ = 1387,272 кВт·ч)

Fig. 6. Influence of the features on the forecast of power consumption f(x) of 1387.272 kWh

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

На рисунке 7 представлено отображение признаков, повлиявших на прогноз одного часа в зимний период в том же эксперименте. Полученный прогноз в этом примере существенно ниже среднего, что обусловлено, в первую очередь, низкой нагрузкой АВО всех компрессорных цехов (АВО), АВО газа второго компрессорного цеха (АВО_2), а также часом прогноза. Влияние признака потребления электрической энергии комплектной трансформаторной подстанцией второго компрессорного цеха (КТП_КЦ_2) было компенсировано влиянием признака потребления электрической

энергии всеми комплектными трансформаторами подстанциями компрессорных цехов (КТП_КЦ). Можно заметить, что на прогнозное значение потребления электрической энергии повлияли, в основном, технологические факторы, а не ретроспективное потребление.

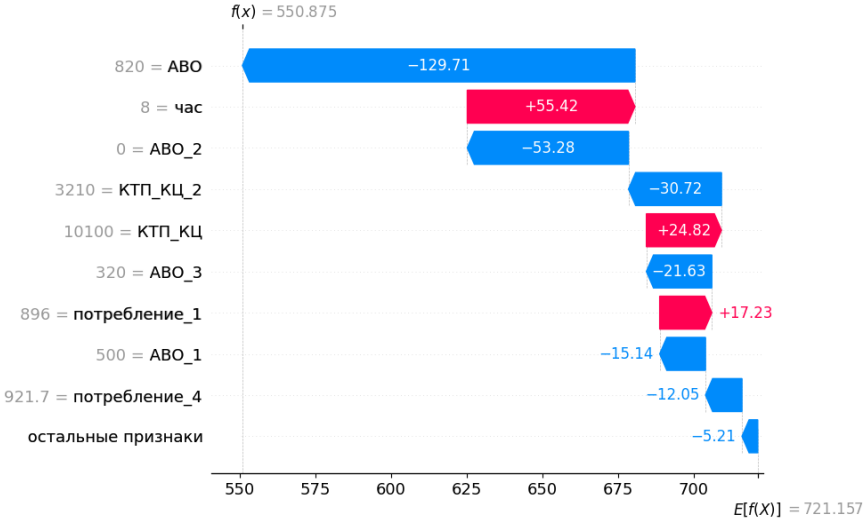


Рис. 7. Отображение признаков, повлиявших на прогноз потребления электрической энергии (*f(x)* = 550,875 кВт·ч)

Fig. 7. Influence of the features on the forecast of power consumption f(x) of 550.875 kWh

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

На рисунке 8 представлено отображение признаков, повлиявших на прогноз одного часа весеннего периода. На отклонение *f(x)* (527,683 кВт·ч), от среднего значения *E[f(X)]* в 721,157 кВт·ч, обосновано технологическими факторами суммарного АВО всех компрессорных цехов (АВО), суммарного потребления комплектных трансформаторных подстанций всех компрессорных цехов (КТП_КЦ), АВО газа второго компрессорного цеха (АВО_2), потреблением за 24 часа.

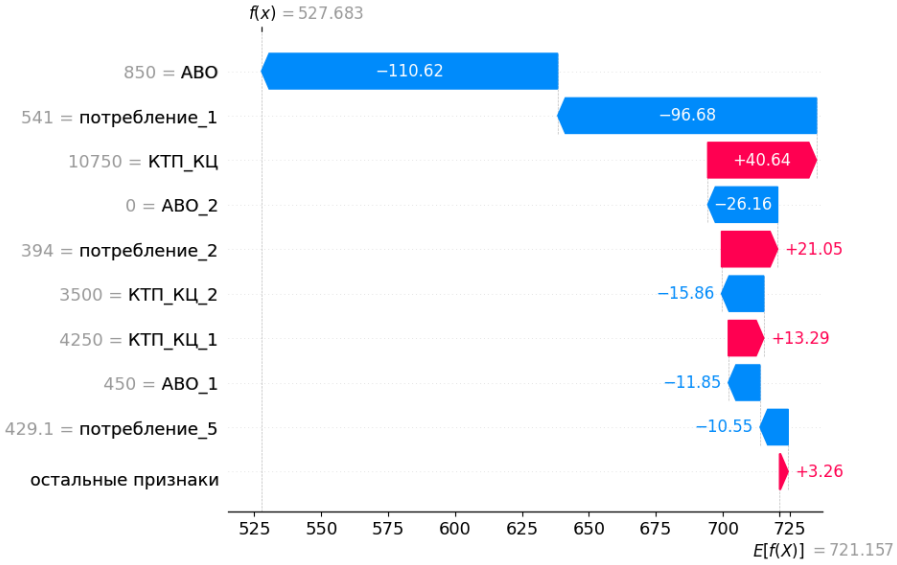


Рис. 8. Отображение признаков, повлиявших на прогноз потребления электрической энергии (*f(x)* = 527,683 кВт·ч)

Fig. 8. Influence of the features on the forecast of power consumption f(x) of 527.683 kWh

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

На рисунке 9 представлено отображение признаков, повлиявших на прогноз одного часа летнего периода. На отклонение *f(x)*, составившей 820,284 кВт·ч, от среднего значения *E[f(X)]* в 721,157 кВт·ч, обосновано технологическими факторами суммарного АВО всех компрессорных цехов (АВО), АВО газа второго компрессорного цеха (АВО_2), а также потреблением за 36 часов и часом потребления. При этом

потребление за 24 часа является только 9 по значимости признаком.

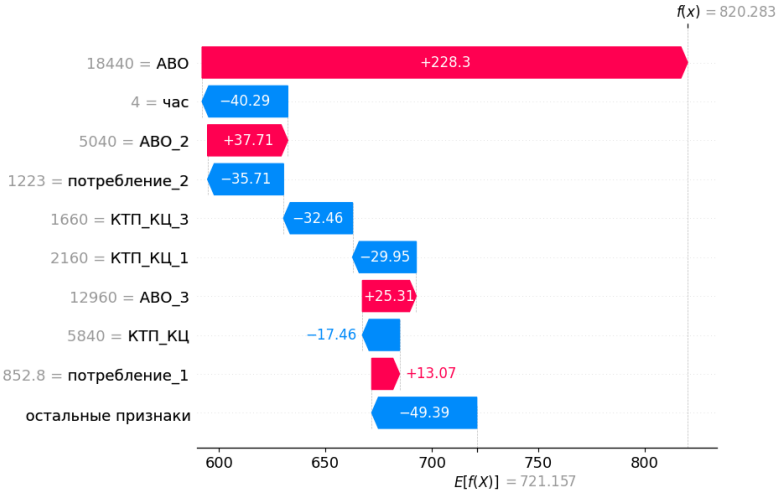


Рис. 9. Отображение признаков, повлиявших на прогноз потребления электрической энергии (*f(x)* = 820,283 кВт·ч)

Fig. 9. Influence of the features on the forecast of power consumption f(x) of 820.283 kWh

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

Аддитивное объяснение Шепли позволяет для каждого часа прогноза потребления электрической энергии показать влияние признаков в виде, понятном для эксперта, что повышает интерпретируемость модели машинного обучения.

Анализ признаков, получаемых с помощью аддитивного объяснения Шепли, подтверждает необходимость учета технологических факторов при построении модели прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности.

Заключение *(Conclusions)*

В работе предложено решение задачи краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии предприятием нефтегазовой промышленности. Для выделения признаков при построении моделей машинного обучения, был применен мультиагентный подход, который позволяет учесть выделить объекты и взаимосвязи, необходимые для учета технологических факторов.

Применение технологических параметров компрессорной станции, а именно, потребления электрической энергии компрессорных цехов и аппаратов воздушного охлаждения, позволило снизить ошибку прогноза потребления электрической энергии предприятием с 8,82 % до 3,65 %. Несмотря на то, что формирование выборки данных о технологических процессах на предприятиях нефтегазовой промышленности является трудоемким процессом, в дальнейших исследованиях планируется повысить точность прогноза за счет сбора и формализации большего количества производственных параметров.

Предлагаемый подход к созданию информационной системы также включает в себя модель, которая формирует интерпретацию прогноза на каждый часа потребления с использованием адаптивного объяснения Шепли. Несмотря на формирование только визуализации для последующего объяснения, метод Шепли считается одним из наиболее перспективных методов объяснимого искусственного интеллекта для интерпретации результатов моделей машинного обучения. Результаты объяснения могут позволить эксперту вносить корректные поправки за счет анализа влияния технологических факторов на прогнозы. Повышение доверия к интеллектуальным системам поддержки принятия решений позволит ускорить процесс их внедрения.

В дальнейших исследованиях планируется апробировать разработанный подход на данных других предприятий нефтегазовой промышленности, а также повысить интерпретируемость результатов аддитивного объяснения Шепли.

Литература

1. Jagyasi, D. Implementation of ESG Index on Long-term Value and Performance of Oganizations Using AI and ML / D. Jagyasi, A. R. Raut // 2022 OPJU International Technology Conference on Emerging

Technologies for Sustainable Development (OTCON). – 2023. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/OTCON56053.2023.10114037.

2. Forliano, C. The mediating role of R&D investments in the relationship between awarded grants and ESG performance / C. Forliano, J. Ballerini, P. De Bernardi, R. Quaglia // 2022 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). – 2022. – P.1-5. – DOI: 10.1109/ICTMOD55867.2022.10041825.

3. Cabaleiro-Cervino, G. ESG-driven innovation strategy and firm performance / G. Cabaleiro-Cervino, P. Mendi // Eurasian Bus Review. – 2024. – Vol. 14. – P. 137–185. – DOI: 10.1007/s40821-024-00254-x.

4. Газпромэнерго: офиц. сайт: Система энергетического менеджмента. – URL: https://gazpromenergo.gazprom.ru/ecology/ism/energysystem/ (дата доступа: 05.04.2024)

5. Аллаххах, Х. "Зелёный" компромисс: инновационный потенциал нефтегазовой промышленности в условиях декарбонизации / Х. Аллаххах, Т. Г. Максимова // Экономический вектор. – 2023. - № 2(33). – С. 96–101. ISSN 2411-7269.

6. Lee, E. Load Profile Segmentation for Effective Residential Demand Response Program: Method and Evidence from Korean Pilot Study / E. Lee, J. Kim, D. Jang // Energies. – 2020. – Vol.13(6). – 1348. – DOI: 10.3390/en13061348.

7. Серебряков, Н.А. Выбор оптимальной архитектуры и конфигурации нейросети в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии / Н.А. Серебряков // Вести высших учебных заведений черноземья. – 2021. – Т.17. – №2(64). – С.26-42.

8. Li, K. A Short-Term Forecasting Approach for Regional Electricity Power Consumption by Considering Its Co-movement with Economic Indices / K. Li, Z. Yang, D. Li, Y. Y. Xing, W. Nai // 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). – 2020. – P.551-555. – DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141928.

9. Caro, E. Optimal Selection of Weather Stations for Electric Load Forecasting / E. Caro, J. Juan and S. Nouhitehrani // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 42981-42990. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3270933.

10. Babich, L. Industrial Power Consumption Forecasting Methods Comparison / L. Babich, D. Svalov, A. Smirnov and M. Babich // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2019. – P. 307-309. – DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736640.

11. Себельдин, А. С. Необходимость краткосрочного прогнозирования энергопотребления объектов нефтегазодобычи / А. С. Себельдин // Молодой ученый. — 2023. — № 52 (499). — С. 42-44.

12. Madhukumar, M. Regression Model-Based Short-Term Load Forecasting for University Campus Load / M. Madhukumar, A. Sebastian, X. Liang, M. Jamil and M. N. S. K. Shabbir // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 8891-8905. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144206.

13. Sergeev, N. Improving Accuracy of Machine Learning Based Short-Term Load Forecasting Models with Correlation Analysis and Feature Engineering / N. Sergeev, P. Matrenin // Proc. 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2023. – P. 1000-1004. – DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225058.

14. Ahmed, G. From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Survey on What, How, and Where / I. Ahmed, G. Jeon, F. Piccialli, // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18. – No. 8. – PP. 5031-5042. – DOI: 10.1109/TII.2022.3146552.

15. Matrenin, P. V. Solar Irradiance Forecasting with Natural Language Processing of Cloud Observations and Interpretation of Results with Modified Shapley Additive Explanations / P.V. Matrenin, V.V. Gamaley, A.I. Khalyasmaa, A.I. Stepanova // Algorithms. – 2024. – Vol. 17. – 150. – DOI: 10.3390/a17040150.

16. Balaji, P.G. An Introduction to Multi-Agent Systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-1 / P. G. Balaji, D. Srinivasan // Studies in Computational Intelligence. – 2010. – Vol. 310. – P.1-27. – DOI: 10.1007/978-3-642-14435-6_1.

17. Bui, V-H. Q-Learning-Based Operation Strategy for Community Battery Energy Storage System (CBESS) in Microgrid System / V.-H. Bui, A. Hussain, H.-M. Kim // Energies. – 2019. – Vol.12(9). – 1789. – DOI: 10.3390/en12091789.

18. Li, Q. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control / Q. Li, T. Lin, Q. Yu, H. Du, J. Li, X. Fu, Q. Li // Energies. – 2023. – Vol.16(10). – 4143. – DOI: 10.3390/en16104143.

19. Антоненков, Д.В. Исследование ансамблевых и нейросетевых методов машинного обучения в задаче краткосрочного прогнозирования электропотребления горных предприятий / Д.В. Антоненков, П.В. Матренин // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 57-65. – DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-57-65

20. Li, S. Enhancing LightGBM for Industrial Fault Warning: An Innovative Hybrid Algorithm / S. Li, S. N. Jin, A. Dogani, Y. Yang, M. Zhang, X. Gu // Processes. – 2024. – Vol. 12(1). – 221. – DOI: 10.3390/pr12010221.

Авторы публикации

Степанова Алина Игоревна – младший научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, России. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0002-3484-2295*. *a.i.stepanova@urfu.ru*

Хальясмаа Александра Ильмаровна – канд. техн. наук, доц., заведующий научной лабораторией цифровых двойников в электроэнергетике, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0001-5327-6076*. *a.i.khaliasmaa@urfu.ru*

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научной лаборатории цифровых двойников в электроэнергетике, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, России. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0001-5704-0976*. *p.v.matrenin@urfu.ru*

References

1. Jagyasi, D. Implementation of ESG Index on Long-term Value and Performance of Oganizations Using AI and ML / D. Jagyasi, A. R. Raut // 2022 OPJU International Technology Conference on Emerging Technologies for Sustainable Development (OTCON). – 2023. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/OTCON56053.2023.10114037.

2. Forliano, C. The mediating role of R&D investments in the relationship between awarded grants and ESG performance / C. Forliano, J. Ballerini, P. De Bernardi, R. Quaglia // 2022 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD). – 2022. – P.1-5. – DOI: 10.1109/ICTMOD55867.2022.10041825.

3. Cabaleiro-Cervino, G. ESG-driven innovation strategy and firm performance / G. Cabaleiro-Cervino, P. Mendi // Eurasian Bus Review. – 2024. – Vol. 14. – P. 137–185. – DOI: 10.1007/s40821-024-00254-x.

4. Gazpromenergo: Sistema energeticheskogo menedzhmenta [Energy management system]. – URL: https://gazpromenergo.gazprom.ru/ecology/ism/energysystem/ (access date: 05.04.2024). (in Russ.)

5. Allakhkhakh, Kh. "Zelenyi" kompromiss: innovatsionnyi potentsial neftegazovoi promyshlennosti v usloviyakh dekarbonizatsii ["Green" compromise: the innovative potential of the oil and gas industry under decarbonization conditions] / Kh. Allakhkhakh, T. G. Maksimova // Ekonomicheskii vector [Economic vector]. – 2023. - № 2(33). – P. 96–101. ISSN 2411-7269. (in Russ.)

6. Lee, E. Load Profile Segmentation for Effective Residential Demand Response Program: Method and Evidence from Korean Pilot Study / E. Lee, J. Kim, D. Jang // Energies. – 2020. – Vol.13(6). – 1348. – DOI: 10.3390/en13061348.

7. Serebryakov, N.A. Vybor optimal'noi arkhitektury i konfiguratsii neiroseti v zadachakh kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya garantiruyushchego postavshchika elektroenergii / N.A. Serebryakov [Selection of optimal architecture and configuration of the neural network in the tasks of short-term forecasting of electricity consumption of the guaranteeing supplier] // Bulletin of the Chernozem Region of Higher Education. – 2021. – T.17. – №2(64). – C.26-42. (in Russ.)

8. Li, K. A Short-Term Forecasting Approach for Regional Electricity Power Consumption by Considering Its Co-movement with Economic Indices / K. Li, Z. Yang, D. Li, Y. Y. Xing, W. Nai // 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). – 2020. – P.551-555. – DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141928.

9. Caro, E. Optimal Selection of Weather Stations for Electric Load Forecasting / E. Caro, J. Juan and S. Nouhitehrani // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 42981-42990. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3270933.

10. Babich, L. Industrial Power Consumption Forecasting Methods Comparison / L. Babich, D. Svalov, A. Smirnov and M. Babich // 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2019. – P. 307-309. – DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736640.

11. Sebel'din, A. S. Neobkhodimost' kratkosrochnogo prognozirovaniya energopotrebleniya ob"ektov neftegazodobychi [Need for short-term energy forecasting of oil and gas production facilities] / A. S. Sebel'din // Molodoi uchenyi [Young scientist]. — 2023. — № 52 (499). — C. 42-44. (in Russ.)

12. Madhukumar, M. Regression Model-Based Short-Term Load Forecasting for University Campus Load / M. Madhukumar, A. Sebastian, X. Liang, M. Jamil and M. N. S. K. Shabbir // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 8891-8905. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3144206.

13. Sergeev, N. Improving Accuracy of Machine Learning Based Short-Term Load Forecasting Models with Correlation Analysis and Feature Engineering / N. Sergeev, P. Matrenin // Proc. 2023 IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). – 2023. – P. 1000-1004. – DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225058.

14. Ahmed, G. From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Survey on What, How, and Where / I. Ahmed, G. Jeon, F. Piccialli, // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2022. – Vol. 18. – No. 8. – PP. 5031-5042. – DOI: 10.1109/TII.2022.3146552.

15. Matrenin, P. V. Solar Irradiance Forecasting with Natural Language Processing of Cloud Observations and Interpretation of Results with Modified Shapley Additive Explanations / P.V. Matrenin, V.V. Gamaley, A.I. Khalyasmaa, A.I. Stepanova // Algorithms. – 2024. – Vol. 17. – 150. – DOI: 10.3390/a17040150

16. Balaji, P.G. An Introduction to Multi-Agent Systems. Innovations in Multi-Agent Systems and Applications-1 / P. G. Balaji, D. Srinivasan // Studies in Computational Intelligence. – 2010. – Vol. 310. – P.1-27. – DOI: 10.1007/978-3-642-14435-6_1.

17. Bui, V-H. Q-Learning-Based Operation Strategy for Community Battery Energy Storage System (CBESS) in Microgrid System / V.-H. Bui, A. Hussain, H.-M. Kim // Energies. – 2019. – Vol.12(9). – 1789. – DOI: 10.3390/en12091789.

18. Li, Q. Review of Deep Reinforcement Learning and Its Application in Modern Renewable Power System Control / Q. Li, T. Lin, Q. Yu, H. Du, J. Li, X. Fu, Q. Li // Energies. – 2023. – Vol.16(10). – 4143. – DOI: 10.3390/en16104143.

19. Antonenkov, D.V. Issledovanie ansamblevykh i neirosetevykh metodov mashinnogo obucheniya v zadache kratkosrochnogo prognozirovaniya elektropotrebleniya gornykh predpriyatii [Study of ensemble and neural network machine learning methods in the task of short-term forecasting of electrical consumption of mining enterprises] / D.V. Antonenkov, P.V. Matrenin // Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy [Electrical systems and systems]. – 2021. – № 3(52). – C. 57-65. – DOI: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-57-65

20. Li, S. Enhancing LightGBM for Industrial Fault Warning: An Innovative Hybrid Algorithm / S. Li, S. N. Jin, A. Dogani, Y. Yang, M. Zhang, X. Gu // Processes. – 2024. – Vol. 12(1). – 221. – DOI: 10.3390/pr12010221.

Authors of the publication

Alina I. Stepanova – Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0002-3484-2295*. *a.i.stepanova@urfu.ru*

Alexandra I. Khalyasmaa – Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0001-5327-6076*. *a.i.khaliasmaa@urfu.ru*

Pavel V. Matrenin – Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. *ORCID*:* *https://orcid.org/0000-0001-5704-0976*. *p.v.matrenin@urfu.ru*

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено ***16.04.2024 г.***

Отредактировано ***22.05.2024 г.***

Принято ***30.05.2024 г.***

© Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

(cc) BY

УДК 621.315 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99**

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И.

Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия
rassel_ipek@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ. Протяженность и сложность географии магистралей КЛ среднего напряжения находится на высоком уровне. Такие линии распространяются под землей, на опорах в воздухе. Чтобы постоянно поддерживать надежность городского электроснабжения на высоком уровне, следует оперативно исправлять любые перебои и аварии. ЦЕЛЬ. Основной целью работы является развитие теории исследования КЛ среднего напряжения, практически и теоретически обоснованный поиск наиболее удобной и эффективной установки для диагностики КЛ, изучение и разработка возможных модификаций установок для диагностики КЛ. МЕТОДЫ. Предложен вариант диагностики КЛ на основе установки CPDA-60, позволяющий найти и локализовать места возникновения дефектов в изоляции на основании измерения и анализа частичных разрядов (ЧР). Применима для контроля изоляции во всех типах кабелей высокого напряжения. Установка CPDA может быть использована при испытании вводимых в эксплуатацию новых кабельных линий, и для проведения анализа состояния старых кабелей, находящихся в эксплуатации. РЕЗУЛЬТАТЫ. Кабельные линии нуждаются в комплексном подходе к диагностике и мониторингу, так как надежность современных систем аутентификации для генерации и распределения электроэнергии в значительной степени определяется электрической надежностью электрооборудования. Техническое диагностирование оборудования является ключевым звеном, от качества которого зависит эффективность процессов организации производственной деятельности, стратегического планирования и реновации электросетевых активов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Изучение и анализ представленных данных и исследований позволяют сформировать заключение относительно метода измерения и локализации частных разрядов (ЧР) в силовых кабельных линиях (КЛ) с использованием диагностической системы Online Wire Testing System (OWTS). Система OWTS позволяет проводить измерения в реальном времени без прерывания эксплуатации кабельных линий, что делает ее особенно ценной для энергетической индустрии. Благодаря внедрению передовых технологий и алгоритмов обработки сигналов, метод обладает высокой точностью и чувствительностью к минимальным проявлениям частных разрядов, что позволяет не только обнаруживать, но и точно локализовать местоположение дефектов в изоляции. Применение данного метода может значительно увеличить продолжительность эксплуатационного периода силовых кабелей, снизить вероятность внезапных аварий и, как следствие, сократить расходы на ремонт и обслуживание электроэнергетического оборудования. В конечном счете, улучшение методов диагностики и мониторинга, включая метод измерения и локализации ЧР в силовых КЛ с использованием OWTS, представляет собой значительный шаг в направлении повышения надежности и безопасности электроэнергетических систем. Это позволит не только снизить эксплуатационные расходы, но и обеспечить бесперебойное и качественное электроснабжение потребителей.*

Ключевые слова: *электроэнергетика; испытания; диагностика; кабельные линии; изоляция; частичные разряды.*

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.

OPTIMIZATION OF MONITORING SYSTEMS POWER CABLE LINES

Balobanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
rassel_ipek@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE. The length and complexity of the geography of medium voltage cable lines is at a high level. Such lines extend underground, on supports in the air. In order to constantly maintain the reliability of city power supply at a high level, any interruptions and accidents should be promptly corrected. TARGET. The main goal of the work is to develop the theory of medium voltage CL research, to practically and theoretically substantiate the search for the most convenient and effective installation for CL diagnostics, to study and develop possible modifications of CL diagnostic installations. METHODS. A variant of CL diagnostics based on the CPDA-60 installation is proposed, which makes it possible to find and localize the places where defects occur in the insulation based on the measurement and analysis of partial discharges (PD). Suitable for insulation monitoring in all types of high voltage cables. The CPDA installation can be used when testing new cable lines being put into operation, and to analyze the condition of old cables in operation. RESULTS. Cable lines require an integrated approach to diagnostics and monitoring, since the reliability of modern authentication systems for the generation and distribution of electricity is largely determined by the electrical reliability of electrical equipment. Technical diagnostics of equipment is a key link, the quality of which determines the efficiency of the processes of organizing production activities, strategic planning and renovation of electric grid assets. CONCLUSION. The study and analysis of the presented data and research allows us to form a conclusion regarding the method of measuring and localizing partial discharges (PD) in power cable lines (CL) using the Online Wire Testing System (OWTS) diagnostic system. The OWTS system allows real-time measurements without interrupting cable lines, making it especially valuable to the energy industry. Thanks to the introduction of advanced technologies and signal processing algorithms, the method has high accuracy and sensitivity to minimal manifestations of private discharges, which allows not only to detect, but also to accurately localize the location of defects in the insulation. The use of this method can significantly increase the service life of power cables, reduce the likelihood of sudden accidents and, as a result, reduce the cost of repair and maintenance of electrical power equipment. Ultimately, improvements in diagnostic and monitoring techniques, including the method of measuring and localizing PD in power lines using OWTS, represent a significant step towards improving the reliability and safety of electrical power systems. This will not only reduce operating costs, but also ensure uninterrupted and high-quality power supply to consumers.*

Keywords: *power industry; testing; diagnostics; cable line; insulation; partial discharges.*

For citation: Balobanov R.N., Bulatova V.M., Kryuchkov N.S., Shafikov I.I. Optimization of monitoring systems power cable lines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 89-99. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-89-99.

Введение (*Introduction)*

В современных электроэнергетических системах надежность и эффективность передачи электроэнергии являются ключевыми аспектами, обеспечивающими стабильное функционирование как промышленности, так и бытового сектора. Одной из критически важных составляющих таких систем являются силовые кабельные линии, от которых зависит бесперебойное снабжение энергией на любые расстояния. Учитывая высокую значимость этих линий, важнейшим аспектом их эксплуатации становится постоянный мониторинг состояния, позволяющий своевременно выявлять и устранять возможные неисправности, а также предотвращать аварийные ситуации.

Диагностика кабельных линий играет критическую роль в обеспечении надежности и безопасности электротехнических систем. Существуют несколько методов диагностики кабельных линий, каждый из которых имеет свои преимущества и применения. Один из самых распространенных методов — это визуальный осмотр, который позволяет выявить явные повреждения и износы изоляции. Электротехнические измерения, такие как измерение сопротивления изоляции и высоковольтные испытания, помогают обнаружить скрытые дефекты и предсказать сроки возможных отказов. Кроме того, современные

методы, такие как частотный анализ или время-пролётные диагностики (TDR), позволяют с высокой точностью определять места повреждений кабелей и оценивать их состояние. Использование тепловизоров и инфракрасной диагностики также может помочь выявить участки с перегревом, что может свидетельствовать о проблемах в изоляции или соединениях. Комплексное применение этих методов позволяет своевременно обнаруживать и устранять дефекты, обеспечивая долгий срок службы и надежную работу кабельных линий.

Однако традиционные методы мониторинга, зачастую, обладают рядом ограничений, что приводит к необходимости разработки более эффективных и надёжных систем. Оптимизация систем мониторинга силовых кабельных линий становится не просто желательной, а незаменимой практикой для обеспечения высокого уровня безопасности и надежности энергоснабжения. Этот процесс включает внедрение новейших технологий, алгоритмов анализа данных и систем прогнозирования, позволяющих значительно повысить эффективность контроля и диагностики.

В данной статье рассмотрены основные подходы к оптимизации систем мониторинга силовых кабельных линий, исследованы актуальные проблемы и предложены методы их решения. Также будут обсуждены перспективы использования современных информационно-аналитических платформ и интеллектуальных систем в области мониторинга кабельных сетей.

В кабельных линиях часто возникают проблемы, ведущие к отказам и снижению надежности работы электроэнергетических систем. Одной из главных причин отказов является физическое повреждение, которое может возникнуть вследствие внешних воздействий, таких как землеройные работы, дорожное строительство или даже деятельность животных. Износ изоляции и проводников также является серьезной проблемой, часто обусловленной длительным эксплуатационным сроком или воздействием агрессивных сред, включая влагу и химические реагенты. Электрические перегрузки и короткие замыкания в результате недостаточного мониторинга и обслуживания могут привести к перегреву и возгоранию. Кроме того, человеческий фактор, например ошибки при монтаже и эксплуатации, вносит свой вклад в общий уровень риска отказов кабельных линий.

Из анализа статистики коротких замыканий с 2020 года [1] следует, что более 75% технологических отказов в кабельных линиях напряжением 6-10 кВ происходят из-за пробоев изоляции. Наиболее проблемными элементами являются изоляция кабелей и кабельные муфты, а вероятность пробоя изоляции зависит от ее износа и остаточного ресурса. Вероятность повреждения кабельных муфт связана с качеством материалов и монтажа. Наличие дефектов, таких как газовые или твердотельные включения в изоляции кабеля или кабельных муфт, может привести к развитию ЧР, которые вызывают пробой изоляции.

Мониторинг в реальном времени кабельных линий представляет собой передовую технологию, обеспечивающую непрерывное наблюдение и анализ состояния кабелей в режиме онлайн. С помощью специализированных датчиков и систем автоматического сбора данных, информация о параметрах кабельной системы, таких как напряжение, ток, температура и механические нагрузки, отправляется на центральные серверы для анализа. Это позволяет немедленно выявлять и реагировать на потенциальные неисправности, перегрузки или повреждения, минимизируя риск аварий и простоя оборудования. В итоге, подобные системы значительно повышают надежность и безопасность эксплуатации кабельных линий, снижая затраты на обслуживание и ремонты.

Сейчас целесообразность использования и выбор систем, методов и средств технического диагностирования определяется рядом факторов. В первую очередь это необходимость точной оценки и уменьшения рисков потери оборудования, системного ущерба, убытков от недопоставки электроэнергии и штрафов за нарушение контрактных обязательств, а также соблюдения экологических и безопасности требований. Техническое диагностирование оборудования играет ключевую роль, так как от его качества зависят эффективность организации производственной деятельности, стратегическое планирование и обновление электросетевых активов [2].

На сегодняшний день, развитие во всем мире кабельных распределительных сетей привело к внедрению кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. В настоящее время рынок силовых кабелей большинства развитых с промышленной точки зрения стран Европы практически на 100% занят кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена [3, 4]. Переход от кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) к кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) связан как с моральным, так и полностью физическим

устареванием кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Полиэтилен на данный момент является наиболее популярным материалом, применяемым при изготовлении кабелей. Однако обычный полиэтилен нельзя использовать в виде изоляции силовых кабелей, так как он имеет достаточно большое количество серьезных недостатков. Для решения этой проблемы используют так называемый «сшитый» полиэтилен, который не имеет недостатков обычного полиэтилена. На данный момент в России также, как и во всем мире ведется активное внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Современные отечественные заводы по производству кабелей уже освоили технологию изготовления современных кабелей и производят их по принятым мировым стандартам [5, 6].

Но несмотря на все свои достоинства, в процессе эксплуатации силовые кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, подвергаются различным факторам, вызывающим физическое старение и повреждение изоляции, а следовательно, ухудшение электрических и химических свойств изоляции кабельной линии. Для предупреждения аварий на кабельной линии и для разработки последовательности дальнейших действий по замене силовых кабелей с серьезными дефектами или с выработанным ресурсом изоляции необходимо иметь полную и достоверную информацию о текущем состоянии изоляции кабеля [7]. Для оценки состояния кабеля в условиях текущей эксплуатации применяются различные методы испытаний и диагностики, в их числе современные и традиционные методы, которые в некоторых случаях уступают современным методам по эффективности [8].

В современной электроэнергетике используются компактные диагностические системы и приборы для неразрушающего контроля силовых кабельных линий (КЛ) с напряжением до 35 кВ. Среди них:

1. Метод измерения и локализации частичных разрядов в силовых КЛ с помощью диагностической системы OWTS [9].
2. Метод измерения и анализа возвратного напряжения в изоляции силовых кабелей, применяющий системы CD 31 и CDS.
3. Метод измерения тока релаксации в изоляции кабелей из сшитого полиэтилена с использованием диагностических систем KDA-1 и CDS.
4. Метод измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей, внедряющий системы OWTS, IDA 200 и другие.
5. Метод импульсной рефлектометрии для предварительной локализации низкоомных повреждений в силовых КЛ с использованием рефлектометров Teleflex, InterFlex и прочих устройств, а также импульсно-дуговой метод для локализации высокоомных повреждений с системой стабилизации дуги.
6. Метод контроля целостности оболочки силовых кабелей и выявления мест неисправностей с использованием приборов MFM 5-1, MVG 5 и аналогичных устройств.

Современные методики диагностики и испытаний находятся на достаточно высоком уровне, чтобы заменить устаревшие методы. Тем не менее они требуют дальнейшего совершенствования для улучшения качества оценки состояния кабельных сетей, повышения надежности их бесперебойной работы и снижения числа аварий.

Научная значимость исследования, посвященного методу измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей с использованием диагностических систем частичных разрядов (OWTS - Oscillating Wave Test System), заключается в следующем:

1. Повышение надежности кабельных систем: Современные кабели часто эксплуатируются в жестких условиях, их изоляция подвергается электрическим, термическим и механическим нагрузкам. Разработка и совершенствование методов диагностики позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные дефекты, предупреждая серьезные аварии и повышая общую надежность кабельных систем.
2. Разработка новых диагностических технологий. Применение систем частичных разрядов, таких как OWTS, представляет собой важный технологический прогресс. Этот метод позволяет проводить неразрушающий контроль изоляции, что является более безопасным и экономически эффективным по сравнению с традиционными методами, которые могут требовать отключения оборудования и проведения сложных и дорогих ремонтных работ.
3. Глубокий анализ диэлектрических свойств: Исследование методики измерения диэлектрических характеристик с применением OWTS-систем позволяет углубить знания о поведении изоляционных материалов под воздействием электрических полей. Это способствует разработке новых материалов с улучшенными характеристиками и долговечностью, а также оптимизации уже существующих изоляционных систем.

4. Теоретический вклад в электротехнику и материаловедение: Работа по изучению параметров частичных разрядов и их влияния на диэлектрические характеристики изоляции делает значительный вклад в теоретические основы электротехники и материаловедения. Понимание механизмов возникновения и развития частичных разрядов способствует более точному моделированию и предсказанию поведения изоляционных систем в реальных условиях эксплуатации.

5. Влияние на стандартизацию и регулирование: Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых стандартов и нормативных документов, регулирующих методы испытаний и диагностики кабельных сетей. Это способствует унификации диагностических процедур и повышению безопасности и надежности кабельных систем.

6. Практическое значение для энергетики и промышленности: Успешное применение OWTS-систем на практике непосредственно влияет на эксплуатационные процессы в энергетических и промышленных предприятиях. Это позволяет снизить затраты на обслуживание и ремонт, улучшить энергетическую эффективность и увеличить срок службы кабельных систем.

Таким образом, исследование метода измерения диэлектрических характеристик изоляции кабелей с использованием диагностических систем OWTS имеет значительное научное и практическое значение, влияя на различные аспекты теории и практики в области электротехники и кабельных технологий.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Система CPDA (Cable Partial Discharge Analysis) предназначена для мониторинга состояния кабельных линий путем измерения и анализа частичных разрядов (Partial Discharges, PD). Метод OWTS (Oscillating Wave Test System) используется для выявления и локализации дефектов в кабельной изоляции на основе анализа осциллирующих волн.. Недостатком системы OWTS является сложность определения проблемных участков на последних 100 метрах длины кабеля (в зависимости от общей длины КЛ), а также невозможность локализации частичных разрядов в кабельных линиях длиной менее 80 метров без дополнительных мер [10, 11]. В связи с этим диагностика каждой кабельной линии обязательно должна проводиться с обоих её концов, тогда как обследование кабеля только с одной стороны допускается лишь в исключительных случаях. В общем случае должно применяться одно из следующих технических решений [11, 12].

1) Диагностика с обоих концов КЛ – для КЛ длиной более 80 м.

2) Диагностика двух КЛ, соединенных пофазно на противоположном конце (если энергоснабжение объекта осуществляется двумя и более параллельными КЛ, или транзитом через промежуточный объект).

3) Диагностика с дополнительным кабелем, присоединенным к дальнему или ближнему концу КЛ.

Могут возникать ситуации, когда подключение диагностической аппаратуры с одной из сторон КЛ трудно реализуемо, в силу причин организационного или производственного характера. В таких случаях КЛ необходимо диагностировать с одной стороны, однако дополнительно следует провести измерения с соединенными фазами на противоположном конце КЛ [13, 14].

Для КЛ длиной менее 80 м такой способ диагностики является основным. Если ЧР не фиксируются, то необходимость в измерениях с соединенными фазами на противоположном конце КЛ отпадает.

Если энергоснабжение объекта осуществляется двумя и более параллельными КЛ либо транзитом через промежуточный объект, то допускается проводить диагностику одновременно двух КЛ, соединенных пофазно на противоположном конце линии (этот способ обязателен при длине параллельных линий менее 80 м). При этом суммарная длина КЛ должна быть не более 1500 м, а каждую КЛ следует продиагностировать отдельно, с одной стороны. В исключительных случаях допускается не диагностировать КЛ отдельно [15, 16].

Вместо штатного дополнительного кабеля может применяться другой кабель, если таковой имеется у заказчика. Например, для искусственного удлинения КЛ с БПИ целесообразнее использовать кабель также с БПИ.

Следует иметь в виду, что в некоторых случаях устройство прижимного механизма (как правило, пружинный) присоединительного кабеля может вызывать помехи в месте его присоединения к жилам испытуемого кабеля, которые ошибочно могут быть приняты за ЧР [17, 18]. Также при проведении диагностических испытаний следует учитывать возможные помехи от сторонних источников.

В России есть ряд компаний, специализирующихся на автоматизации проектирования и изготовлении компонентов для электрических распределительных систем, таких как ООО «ЭнергоПроект», ИнСим и ООО «Димрус». Например, переносная система контроля изоляции кабельных линий по методу «OWTS» типа CPDA [19,20], производства отечественной компанией ООО «Димрус» (рис. 1).

Система CPDA доступна в различных вариантах, в зависимости от максимального тестируемого напряжения. В её состав обычно входят высоковольтный источник питания, генератор сигналов, система ввода сигнала, датчики частичных разрядов, система обработки сигналов, калибратор, программное обеспечение для анализа данных, система синхронизации, а также набор соединительных кабелей и проводов.

Для того чтобы проанализировать данные, полученные системой CPDA, нужно проводить несколько измерений (выборок). Это необходимо потому, что каждый отдельный замер может содержать случайные импульсы частичных разрядов, которые не повторяются и могут возникать даже в исправных кабельных линиях. При анализе данных основное внимание следует уделить определению места возникновения повторяющихся частичных разрядов.

Рис. 1. Система «CPDA-60» *Fig. 1. System «CPDA-60»*
**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Основные параметры, которые следует определить при анализе данных, включают величину частичных разрядов (ЧР), место их возникновения, напряжение при инициации и гашении ЧР, а также количество ЧР в локальной зоне кабельной линии (КЛ).

Состояние кабельной линии оценивается посредством измерения и анализа частичных разрядов с использованием интегрированной экспертной системы «PD-Expert».

Перед началом измерений проводится градуировка системы с помощью градуировочного генератора, подключенного параллельно. Затем кабельную линию заряжают постоянным током небольшой силы, обычно несколько миллиампер, до испытательного напряжения, которое, как правило, не превышает амплитудное линейное значение. После зарядки емкости кабельной линии высоковольтный контактор K замыкается, что приводит к разряду накопленного электричества на землю через индуктивность L, величина которой составляет примерно 0,5–1 Гн. Это создает затухающие синусоидальные колебания в диапазоне 20–1000 Гц в контуре, состоящем из емкости кабеля и индуктивности катушки, в зависимости от емкости тестируемого объекта. В этот момент производится регистрация частичных разрядов (рис. 2).

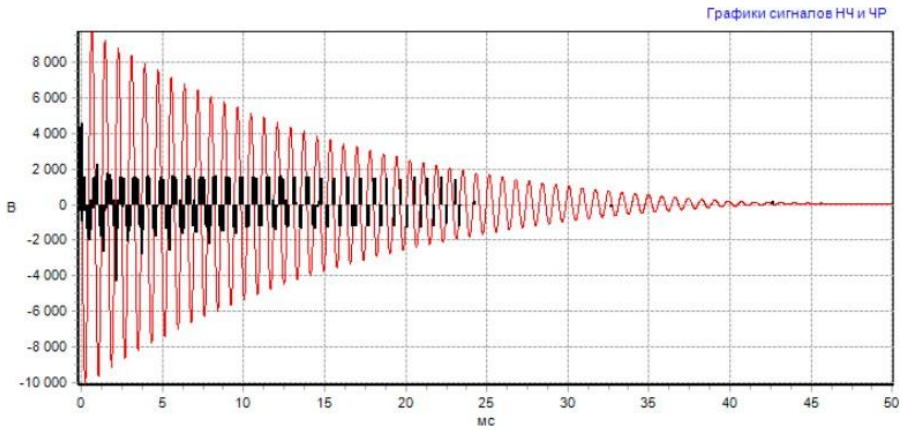


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и ЧР, полученная на установке CPDA *Fig. 2. Voltage and PD oscillogram obtained on a CPDA setup*
**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Диагностику с использованием CPDA рекомендуется выполнять по заранее составленной программе, включающей несколько измерений с постепенным увеличением испытательного напряжения. Шаг повышения напряжения рекомендуется выбирать равным 1 кВ или $0{,}1U_0$ (где U_0 – линейное напряжение). Количество повторений для значений ниже $0{,}7U_0$ можно установить от 1 до 2 раз. Эти измерения необходимы для определения напряжения, при котором возникают частичные разряды (ЧР). При испытательных напряжениях выше $0{,}7U_0$ рекомендуется проводить больше измерений, чтобы собрать больше данных для анализа.

Преимущество таких установок, как CPDA, заключается также в возможности локализации частичных разрядов по длине кабельной линии с помощью рефлектометрического метода, основанного на определении времени регистрации прямого и отраженного от противоположного конца кабеля сигналов.

Результаты и обсуждение *(Results and Discussions)*

Ключевым шагом после измерения характеристик частичных разрядов в кабельной линии является оценка диагностических результатов и составление заключения. Для этого необходимо иметь критерии для оценки критичности частичных разрядов на основании их характеристик.

Рассмотрим результаты испытаний, проведённых на установке CPDA-60 для кабельной линии 35кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Диагностика выполнялась на кабеле АПвБВнг(А)-LS-35(3х150) АПвПу 1х150-50-35 длиной 2595 м.

В результате измерений, программный комплекс, встроенный в блок обработки сигналов, анализирует собранные данные и представляет их в графическом и цифровом формате.

Амплитудное распределение и гистограмма по длине кабеля (рис. 3, 4) отчётливо показывают участки кабельной линии, где возможно развитие дефектов изоляции.

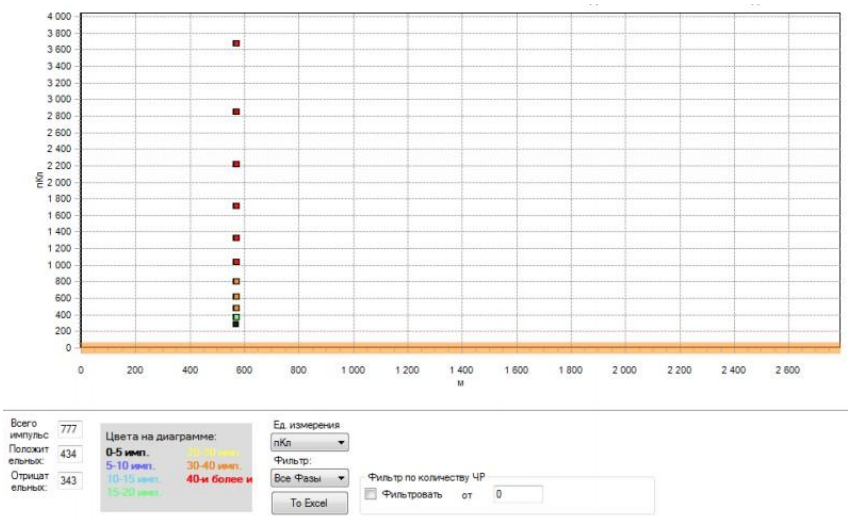


Рис. 3. Амплитудное распределение ЧР по длине кабеля

Fig. 3. Amplitude distribution of PD along the cable length

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

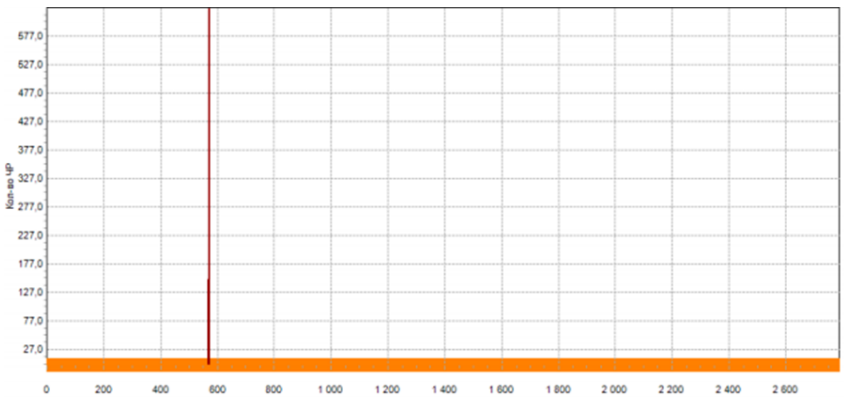


Рис. 4. Гистограмма распределения ЧР по длине кабеля

Fig. 4. Histogram of PD distribution along the cable length

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

В ходе экспериментов система CPDA успешно обнаружила частичные разряды во всех тестируемых кабельных образцах. Максимальная чувствительность системы составила 0.5 пикокулонов (pC) в диапазоне частот от 30 до 300 МГц.

Амплитудно-фазовое распределение импульсов частичных разрядов (фазовая диаграмма), представленное на рисунке 5, демонстрирует их распределение и амплитуды в рамках одного периода колебания напряжения. Это даёт возможность выявить тип дефекта.

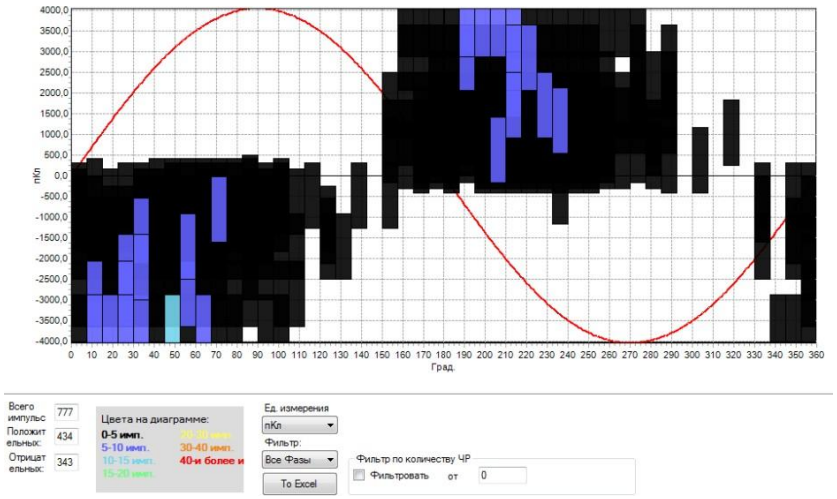


Рис. 5. Амплитудно-фазовое распределение импульсов ЧР

Fig. 5. Amplitude-phase distribution of PD pulses

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

Результаты исследования показали, что система CPDA представляет собой эффективный инструмент для анализа и диагностики кабельных линий. Ее способность детектировать и локализовать частичные разряды с высокой точностью и в реальном времени предоставляет значительные преимущества по сравнению с традиционными методами. Однако требуется дальнейшее совершенствование алгоритмов обработки и адаптация системы к различным условиям эксплуатации.

***Заключение** (Conclusions)*

В заключение можно отметить, что использование диагностической системы OWTS (Oscillating Wave Test System) для измерения и локализации частичных разрядов в силовых кабельных линиях (КЛ) представляет собой эффективный и передовой метод диагностики состояния кабельных сетей. Система OWTS позволяет не только выявлять наличие частичных разрядов, но и точно определять их локализацию, что значительно упрощает процесс технического обслуживания и ремонта кабелей.

Рассмотренные в статье методики и результаты исследований подтверждают, что OWTS обладает высокой точностью и надежностью, позволяя обнаруживать дефекты на ранних стадиях развития. Это позволяет существенно повысить эксплуатационную надежность кабельных линий, минимизируя риски аварийных ситуаций и внезапных выходов из строя оборудования.

Применение OWTS особенно актуально в условиях возрастающего энергетического потребления и необходимости повышения надежности электроснабжения. Внедрение таких диагностических систем в практику эксплуатации кабельных сетей способствует увеличению срока службы кабелей, снижению затрат на ремонт и обслуживание, а также повышению общей эффективности работы энергетической инфраструктуры.

Таким образом, метод измерения и локализации частичных разрядов с помощью системы OWTS является важным инструментом в арсенале современных диагностических технологий, обеспечивающим высокое качество и надежность эксплуатации силовых кабельных линий. Однако следует упомянуть и факторы, которые пока что не позволяют полностью отказаться от испытаний повышенным напряжением. Важным недостатком при полевой диагностике кабельных линий, помимо невозможности определения некоторых видов дефектов, являются сложности с интерпретацией результатов, ввиду достаточно большой подверженности влиянию помех.

Литература

1. Коржов А. В. и др. Анализ статистики технологических нарушений в кабельных распределительных сетях 6 (10) кВ //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23. – №. 4. – С. 5-13.

2. Малабаев Б. К., Байгазиев А. А. Диагностирования кабельных линий в электрических сетях 6-35 КВ //Научные исследования–основа современной инновационной системы. – 2023. – С. 197.

3. Методика обнаружения опасных зон в изоляции кабельных линий по характеристикам частичных разрядов / А. Ю. Кубарев, А. Е. Усачев, Т. В. Лопухова, Ю. Г. Кубарев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 1-2. – С. 187-190.

4. Поляков Д. А. и др. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи //Омский научный вестник. – 2020. – №. 6 (174). – С. 63-68.

5. Соловьева Т. А. Диагностика местных неисправностей в кабельных линиях при помощи измерения частичных разрядов (ЧР) //Научный журнал молодых ученых. – 2022. – №. 2 (27). – С. 76-81.

6. Сафин А. И., Парвазетдинов К. Л., Доломанюк Л. В. Анализ неразрушающих методов диагностики кабельных линий //ББК 72 Ф 97. – 2023.

7. Шепелев А. О., Осипов Д. С., Ткаченко В. А. Development of correction coefficients for cable cross-sections selection in polymeric cable channel //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2024. – Т. 335. – №. 3. – С. 7-16.

8. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. — Новосибирск: Наука, 2007.

9. Волохович А. Б., Кокорин А. Е. Результаты массового обследования кабельных линий 6-35 кВ установками CPDA //Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – №. 3. – С. 39-47.

10. Мифтахова Н. К. и др. Методика оценки результатов диагностики кабельных линий среднего напряжения с применением вероятностной модели надежности //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – №. 5-6. – С. 114-118.

11. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – С. 112882.

12. Степанов, В.М. Методы местонахождения повреждённых участков кабельных линий напряжением 35-500кВ / В.М. Степанов, П.А. Борисов. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып.3. – Ч.5. – С.94-97.

13. Hassan W. et al. Investigating the progression of insulation degradation in power cable based on partial discharge measurements //Electric Power Systems Research. – 2023. – Т. 221. – С. 109452.

14. Kumar H. et al. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques //Energies. – 2024. – Т. 17. – №. 5. – С. 1142.

15. Беляков, В.В. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени / В.В. Беляков, А.В. Малышев // Электро, 2008. – №5. – С. 38 – 40.

16. Fikri M., Abdul-Malek Z. Partial discharge diagnosis and remaining useful lifetime in XLPE extruded power cables under DC voltage: a review //Electrical Engineering. – 2023. – Т. 105. – №. 6. – С. 4195-4212.

17. Казанина И. В., Хадыева А. Р. Эффективность применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с системой мониторинга. //Вестник электротехники. – 2013. – №4. – С. 14.

18. Борисов, П.А. Модель электротехнического комплекса диагностики технического состояния силовых кабельных линий / В.М. Степанов, П.А. Борисов // Известия ТулГУ. Технические науки. -2013.

19. Sun C. et al. Convolutional Neural Network-Based Pattern Recognition of Partial Discharge in High-Speed Electric-Multiple-Unit Cable Termination //Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 8. – С. 2660.

20. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – С. 112882.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru

Булатова Венера Михайловна – канд. пед. наук, доцент, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: bulatovavenera@mail.ru

Крючков Никита Сергеевич – бакалавр, кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: makintoshrg53@gmail.com

Шафиков Ильмир Ильдарович – бакалавр**,** кафедра «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: 07ilmir07@gmail.com

References

1. Korzhov A.V. et al. Analysis of statistics of technological violations in cable distribution networks 6 (10) kV // Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. – 2023. – T. 23. – No. 4. – pp. 5-13.

2. Malabaev B.K., Baygaziev A.A. Diagnosis of cable lines in electrical networks 6-35 kV // Scientific research - the basis of the modern innovation system. – 2023. – P. 197.

3. Methods for detecting hazardous areas in the insulation of cable lines based on the characteristics of partial discharges / A. Yu. Kubarev, A. E. Usachev, T. V. Lopukhova, Yu. G. Kubarev // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2012. – No. 1-2. – pp. 187-190.

4. Polyakov D. A. et al. Study of the characteristics of partial discharges in artificial defects in power lines // Omsk Scientific Bulletin. – 2020. – No. 6 (174). – pp. 63-68.

5. Solovyova T. A. Diagnosis of local faults in cable lines using partial discharge (PD) measurements // Scientific journal of young scientists. – 2022. – No. 2 (27). – P. 76-81.

6. Safin A.I., Parvazetdinov K.L., Dolomanyuk L.V. Analysis of non-destructive methods for diagnosing cable lines //BBK 72 F 97. – 2023.

7. Shepelev A. O., Osipov D. S., Tkachenko V. A. Development of correction coefficients for cable cross-sections selection in polymeric cable channel //Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. – 2024. – T. 335. – No. 3. – pp. 7-16.

8. Vdoviko V. P. Partial discharges in diagnosing high-voltage equipment. - Novosibirsk: Science, 2007.

9. Dimrus LLC. "Cable line insulation monitoring system "CPDA". Operation manual."

10. Miftakhova N.K., Ivshin I.V., Gavrilov V.A., Gimadiev R.A. Methodology for assessing the results of diagnostics of medium voltage cable lines using a probabilistic reliability model. - Kazan State Energy University, 2013.

11. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – P. 112882.

12. Stepanov, V.M. Methods for locating damaged sections of cable lines with voltage 35-500 kV / V.M. Stepanov, P.A. Borisov. // News of Tula State University. Technical science. – 2010. – Issue 3. – Part 5. – P.94-97.

13. Hassan W. et al. Investigating the progression of insulation degradation in power cable based on partial discharge measurements //Electric Power Systems Research. – 2023. – T. 221. – P. 109452.

14. Kumar H. et al. A Review on the Classification of Partial Discharges in Medium-Voltage Cables: Detection, Feature Extraction, Artificial Intelligence-Based Classification, and Optimization Techniques // Energies. – 2024. – T. 17. – No. 5. – P. 1142.

15. Belyakov, V.V. Monitoring of power cable lines with adaptation to environmental conditions in real time / V.V. Belyakov, A.V. Malyshev // Electro, 2008. – No. 5. – P. 38 – 40.

16. Fikri M., Abdul-Malek Z. Partial discharge diagnosis and remaining useful lifetime in XLPE extruded power cables under DC voltage: a review //Electrical Engineering. – 2023. – T. 105. – No. 6. – pp. 4195-4212.

17. Kazanina I.V., Khadyeva A.R. Efficiency of using cables with cross-linked polyethylene insulation with a monitoring system. // Bulletin of Electrical Engineering. – 2013. – No. 4. – P. 14.

18. Borisov, P.A. Model of an electrical engineering complex for diagnosing the technical condition of power cable lines / V.M. Stepanov, P.A. Borisov // News of Tula State University. Technical science. - 2013.

19. Sun C. et al. Convolutional Neural Network-Based Pattern Recognition of Partial Discharge in High-Speed Electric-Multiple-Unit Cable Termination //Sensors. – 2024. – T. 24. – No. 8. – P. 2660.

20. Govindarajan S. et al. A review on partial discharge diagnosis in cables: Theory, techniques, and trends //Measurement. – 2023. – P. 112882.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Venera M. Bulatova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Nikita S. Kryuchkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

© Балобанов Р.Н., Булатова В.М., Крючков Н.С., Шафиков И.И.

Ilmir I. Shafikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено	***30.06.2024 г.***
Отредактировано	***23.07.2024 г.***
Принято	***30.07.2024 г.***

© Шигина А.В., Хоршев А.А.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

(cc) BY

УДК 620.9 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-100-114**

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УГЛЕРОДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Шигина А.В., Хоршев А.А.

Институт энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), г. Москва, Россия
shigina_av@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в оценке влияния различных мер углеродного регулирования, стимулирующих достижение национальных климатических целей, на масштабы развития отдельных технологий производства электроэнергии и тепла в России. ЦЕЛЬ. Рассмотреть изменение оптимальной структуры технологий в электроэнергетике и централизованном теплоснабжении России в перспективе 2050 года вследствие введения в 2030 году различных мер углеродного регулирования. МЕТОДЫ. Проведена оптимизация структуры энергетических технологий в энергетике России по критерию минимума суммарных дисконтированных затрат на энергоснабжение экономики до 2050 года с помощью разработанной в ИНЭИ РАН модели EPOS. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены масштабы изменения установленной мощности и объемов производства электроэнергии различных типов электростанций в ЕЭС России, а также отпуска тепла от различных централизованных источников теплоснабжения к 2050 году для 16 вариантов мер углеродного регулирования и базового варианта развития энергетики. Описана оптимальная структура технологий в электроэнергетике и централизованном теплоснабжении в условиях действия отдельных административных, фискальных и экономических мер. Сопоставлены варианты стимулирующих мер климатической политики на основе соответствующих приростов установленной мощности электростанций в ЕЭС России к 2050 году. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Декарбонизация сектора производства электроэнергии с учетом текущих прогнозов научно-технического прогресса будет преимущественно происходить за счет атомной энергии, производства тепла – за счет электрокотельных. При этом для вариантов углеродного регулирования, приводящих к снижению выбросов парниковых газов к 2050 году до уровня не выше 70% относительно 2019 года, АЭС станут новой доминантой в структуре производства электроэнергии вместо газовых ТЭС. Суммарный прирост установленной мощности электростанций в ЕЭС России к 2050 году может отличаться почти в семь раз для различных мер углеродного регулирования. Среди рассмотренных мер углеродного регулирования наиболее сильно влияют на структуру технологий в электроэнергетике и централизованном теплоснабжении России квотирование выбросов и углеродное налогообложение.*

Ключевые слова: *энергетические технологии; развитие электроэнергетики; структура генерирующих мощностей; низкоуглеродное развитие; углеродное регулирование; выбросы парниковых газов; системное моделирование.*

Благодарности: *Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30013) в Институте энергетических исследований Российской академии наук.*

Для цитирования: Шигина А.В., Хоршев А.А. Изменение структуры технологий в энергетике России под воздействием углеродного регулирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 100-114. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-100-114.

THE TECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF THE RUSSIAN ENERGY SECTOR FORCED BY CARBON REGULATION

Shigina A.V., Khorshev A.A.

The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), Moscow, Russia

shigina_av@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE of the study lies in the assessment of the impact that various carbon regulation instruments stimulating the achievement of national climate goals have on the development scale of different electricity and heat production technologies in Russia. THE PURPOSE. To consider the change in the optimal technological structure of the electric power industry and district heating in Russia by 2050 assuming the introduction of various carbon regulation instruments in 2030. METHODS. We used the developed at ERI RAS system technological model EPOS for the optimization of the energy technology structure in the Russian energy sector according to the criterion of the minimum total discounted costs for energy supply to the economy until 2050. RESULTS. The article provides an analysis of the scale of changes in installed capacity and electricity production of various types of power plants in the UES of Russia, as well as changes in heat production of different heat supply sources by 2050 for 16 carbon regulation options and business-as-usual scenario. Also it describes the optimal technological structure in the electric power industry and district heating under the conditions of certain administrative, fiscal and economic instruments of climate policy. Carbon regulation options based on the corresponding increases in the installed capacity of power plants in the UES of Russia by 2050 are compared. CONCLUSION. Decarbonization of the electric power industry in Russia will mainly occur by expansion of nuclear energy, heat production - by deployment of electric boilers, taking into account current forecasts of scientific and technological progress. At the same time, for carbon regulation options leading to a greenhouse gas emissions reduction by 30% relative to 2019 level, nuclear power plants could become the new dominant technology in the structure of electricity production instead of gas thermal power plants. The total increase in installed capacity of power plants in the UES of Russia by 2050 may differ by almost seven times for various carbon regulation options. Among the climate policy options considered, emission quotation and carbon taxes have the strongest impact on the technological structure of the electric power industry and district heating in Russia.*

Keywords: *energy technologies; electric power industry development; generating capacity structure; low carbon development; carbon policy; greenhouse gas emissions; system modelling.*

Acknowledgments: *The study is supported by Russian Science Foundation grant (project № 21-79-30013) in Research Institute of Russian Academy of Sciences.*

For citation: Shigina A.V., Khorshev A.A. The technological transformation of the Russian energy sector forced by carbon regulation. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 100-114. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-100-114.

Введение (*Introduction)*

Спектр энергетических технологий, в общем случае необходимых для углеродно-нейтральной экономики, не вызывает вопросов, в отличие от оптимального соотношения отдельных технологий в рамках низкоуглеродной энергетики страны. Система углеродного регулирования, стимулирующая снижение выбросов парниковых газов (ПГ) в том числе от энергетики, как справедливо отмечается, например, в [1], должна быть гармонизирована с социально-экономическим развитием, а процессы макроэкономического и энергетического планирования, согласно [2], тесно интегрированы за счет обратной связи. Как следствие, форсированное структурно-технологическое преобразование топливно-энергетического комплекса (ТЭК) для достижения климатических целей должно учитывать характерные национальные особенности в области экономики и энергетики, перечень которых включает, но не ограничивается:

- текущий баланс запасов полезных ископаемых (включая ископаемое топливо и уран) и региональное распределение ресурсного потенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ),
- исторически сложившуюся структуру и состав энергоносителей и энергетических технологий, и соответствующие связи энергетики с другими отраслями промышленности,
- топологию энергетической системы (включая зоны децентрализованного энергоснабжения), особенности и состояние энергетической инфраструктуры,
- производственные мощности по выпуску основного и вспомогательного энергетического оборудования, возможности их расширения с учетом доступности критических материалов,
- внешнеэкономические отношения (в т.ч. санкционные ограничения),
- научно-технический потенциал в области энергетических технологий.

В условиях, с одной стороны, особо важной роли топливной промышленности в экономике России, а с другой, декарбонизации глобальных производственных цепочек, возникает вопрос о научно-технологических приоритетах в энергетике, варианты которых, принципиально различающиеся по доминирующему типу энергоносителя, описаны в [2]. В частности, развитие водородной энергетики является одним из вариантов перехода на безуглеродный энергоноситель, который имеет большие перспективы в России в связи с национальными особенностями электроэнергетического комплекса и газотранспортной системы, позволяющими широко внедрять водородные технологии накопления и трансфера энергии, охарактеризованные в [3]. При этом спрос на российский водород на мировом рынке будет сильно зависеть от способа его производства и источника энергии, который в целях декарбонизации должен быть безуглеродным [4]. В рамках планирования низкоуглеродной реструктуризации энергетики потребуется решить вопросы о масштабах внедрения безуглеродных источников энергии, возможностях производства необходимого для этого энергетического оборудования внутри страны и темпах отказа от углерод-интенсивных технологий для минимизации негативных социально-экономических последствий.

В настоящее время, мировой рынок климат-ориентированных технологий как в части добычи критически важных материалов, так и в части производства оборудования, чрезвычайно концентрирован [5]. Например, в Демократической республике Конго добывается 70% мирового кобальта, а более 90% добычи лития в мире приходится всего на три страны: Австралию, Чили и Китай. При этом, не менее 70% производственных мощностей по технологиям солнечной, ветряной энергетики, накопления энергии и электролиза, сконцентрировано в трех крупнейших странах-производителях, среди которых уверенно доминирует Китай. Выбор приоритетного направления технологического развития в энергетике должен позволить России как совершить оптимальную реструктуризацию национальной экономики для выполнения климатических обязательств и экономического роста, так и занять устойчивые лидерские позиции на мировом рынке безуглеродных технологий.

Решать задачу выбора технологического приоритета можно не только для энергетики в целом, но и для отдельных отраслей, например, электроэнергетики и централизованного теплоснабжения. При этом столь же справедливой остается оговорка о нерациональности (и практической нереализуемости) перехода к единственному источнику энергии. Оценка т.н. стоимости «избегаемых» выбросов (carbon avoided cost, CAC), выполненная для России в [6], позволила ограничить множество экономически эффективных низкоуглеродных технологий производства электроэнергии для замещения выбранных углеродно-интенсивных технологий. Однако, CAC не может дать представление об оптимальных масштабах распространения конкретных энергетических технологий, которое должно быть получено на основании модельных расчетов. В [7], где приводится кривая предельных затрат на сокращение выбросов (marginal abatement cost curve, MACC), построенная на основе экспертных оценок для множества технологий производства и потребления энергии в России, также отмечается необходимость моделирования для учета взаимного влияния применения отдельных технологий в целях декарбонизации и оценки синергетического эффекта. Сценарные исследования должны позволить не только оценить изменения конкурентоспособности технологий производства энергии в условиях стимулирования низкоуглеродного развития, но и определить различия в масштабах развития технологий при применении различных мер углеродного регулирования.

Цель исследования заключается в анализе изменений структуры технологий в

электроэнергетике и централизованном теплоснабжении России под воздействием отдельных мер углеродного регулирования в перспективе 2050 года. Научная значимость исследования состоит в оценке масштабов развития энергетических технологий в условиях государственного стимулирования декарбонизации. Практическая значимость исследования заключается в определении мер углеродного регулирования, которые наиболее эффективно обеспечивают снижение выбросов ПГ для формирования направленной государственной политики в сфере низкоуглеродной трансформации энергетики.

***Методы** (Methods)*

Моделирование вариантов развития электроэнергетики и централизованного теплоснабжения России в условиях введения различных мер углеродного регулирования выполнено на линейной динамической оптимизационной модели EPOS. Её подробное описание приведено в [8], а возможности приложения для прогнозирования энергетического развития – в [9]. Критерием оптимизации структуры энергетических технологий в ЕЭС России являлся минимум суммарных дисконтированных затрат на энергоснабжение экономики до 2050 года (с учетом последействия принимаемых решений до 2070 года).

Рассмотрены базовый вариант развития отрасли (вариант В), соответствующий отсутствию специального регулирования, направленного на снижение выбросов ПГ, а также несколько вариантов мер углеродного регулирования, принципы учета которых в системных технологических моделях (СТМ) изложены в [10]. В исследовательских целях сценарии углеродного регулирования, перечисленные в таблице 1, намеренно включают некоторые крайние варианты, реализация которых в России в текущих условиях мало оправдано. При этом меры углеродного регулирования, для которых принципиально важно учитывать рыночное поведение компаний, трудно реализуемое в СТМ [11], в частности система торговли квотами на выбросы (СТВ) и добровольный углеродный рынок, не рассматриваются. Если не указано иное, регулирование вступает в силу с 2030 года, целевые сокращения выбросов ПГ указываются в процентах относительно базового 2019 года, ценовые показатели – в долл. США 2019 года. Прогнозная динамика электро- и теплопотребления основана на обоснованных в [12] макроэкономических показателях базового сценария прогноза социально-экономического развития России. Потребность в мощности электростанций на рассматриваемом временном горизонте до 2050 года, соответствующая сценарию спроса на электроэнергию, учитывает действующие нормативы резервирования.

Таблица 1

Table 1

Меры углеродного регулирования и значения показателей, использованных для их описания в модели EPOS

Measures of carbon regulation and values of indicators used to describe them in the EPOS model

Мера углеродного регулирования	Вариант	Значение	Динамика
Квотирование выбросов ПГ с целью их снижения к 2050 году в электроэнергетике и централизованном теплоснабжении на % отн. 2019 г.	L1	13.6	0% (до 2040 г. происходит компенсация прогнозируемого роста) - 6% (до 2045 г.)
	L2	30	- 1% (до 2035 г.) - 7% (до 2040 г.) - 17% (до 2045 г.)
	L3	50	- 4% (до 2035 г.) - 15% (до 2040 г.) - 30% (до 2045 г.)
Административное ограничение на удельный расход топлива на отпуск электроэнергии к 2050 году для достижения целевого снижения на % отн. 2019	U1	25	- 10% (до 2040 г.) далее - для достижения целевого значения
	U2	35	- 25% (до 2040 г.) далее - для достижения целевого значения
Налог на углерод (пропорциональное налогообложение) в 2030 году, долл. США/тС	N1	30	+ 4 долл./тС год (до 2040) + 8 долл./тС год (после 2040)
	N2	45	
	N3	65	
Налог на выбросы ПГ в 2030 году (для крупных эмитентов, свыше 150 ктCO_{2e}/год), долл. США/тCO_{2e}	V1	20	+ 3 долл./тCO_{2e} год
	V2	30	+ 5 долл./тCO_{2e} год
	V3	40	+ 6.5 долл./тCO_{2e} год

Льготное финансирование, обеспечивающее уменьшение CAPEX отдельных видов низкоуглеродных электростанций за счет льготного финансирования на %	F1	6 (для ВЭС и СЭС)	-
	F2	10 (для ВЭС, СЭС и ГЭС)	-
Сертификация происхождения электроэнергии с ценой сертификата в 2030 году, долл. США/МВт·ч	S1	1.2	+ 3 %/год
	S2	3.6	
Ускоренный (до выработки назначенного ресурса) вывод угольных электростанций из эксплуатации	C1	с 2030 г.	Плавная динамика снижения мощности угольных электростанций, обеспечивающая их полное выбытие к 2050 г.

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

Варианты целевого снижения выбросов ПГ в электроэнергетике (L1-L3), с одной стороны, учитывают уровень нетто-выбросов ПГ к 2050 году согласно интенсивному (целевому) сценарию действующей редакции Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем ПГ до 2050 года (далее – СНУР)[1], и с другой – вариативность оценок темпов роста поглощающей способности управляемых экосистем, приведенные, например, в [13] и [14].

Заданное ограничение удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии к 2050 году (U1, U2), а также ускоренный вывод из эксплуатации угольных электростанций до выработки назначенного ресурса (C1) являются гипотетическими вариантами агрессивных мер, направленных на декарбонизацию структуры производства электроэнергии посредством административного вытеснения углеродно-интенсивных технологий. Социально-экономические последствия таких варианты углеродного регулирования, особенно для угольных регионов, ещё предстоит оценить.

Ставки углеродных платежей как в вариантах N1-N3, так и в V1-V3 принимаются едиными для всех электростанций и котельных вне зависимости от их удельных или абсолютных выбросов ПГ. Их значения основаны на средних значениях выявленного в [15] диапазона, обобщающего избранные сценарии декарбонизации экономики России.

Зеленое финансирование в виде снижения кредитных ставок для отдельных видов безуглеродных электростанций (F1, F2) учитывается путем уменьшения их удельных капиталовложений ниже уровня, прогнозируемого на основании темпов научно-технического прогресса (НТП).

В основу оценки стоимости для сертификатов происхождения электроэнергии (S1, S2) положена оценка Министерства энергетики [16], скорректированная с учетом множественных неопределенностей относительно объемов спроса и предложения на внутреннем российском рынке зеленых сертификатов в условиях прекращения действия международной системы I-REC в России.

Результаты *(Results)*

На основе модельных расчетов определены изменения установленной мощности (табл. 2) и производства электроэнергии (табл. 3) для различных электрических станций относительно отчетного 2021 года, а также совокупные выбросы ПГ к 2050 году как в базовом варианте, так и вследствие введения отдельных мер углеродного регулирования.

Таблица 2

Table 2

Изменение установленной мощности электростанций в ЕЭС России к 2050 году относительно 2021 года в базовом варианте и для различных мер углеродного регулирования

Change in installed capacity of power plants in UES of Russia by 2050 relative to 2021 in the base case and for different carbon regulation measures

Изм. уст. мощности	Вариант																
	B	L1	L2	L3	U1	U2	N1	N2	N3	V1	V2	V3	F1	F2	S1	S2	C1
Выбросы ПГ к 2050 г. в % отн.	103	86	70	50	98	78	71	69	69	62	57	54	103	102	96	87	89

[1] Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.: Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 N 3052-р.

2019 г.																	
ГЭС-ГАЭС																	
ВЭС и СЭС				■								^					
АЭС			^	^			^	^	^	^	^	^					
ТЭС газовые		—	—	—			▼	▼	▼	▼	▼	▼			—	—	
ТЭС угольные	—	—	▼	▼	—	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	—	—	—	—	▼
	Условные обозначения:																
■	> 101 ГВт																
^	от 51 до 100 ГВт																
	от 0 до 50 ГВт																
—	от -25 до 0 ГВт																
▼	< -25 ГВт																

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

Таблица 3

Table 3

Изменение объемов производства электроэнергии на различных типах электростанций в ЕЭС России к 2050 году относительно 2021 года в базовом варианте и для различных мер углеродного регулирования

Change in electricity production volumes at different types of power plants in the UES of Russia by 2050 versus 2021 in the base case and for different carbon regulation measures

Изменение производства электроэнергии	Вариант																
	B	L1	L2	L3	U1	U2	N1	N2	N3	V1	V2	V3	F1	F2	S1	S2	C1
ГЭС-ГАЭС										^	^	^					
ВЭС и СЭС				■							^	■					
АЭС	^	■	■	■	^	■	■	■	■	■	■	■	^	^	■	■	■
ТЭС газовые	■		▼	▼	■	^	▼	▼	▼	▼	▼	▼	■	■		▼	■
ТЭС угольные		▼	▼	▼	—	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼			—	—	▼
	Условные обозначения:																
■	> 101 ТВт·ч																
^	от 51 до 100 ТВт·ч																
	от 0 до 50 ТВт·ч																
—	от -50 до 0 ТВт·ч																
▼	< -50 ТВт·ч																

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

Прирост установленной мощности объектов гидроэнергетики к 2050 году не превышает 50 ГВт для всех рассмотренных вариантов. Максимальный по сравнению с другими мерами углеродного регулирования прирост производства электроэнергии на ГЭС и ГАЭС характерен для введения налога на выбросы ПГ со ставками от 20 до 40 долл. /тCO_{2e} в 2030 году (варианты V1-V3) и составляет более 50 млн. МВт·ч к середине века.

К 2050 году установленная мощность СЭС и ВЭС увеличивается на более чем 50 ГВт по сравнению с отчетным годом в условиях действия налога на выбросы ПГ со ставкой не ниже 40 долл./тCO_{2e} в 2030 году, растущей на 6.5 долл./тCO_{2e} в год (вариант V3), и на более чем 100 ГВт – вследствие прямого квотирования выбросов (сценарий L3). Прирост производства электроэнергии на ВЭС и СЭС свыше 50 млн. МВт·ч к середине века достигается уже при меньшем значении ставки за выбросы ПГ (30 долл./тCO_{2e} в 2030 году, рост 5 долл. /тCO_{2e} в год), соответствующем варианту V2.

Наиболее заметный по сравнению с другими вариантами прирост установленной мощности АЭС выше 50 ГВт к 2050 году происходит в условиях действия целевого предела выбросов ПГ к 2050 году не выше 70% относительно уровня 2019 года или углеродного налогообложения. Увеличение производства электроэнергии на АЭС свыше 100 млн. МВт·ч характерно для всех вариантов, в которых снижение совокупных выбросов ПГ к 2050 году больше 2% относительно 2019 года. Максимальный прирост на 690 млн. МВт·ч к 2050 году достигается в варианте введения административного ограничения выбросов ПГ на уровне на 50% относительного 2019 года (вариант L3).

В перспективе 2050 года различные меры углеродного регулирования могут приводить как к уменьшению установленной мощности и производства электроэнергии газомазутных ТЭС, так и их медленному росту. Рост происходит в условиях административного ограничения удельного расхода топлива на отпуск электроэнергии (до 21 ГВт и 224 млн. МВт·ч к 2050 г.), действия льготного финансирования для ВИЭ и ГЭС (до 5 ГВт и 140 млн. МВт·ч) или ускоренного вывода из эксплуатации угольных электростанций (до 20 ГВт и 218 млн. МВт·ч). Сокращение выбросов на уровне интенсивного сценария СНУР (до 86-87% относительно 2019 года) в результате квотирования выбросов ПГ (L1) сопровождается ростом производства электроэнергии газомазутных ТЭС на 5% в отличие от варианта введения зеленых сертификатов с ценой не ниже 3.6 долл./ МВт·ч (S2), в котором тот же уровень ПГ достигается в условиях снижения производства электроэнергии на газомазутных ТЭС на более чем 84 млн. МВт·ч. В результате административного регулирования происходит меньшее снижение установленной мощности газомазутных ТЭС по сравнению с углеродным налогообложением при достижении близкого по абсолютным значениям уровня выбросов ПГ к 2050 году. Наибольшее снижение установленной мощности газомазутных ТЭС составляет 44 ГВт к 2050 году (варианты V2, V3), что соответствует сокращению производства электроэнергии на более чем 50% относительно 2019 года.

Рассмотренные меры углеродного регулирования всегда приводят к сокращению установленной мощности угольных ТЭС к середине века, но не всегда к снижению производства электроэнергии на них, как, например, для вариантов зеленого финансирования ВИЭ с учетом крупных ГЭС или без них (F1, F2). Введение налога на поступающий в экономику углерод или выбросы ПГ вне зависимости от величины ставки в рамках рассматриваемого диапазона приводит к падению установленной мощности угольных ТЭС на 27 ГВт (или 65%) к 2050 году и сокращению производства электроэнергии на 103 млн. МВт·ч (или 70%). Те же значения изменения объемов угольной генерации характерны для административного ограничения выбросов к 2050 году не выше 70% относительно 2019 года (L2, L3) и установки предельного расхода топлива на производство электроэнергии не выше 65% (U2). Максимальное снижение установленной мощности угольных ТЭС достигается при их выбытии до выработки назначенного ресурса (C1) и составляет 70% относительно 2021 года.

Путем совместной оптимизации электроэнергетики и централизованного теплоснабжения оценено влияние мер углеродного регулирования на структуру производства тепловой энергии. В таблице 4 приведено изменение отпуска тепловой энергии для различных централизованных источников теплоснабжения (ЦИТ) к 2050 году относительно 2021 года в условиях углеродного регулирования.

Таблица 4

Table 4

Изменение отпуска тепловой энергии в зоне централизованного теплоснабжения России к 2050 году относительно 2021 года в базовом варианте и для различных мер углеродного регулирования

Change in heat supply in the district heating zone of Russia by 2050 relative to 2021 in the base case and for different carbon control measures

Изменение отпуска тепла	Вариант																
	B	L1	L2	L3	U1	U2	N1	N2	N3	V1	V2	V3	F1	F2	S1	S2	C1
Электрокотельные				■						^	^	■					
АТЭЦ				^						^	^	^					
Газовые ЦИТ	▼	—	—	▼	▼	—	—	—	—	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	—
Угольные ЦИТ	—	—	▼	▼	—	—	▼	▼	▼	▼	▼	▼	—	—	—	—	▼
	Условные обозначения:																
■	> 101 млн. Гкал																
^	от 26 до 100 млн. Гкал																
	от 0 до 25 млн. Гкал																
	0 (нет изменений)																
—	от -100 до 0 млн. Гкал																
▼	< -100 млн. Гкал																

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

Электрокотельные появляются в структуре отпуска тепла к 2050 году даже в отсутствие углеродного регулирования. Однако, в этом случае отпуск тепла от

электрокотельных составляет лишь около 1 млн. Гкал, причем он сохраняется на минимальном уровне для всех вариантов углеродного регулирования, при которых совокупные выбросы ПГ не снижаются ниже уровня показателей СНУР, а именно 86%. Введение налога на выбросы ПГ со ставкой не менее 20 долл./CO_{2e} в 2030 году и растущей до 80 долл./CO_{2e} к 2050 году (вариант V1) уже приводит к росту отпуска тепла от электрокотельных более 35 млн. Гкал и для наибольшей из рассмотренных ставок превышает 100 млн. Гкал к 2050 году (V3), как и в случае прямого квотирования выбросов на уровне 50% относительно 2019 года (L3). В свою очередь, только для указанных вариантов (V1-V3 и L3) рост отпуска тепла от АТЭЦ превышает минимальные значения 1-2 млн. Гкал, но все же не достигает 100 млн. Гкал к 2050 году.

Снижение отпуска тепла от газовых ЦИТ в отсутствии углеродного регулирования превышает 100 млн. Гкал, в отличие от угольных ИТ, для которых характерно менее существенное снижение производства тепловой энергии. Такое же качественное соотношение изменения отпуска тепла сохраняется для минимального из рассмотренных значений целевого снижения расхода топлива на производство электроэнергии (вариант U1), введения зеленого финансирования и системы обращения сертификатами происхождения электроэнергии. Напротив, во всем диапазоне рассмотренных ставок налога на поступающий в экономику углерод (варианты N1-N3), для варианта административного ограничения выбросов ПГ на уровне 70% относительно 2019 года (L2) и в случае ускоренного выбытия угольных ТЭС (C1) снижение отпуска тепла от угольных ЦИТ более 100 млн. Гкал, когда для газовых ЦИТ оно становится более сдержанным. Максимальное снижение отпуска тепла как от газовых, так и от угольных ЦИТ свыше 100 млн. Гкал характерно для вариантов прямого квотирования (L3) и налогообложения выбросов (V1-V3), при которых снижение совокупных выбросов не менее 38% к 2050 году.

Структура установленной мощности электростанций в ЕЭС России и производства электроэнергии на них в 2050 году для базового варианта и рассматриваемых вариантов углеродного регулирования приведена на рисунках 1 и 2 соответственно.

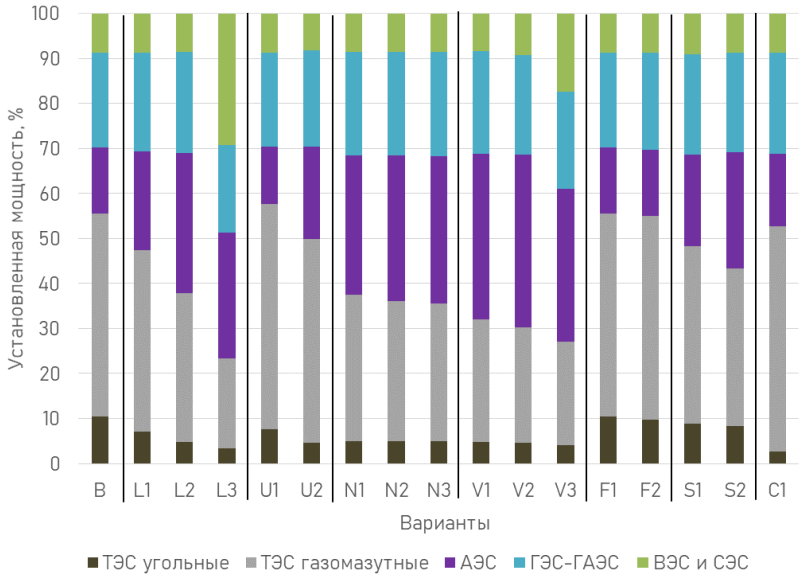


Рис. 1. Структура установленной мощности ЕЭС России к 2050 году в условиях действия углеродного регулирования

Fig. 1. The structure of installed capacity of power plants in the UES of Russia by 2050 for various carbon regulation options

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

В базовом варианте развития отрасли в отсутствии углеродного регулирования больше половины установленной мощности ЕЭС России к 2050 году будут составлять электростанции, использующие ископаемое топливо. Такая ситуация сохраняется для вариантов ограничения предельного расхода топлива на производство электроэнергии (U1, U2), льготного финансирования ВИЭ (F1, F2) и ускоренного выбытия угольных ТЭС (C1). В отношении доли безуглеродных источников энергии в структуре установленной мощности, прямое квотирование выбросов ПГ (L2, L3) и углеродное налогообложение

(N1-N3, V1-V3) приводят к превалированию атомной энергии и снижению совокупных выбросов ниже 70% относительно уровня 2019 года в отличие от остальных вариантов, в которых наибольшая доля (чуть больше 20%) приходится на гидроэнергию, как и в базовом варианте. При этом в случае введения сертификатов происхождения электроэнергии (S1, S2) несмотря на доминирование безуглеродных источников энергии в структуре установленной мощности доля наиболее углерод-интенсивных угольных ТЭС уменьшится всего на 1-2% относительно базового варианта без регулирования. Совокупная доля ВЭС и СЭС не достигает 10% установленной мощности ЕЭС России к 2050 году для всех вариантов, при которых выбросы ПГ снижаются меньше, чем на 45% относительно 2019 года. Однако, снижение выбросов с 54% (V3) до 50% (L3) сопровождается почти двукратным увеличением доли ВЭС и СЭС в структуре установленной мощности с 17% до 29% в 2050 году в условиях общего изменения структуры мощности и ограничения доступности площадок для ввода новых АЭС.

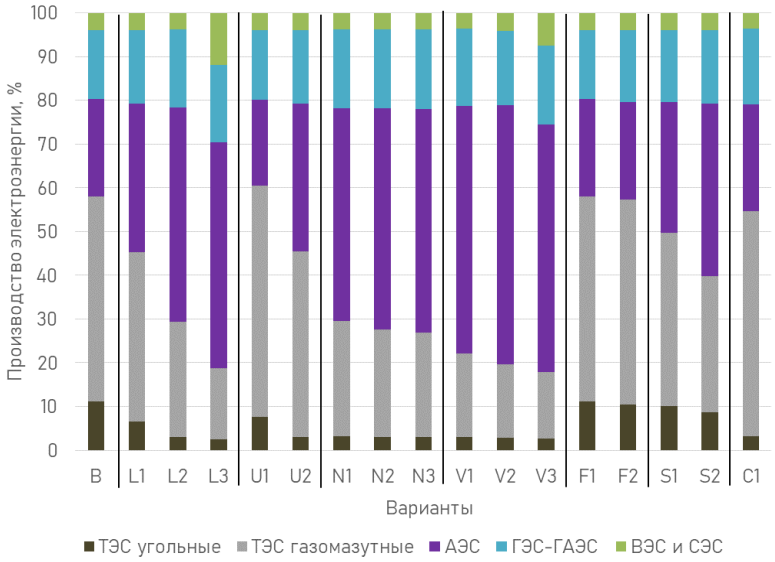


Рис. 2. Структура производства электроэнергии в ЕЭС России к 2050 году в условиях действия углеродного регулирования

Fig. 2. The structure of electricity production in the UES of Russia by 2050 for various carbon regulation options

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

Для вариантов, приводящих к наибольшему снижению выбросов ПГ, суммарная доля безуглеродных источников энергии превышает 80% в структуре производства электроэнергии преимущественно за счет роста доли АЭС, которая возрастает с 22% в базовом варианте вплоть до 60% в случае введения углеродного налогообложения выбросов со ставкой 30 долл./CO_{2e} в 2030 году и достигающей 130 долл./CO_{2e} к 2050 году (вариант V2). Причем увеличение ставки налога на выбросы ПГ вплоть до параметров, соответствующих варианту V3, приводит к дальнейшему повышению доли безуглеродных источников энергии уже за счет роста доли ВЭС и СЭС до 7.5% в структуре производства электроэнергии. Наибольший рост доли ВИЭ-генерации с 4% до 12% происходит вследствие прямого ограничения выбросов на уровне 50% относительно 2019 года (вариант L3). В этом же варианте углеродного регулирования доля производства электроэнергии на газомазутных ТЭС на 1.5% больше минимального уровня 15%, характерного для углеродного налогообложения со ставкой 40 долл./CO_{2e} в 2030 году или 170 долл./CO_{2e} к 2050 году (вариант V3). Большинство рассмотренных вариантов приводит к падению доли угольных ТЭС до 3% в объеме производства электроэнергии, в отличие от варианта без регулирования, в котором она составляет 11%.

Из рассмотренных вариантов углеродного регулирования наименьшее воздействие на изменение структуры производства электроэнергии оказывает введение зеленого финансирования, для которого различия во вкладах различных типов электростанций не превышают 1% по сравнению с базовым вариантом.

Структура отпуска тепловой энергии в зоне централизованного теплоснабжения России к 2050 году при введении в 2030 году отдельных мер углеродного регулирования и в их отсутсвии представлена на рисунке 3.

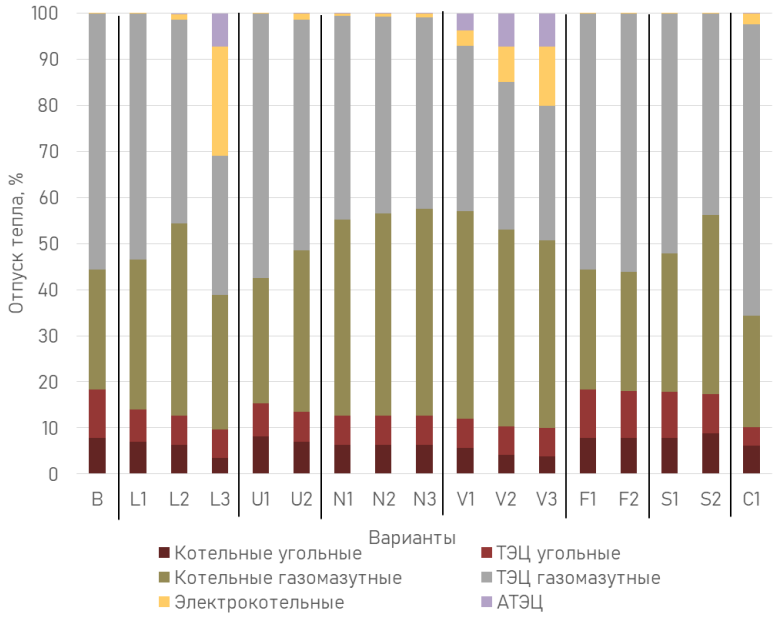


Рис. 3. Структура отпуска тепловой энергии в зоне централизованного теплоснабжения России к 2050 году в условиях действия углеродного регулирования

Fig. 3. The structure of heat supply in the district heating zone of Russia by 2050 u for various carbon regulation options

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

Доля безуглеродных ЦИТ в структуре отпуска тепла в 2050 году не превышает 0,5% как для базового варианта, так и для большинства рассмотренных мер углеродного регулирования. Отметку 1% электрокотельным позволяет преодолеть средний вариант квотирования выбросов на уровне 70% относительно 2019 года (L2), существенное ограничение предельного расхода топлива на производство электроэнергии (U2) и ускоренное выбытие угольных электростанций. Максимальная доля безуглеродных ИТ, превышающая 30%, характерна для прямого ограничения выбросов ПГ до 50% к 2050 году (L3). Введение налога на выбросы ПГ (V1-V3) позволяет достичь от 7 до 20% безуглеродных ЦИТ в структуре отпуска тепла. При этом вклад АТЭЦ составляет от 4 до 7% как для административного, так и для фискального регулирования и ограничен доступностью площадок для таких станций исходя из эффективного радиуса теплоснабжения. Стоит отметить, что для прямого квотирования выбросов доля газомазутных котельных может как повышаться, так и снижаться при переходе к большему сокращению выбросов ПГ, в отличие от варьирования параметров регулирования в рамках других рассмотренных мер углеродного регулирования, когда изменение доли газомазутных котельных изменяется однонаправленно. В частности, повышение ставки налога на углерод в рамках рассматриваемого диапазона (варианты N1-N3) приводит к повышению эффективности раздельной схемы энергоснабжения в виде сочетания АЭС и газомазутных котельных, в отличие от более высоких ставок налога на выбросы ПГ (V1-V3), когда углеродоемкие ЦИТ начинают активно вытесняться безуглеродными альтернативами. Доля самых углеродно-интенсивных угольных ЦИТ в структуре отпуска тепла составляет 18.5% в базовом варианте и падает ниже 10% только для наиболее амбициозных вариантов прямого квотирования выбросов (L3), введения налога на выбросы ПГ (V3) и в случае ускоренного выбытия угольных ТЭС (C1).

Изменение структуры технологий в энергетике вследствие действия различных мер углеродного регулирования сопровождается изменением суммарной установленной мощности электростанций ЕЭС России (рис. 4).

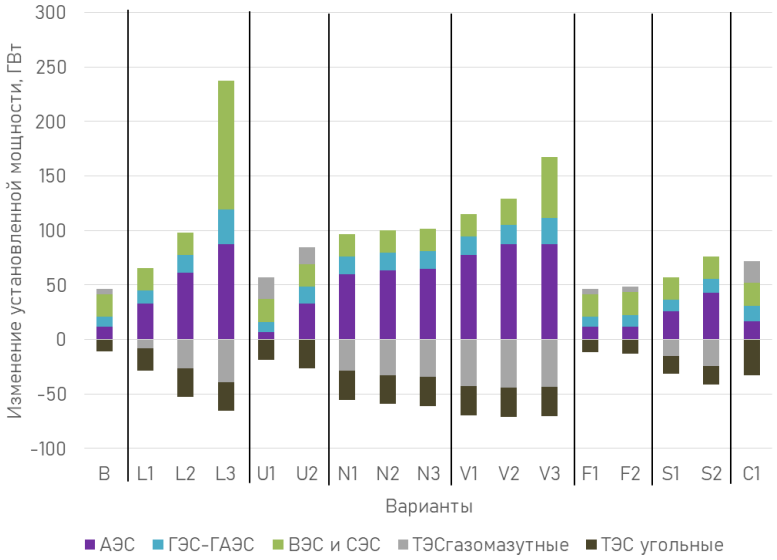


Рис. 4. Изменение установленной мощности электростанций в ЕЭС России к 2050 году относительно 2021 года при введении углеродного регулирования

Fig. 4. The change in the installed capacity of the UES of Russia by 2050 relative to 2021 with the introduction of carbon regulation

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

В базовом варианте развития энергетики суммарный прирост установленной мощности электростанций ЕЭС России к 2050 году составляет около 35 ГВт относительно 2021 года. При этом для различных вариантов углеродного регулирования он может отличаться почти в семь раз: от 25 ГВт (вариант S1) до 172 ГВт (L3). Отметим, что для налогообложения углерода (N1-N3) и льготного финансирования (F1, F2) суммарный прирост установленной мощности не изменяется при варьировании параметров регулирования в рассмотренных пределах. При близких уровнях выбросов ПГ к 2050 году административное регулирование приводит к большему приросту суммарной установленной мощности электростанций, чем фискальные меры. Строгое ограничение на объем выбросов ПГ приводит к необходимости декарбонизации теплоснабжения преимущественно за счет электрокотельных, что сопряжено с ростом спроса на электроэнергию. Одновременно с этим в секторе электроэнергетики с ростом ВИЭ-генерации возрастает потребность в объемах её резервирования.

***Обсуждение** (Discussions)*

Достижение сокращения нетто-выбросов ПГ близких к показателям действующей редакции СНУР возможно посредством нескольких мер углеродного регулирования, например, прямого квотирования (вариант L1), создания системы обращения зелеными сертификатами (S2) или ускоренного вывода из эксплуатации угольных электростанций (C1). Однако, в перспективе 2050 года одни из этих мер (L1, C1) приводят к росту производства электроэнергии на газомазутных ТЭС, а другие (S2) - к его уменьшению. Поскольку на сегодняшний день природный газ является доминирующим энергоресурсом, при оценке сценариев декарбонизации следует учитывать и возможные социально-экономические последствия углеродного регулирования в газовой отрасли.

Угольные ТЭС, как наиболее углеродно-интенсивные электростанции, ощутят негативные последствия введения углеродного регулирования в большей степени по сравнению с другими технологиями генерации энергии. Однако, нельзя однозначно утверждать, что достижение меньшего уровня выбросов ПГ сопряжено с большим падением производства электроэнергии на угольных ТЭС. В частности, преднамеренный ускоренный вывод из эксплуатации угольных электростанций (вариант C1) приводит к более значительному снижению производства электроэнергии посредством сжигания угля, но к меньшему снижению выбросов ПГ по сравнению с введением сертификатов происхождения электроэнергии (S2). При этом при необходимости компенсировать падение внутреннего спроса на уголь со стороны энергетических предприятий в случае углеродного регулирования, следует предусмотреть повышение неэнергетического использования угля и осуществить необходимую для этого переориентацию отрасли. Например, с учетом важности угольной промышленности для экономики Китая в условиях национальных целей по снижению выбросов ПГ в [17] рекомендуется

обеспечить поддержку инноваций в угольной отрасли и провести её всестороннюю оптимизацию для повышения эффективности производственных процессов и качества продукции.

К 2050 году для рассмотренных вариантов мер углеродного регулирования значительная доля ВЭС и СЭС в структуре установленной мощности ЕЭС России свыше 10% достигается лишь при снижении выбросов на более чем 45% относительно 2019 года. Как следствие, при необходимости увеличения масштабов развития возобновляемой энергетики для стимулирования ВИЭ-генерации в России в условиях действия целевых показателей СНУР необходимо предусмотреть дополнительные меры повышения их конкурентоспособности. При этом, как отмечается в [18] на основе анализа 102 стран, стимулирующие возобновляемую энергетику меры положительно влияют на инновационную активность в этой области, что может ускорить НТП выше прогнозных уровней, использованных в настоящем исследовании.

В условиях необходимости сокращения выбросов ПГ новой доминирующей технологией производства энергии может стать АЭС. Важнейшая роль атомной энергии для осуществления перехода к углеродно-нейтральной энергетике как в развитых, так и в развивающихся странах подчеркивается в [19], где особое внимание уделено потенциалу развития малых АЭС. Развитие атомной энергетики в России основано на накопленном научно-техническом потенциале и лидирующих позициях в рамках экспорта технологий, которые в будущем могут быть укреплены за счет экспорта быстрых реакторов с замкнутым ядерным топливным циклом [20].

Для достижения углеродной нейтральности потребуется декарбонизация теплоснабжения, которая с учетом текущих прогнозов НТП в централизованной зоне будет происходить преимущественно за счет электрокотельных, в меньшей степени - АТЭЦ. При этом отдельного анализа с учетом тренда на децентрализацию заслуживает тепловая энергетика малых мощностей, энергоустановки которой, согласно [21], составляют 11% от общей мощности ТЭС России и широко выпускаются отечественными предприятиями, однако не по всем видам оборудования.

Результаты анализа показывают, что в процессе достижения национальных климатических целей структура электроэнергетики и централизованного теплоснабжения будет качественно и количественно меняться. Для управления технологическими изменениями необходимо учитывать влияние отдельных мер углеродного регулирования на масштабы развития энергетических технологий для обеспечения гармоничного социально-экономического развития, максимально защищенного от внешнеполитической изменчивости.

Заключение *(Conclusions)*

Одинакового уровня совокупных выбросов ПГ можно достичь за счет различных стимулирующих мер административного, фискального или экономического характера. При этом в зависимости выбранной меры углеродного регулирования и параметров, её описывающих, вклады отдельных технологий производства энергии в совокупное снижение эмиссии будут различаться. Это приводит как к различным изменениям структуры технологий производства энергии, так и к различиям в суммарном приросте установленной мощности электростанций и ИТ, что будет иметь особое значение для оценки объема инвестиций, необходимых для структурной перестройки энергетики в связи с декарбонизацией. Результаты комплексной оценки энергетических технологий с позиций обеспечения национальной технологической независимости и выбора нового конкурентного преимущества России на глобальном рынке низкоуглеродных технологий следует учитывать при оценке сценариев декарбонизации и формирования климатической политики.

В продолжение работы следует рассмотреть совместное (в рамках единой национальной системы) влияние различных стимулирующих мер на технологическое развитие энергетики и повышение стоимости энергии для конечных потребителей. Кроме того, целесообразно провести подробный анализ энергетический безопасности полученных сценариев с использованием соответствующего модельного инструментария, подход к формированию которого на примере ТЭС описан в [22].

Литература

1. Порфирьев Б.Н., Широв А.А., Колпаков А.Ю. Стратегия низкоуглеродного развития: перспективы для экономики России// Мировая экономика и международные отношения. 2020. Т. 64. № 9. С. 15-25.

2. Филиппов С.П., Веселов Ф.В., Кейко А.В. и др. Подходы к формированию прогнозов

развития ТЭК России как составной части сценариев декарбонизации экономики страны // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6(201). С. 67-78.

3. Филимонов А.Г., Филимонова А.А., Чичиров А.А. и др. Глобальное энергетическое объединение: новые возможности водородных технологий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. №2. С. 3-13.

4. Януш О.Б. Политические дилеммы водородной энергетики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23 №2. С. 173-180.

5. Energy Technology Perspectives 2023. Доступно по URL: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023. Ссылка активна на 14 апреля 2024.

6. Veselov F., Pankrushina T., Khorshev A. Comparative economic analysis of technological priorities for low-carbon transformation of electric power industry in Russia and the EU // Energy Policy. 2021. Vol. 156. 112409. P.9.

7. Keiko A., Veselov F., Solyanik A. Decarbonization Options in the Russian Energy Sector: a Comparative Study on Their Economic Efficiency // International Journal of Energy Economics and Policy. 2022. Vol. 12, N. 4. pp. 368-378.

8. Veselov F., Khorshev A. Integrated modelling and information technology for strategic planning in the energy sector of Russia // IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT); 20-22 Sept 2017; Moscow, Russia. 2017. pp. 1-5.

9. Веселов Ф.В., Хоршев А.А., Ерохина И.В. и др. Исследование направлений и сопутствующих затрат при снижении эмиссии углерода в электроэнергетике до 2050 года с учетом межотраслевых факторов // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6(201). С. 79-90.

10. Шигина А.В. Описание механизмов углеродного регулирования при моделировании развития энергетики России// Сборник докладов Школы молодых ученых «Технологическое развитие отраслей ТЭК для достижения углеродной нейтральности экономики России»; 17-18 октября 2023 г., Москва. М.: ИНЭИ РАН, 2023. С. 95-103.

11. Кейко А.В. Системные модели в исследованиях энергетики // Сборник докладов Школы молодых ученых «Технологическое развитие отраслей ТЭК для достижения углеродной нейтральности экономики России»; 17-18 октября 2023 г., Москва. М.: ИНЭИ РАН, 2023. С. 6-32.

12. Хоршев А.А., Соляник А.И., Веселов Ф.В. Комплексная оценка условий низкоуглеродного развития электроэнергетики России до 2050 года при ускорении темпов роста спроса на электроэнергию // Труды Пятнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD' 2022)»; 26-28 сентября 2022 г., Москва. М.: ИПУ РАН, 2022. С. 227-235.

13. Клименко В., Клименко А., Терешин А. и др. Дорога к климатической нейтральности: через леса под землю // Энергетическая политика. 2023. № 7(185). С. 8-25.

14. Шварц Е.А., Птичников А.В. Стратегия низкоуглеродного развития России и роль лесов в ее реализации // Научные труды Вольного экономического общества России. 2022. Т. 236, № 4. С. 399-426.

15. Шигина А., Хоршев А. Плата за углерод как game changer для структуры технологи в энергетике России // Энергетическая политика. 2024. № 1(192). С. 78-89.

16. Балашов М.М. Влияние механизмов углеродного регулирования на развитие промышленности Российской Федерации // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2020. Т. 11. № 4. С. 354-365.

17. Peng X., Song W., Li X. Analysis of Factors Influencing the Volatility of Coal Industry Development Under the Double Carbon Policy // Journal of Innovation and Development. 2023. Vol. 2, N. 3. pp. 152-157.

18. Yang Q.C., Zheng M., Chang C.P. Energy policy and green innovation: A quantile investigation into renewable energy // Renewable Energy. 2022. Vol. 189. pp. 1166-1175.

19. Krūmiņš J., Kļaviņš M. Investigating the Potential of Nuclear Energy in Achieving a Carbon-Free Energy Future // Energies. 2023. Vol. 16, N. 9. P. 3612.

20. Gorin N.V., Kuchinov V.P., Krivtsov A.V., et al. Export prospects of fast reactors designed in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities // Nuclear Energy and Technology. 2022. Vol. 8, N. 3. P. 153-159.

21. Петрущенков В.А., Коршакова И.А. Качественный и количественный анализ тепловой энергетики малых мощностей в России // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22 №5. С. 52-70.

22. Крупенёв Д.С., Пискунова В.М., Гальфингер А.Г. Моделирование тепловых электростанций при исследовании надёжности энергоснабжения и энергетической безопасности // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25. № 2. С. 12-25.

Авторы публикации

Шигина Анна Викторовна – инженер, Институт энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН). *ORCID*:* https://orcid.org/0009-0000-1165-5481. *shigina_av@mail.ru.*

Хоршев Андрей Александрович – канд. экон. наук, руководитель Центра моделирования в электроэнергетике ИНЭИ РАН. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-8089-6171. epos@eriras.ru.*

References

1. Porfir'ev BN, Shirov AA, Kolpakov AYu. Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya: perspektivy dlya ekonomiki Rossii. *Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya.* 2020; 64(9):15-25. (In Russ). doi:10.20542/0131-2227-2020-64-9-15-25.

2. Filippov SP, Veselov FV, Keiko AV et al. Podkhody k formirovaniyu prognozov razvitiya TEK Rossii kak sostavnoi chasti stsenariev dekarbonizatsii ekonomiki strany. *Problemy prognozirovaniya*. 2023; 6(201):67-78. (In Russ). doi:10.47711/0868-6351-201-67-78.

3. Filimonov AG, Filimonova AA, Chichirova ND, et al. Global energy association: new opportunities of hydrogen technologies. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(2):3-13. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2021-23-2-3-13.

4. Yanush OB. Political dilemmas of hydrogen energy. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(2):173-180. (In Russ).

5. Energy Technology Perspectives 2023. Available at: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023. Accessed: 14 Apr 2024.

6. Veselov F, Pankrushina T, Khorshev A. Comparative economic analysis of technological priorities for low-carbon transformation of electric power industry in Russia and the EU. *Energy Policy.* 2021; 156.112409. doi:10.1016/j.enpol.2021.112409.

7. Keiko A, Veselov F, Solyanik A. Decarbonization Options in the Russian Energy Sector: a Comparative Study on Their Economic Efficiency. *International Journal of Energy Economics and Policy.* 2022; 12(4):368-378. doi:10.32479/ijeep.13100.

8. Veselov F, Khorshev A. Integrated modelling and information technology for strategic planning in the energy sector of Russia. In *IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT); 20-22 Sept 2017; Moscow, Russia. 2017.* pp. 1-5. doi: 10.1109/ICAICT.2017.8687058.

9. Veselov FV, Khorshev AA, Erokhina IV et al. Issledovanie napravlenii i soputstvuyushchikh zatrat pri snizhenii emissii ugleroda v elektroenergetike do 2050 goda s uchetom mezhotraslevykh faktorov. *Problemy prognozirovaniya*. 2023; 6(201): 79-90. (In Russ). doi: 10.47711/0868-6351-201-79-90.

10. Shigina AV. Opisanie mekhanizmov uglerodnogo regulirovaniya pri modelirovanii razvitiya energetiki Rossii. In *Shkola molodykh uchenykh "Tekhnologicheskoe razvitie otraslei TEK dlya dostizheniya uglerodnoi neitral'nosti ekonomiki Rossii"; 17-18 Oct 2023; Moscow, Russia.* Moscow: ERI RAS, 2023. pp. 95-103. (In Russ).

11. Keiko AV. Sistemnye modeli v issledovaniyakh energetiki In *Shkola molodykh uchenykh "Tekhnologicheskoe razvitie otraslei TEK dlya dostizheniya uglerodnoi neitral'nosti ekonomiki Rossii"; 17-18 Oct 2023; Moscow, Russia.* Moscow: ERI RAS, 2023. pp. 6-32. (In Russ).

12. Khorshev AA, Solyanik AI, Veselov FV, An Integrated Assessment of the Low-Carbon Transition in the Power Industry of Russia until 2050 under Accelerating Electricity Consumption Growth. *15th International Conference Management of large-scale system development (MLSD'2022); 22-26 Sept 2022; Moscow, Russia*. 2022, pp.227-235. doi: 10.1109/MLSD55143.2022.9934633.

13. Klimenko V, Klimenko A, Tereshin A et al. Doroga k klimaticheskoi neitral'nosti: cherez lesa pod zemlyu. *Energy policy*. 2023; 7(185):8-25. (In Russ).

14. Shvarts EA, Ptichnikov AV. Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Rossii i rol' lesov v ee realizatsii. *Nauchnye trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii.* 2022; 236(4):399-426. (In Russ). doi: 10.38197/2072-2060-2022-236-4-399-426.

15. Shigina A, Khorshev A. Carbon price as a game changer for the technological structure of the Russian energy sector. *Energy policy.* 2024; 1(192):78-89. (In Russ). doi: 10.46920/2409-5516_2024_1192_78.

16. Balashov MM. The Impact Of Carbon Regulation Mechanisms On The Development Of Industry In The Russian Federation. *Strategic Decisions and Risk Management*. 2020; 11(4): 354-365. (In Russ). doi: 10.17747/2618-947X-2020-4-354-365.

17. Peng X, Song W, Li X. Analysis of Factors Influencing the Volatility of Coal Industry Development Under the Double Carbon Policy. *Journal of Innovation and Development.* 2023; 2(3): 152-

157. doi:10.54097/jid.v2i3.7638.

18. Yang QC, Zheng M, Chang CP Energy policy and green innovation: A quantile investigation into renewable energy. *Renewable Energy.* 2022;189:1166-1175. doi:10.1016/j.renene.2022.03.046.

19. Krūmiņš J, Kļaviņš M. Investigating the Potential of Nuclear Energy in Achieving a Carbon-Free Energy Future. *Energies.* 2023;16(9):3612. doi:10.3390/en16093612.

20. Gorin NV, Kuchinov VP, Krivtsov AV, et al. Export prospects of fast reactors designed in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities. *Nuclear Energy and Technology.* 2022;8(3):153-159. doi:10.3897/nucet.8.80757.

21. Petrushchenkov VA, Korshakova IA. Qualitative and quantitative analysis of small scale thermal energy in Russia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(5):52-70. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2020-22-5-52-70.

22. Krupenev DS, Piskunova VM, Galfinger AG. Modeling of thermal power plants in the study of reliability of power supply and energy security. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(2):12-25. (In Russ.) doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-12-25.

Authors of the publication

Anna V. Shigina – The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), Moscow, Russia. *ORCID*:* https://orcid.org/0009-0000-1165-5481. *shigina_av@mail.ru.*

Andrey A. Khorshev – The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), Moscow, Russia. *ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-8089-6171. epos@eriras.ru.*

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено ***27.04.2024 г.***

Отредактировано ***28.05.2024 г.***

Принято ***02.06.2024 г.***

© Веселовская Е.В., Лазарева Е.А.

(cc) BY

УДК 546 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-115-123**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ ОРОСИТЕЛЕЙ БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ

Веселовская Е.В., Лазарева Е.А.

ФГБОУ «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск, Россия
tes252@yandex.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в необходимости сохранения в процессе эксплуатации градирен их проектной эффективности охлаждения, а также недопущения снижения механической прочности оросителей в результате образования отложений, способствующих ухудшению условий теплообмена и прочностных характеристик конструктивных элементов. ЦЕЛЬ. Повышение эффективности теплообмена в процессах охлаждения циркуляционной воды при использовании на ТЭС башенных градирен. МЕТОДЫ. Для достижения поставленных целей были проведены комплексные исследования проб циркуляционной воды и отложений, образующихся на оросителях башенных градирен, классическими методами физико-химического и элементного анализов, а также исследования отложений методами рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Отслежена связь между показателями охлаждающей воды и характером образующихся на оросителях отложений, в частности доли кристаллических и неорганизованных аморфных структур. Дана оценка стабильности охлаждающей воды с помощью индексов Ланжелье и Ризнера. Проведены результаты микробиологических анализов охлаждающей воды, включающих определение общего числа микроорганизмов и общих колиморфных бактерий. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Сделаны выводы о степени достаточности проводимой обработки охлаждающей воды и даны рекомендации по ее оптимизации, в частности, целесообразности применения сниженных доз биоразлагаемых биоцидных реагентов, в том числе, в условиях предварительного дозирования катионных флокулянтов.*

Ключевые слова: *тепловые электрические станции; башенные градирни; системы оборотного охлаждения; стабильность охлаждающей воды.*

Для цитирования: Веселовская Е.В., Лазарева Е.А. Исследование структуры и химического состава отложений оросителей башенной градирни // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 115-123. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-115-123.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND CHEMICAL COMPOSITION OF SEDIMENTS OF IRRIGATORS OF THE TOWER COOLING TOWER

Veselovskaya E.V., Lazareva E.A.

Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia
tes252@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE. The relevance of this study lies in the need to preserve their design cooling efficiency during the operation of cooling towers, as well as to prevent a decrease in the mechanical strength of sprinklers as a result of the formation of deposits that contribute to the deterioration of heat exchange conditions and strength characteristics of structural elements. OBJECT. Increasing the efficiency of heat transfer in the cooling processes of circulating water when using tower cooling towers at thermal power plants. METHODS. To achieve these goals, comprehensive studies of samples of circulating water and sediments formed on the sprinklers of tower cooling towers were carried out using classical methods of physico-chemical and elemental analyses, as well as sediment studies using X-ray diffraction analysis and electron microscopy. RESULTS. The relationship between the parameters of cooling water and the nature of sediments*

formed on the sprinklers, in particular the proportion of crystalline and non-organic ones, has been tracked. A method of highly effective pretreatment of source water with biodegradable biocidal reagents was considered in detail, since the existing disinfection method does not prevent the development of colonies of microorganisms on cooling tower sprinklers. The effectiveness of the use of the biodegradable THPS reagent, which is relatively safe for the environment in comparison with oxidizing biocides and classic bromine-based preparations, was studied in laboratory conditions. Laboratory studies were conducted in accordance with the interstate standard and included the determination of the total number of microorganisms and common colimorphic bacteria. Studies have shown that THPS treatment allows for the complete presence of microorganisms in cooling water samples. Biocidal treatment was carried out with reduced concentrations of the reagent (up to 30 mg/l) in a wide pH range (from 6.5 to 9.0 units). Experiments have shown high efficacy of the drug in a wide pH range even when it is dosed in small doses and a decrease in the effectiveness of this biocide when using increased concentrations of cationic flocculants used at the stage of pretreatment of river water.

Keywords: *thermal power plants; tower cooling towers; circulating cooling systems; cooling water stability.*

For citation: Veselovskaya E.V., Lazareva E.A. Investigation of the structure and chemical composition of sediments of irrigators of the tower cooling tower. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 115-123. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-115-123.

Введение (*Introduction)*

В настоящее время градирни достаточно широко применяются в системах оборотного водоснабжения ТЭС. В процессе эксплуатации на оросителях градирен образуются отложения, снижающие эффективность охлаждения и вызывающие постепенное разрушение самих оросителей [1, 2]. Снижение эффективности охлаждения напрямую связано с изменением условий прохождения потоков воздуха через оросители – при наличии мощных отложений возможно значительное ухудшение условий теплообмена. Кроме того, образующиеся отложения крайне негативно влияют на прочностные характеристики несущих конструкций высотных сооружений.

Химический состав образующихся на оросителях градирен отложений достаточно неоднороден и обусловлен, главным образом, содержащимися в воде примесями. Также неоднородна и структура отложений: это и твердые образования, которые достаточно прочно связаны с металлом, и рыхлые аморфные отложения, легко отделяющиеся от поверхности конструкций. В образовании первых основное участие принимают содержащиеся в воде соли жесткости, образующие на оросителях различные виды накипей. Вторые формируются за счет взвешенных примесей и продуктов коррозии.

Ещё одним видом загрязнений оросителей могут являться колонии микроорганизмов, в том числе и патогенных. Данный вид загрязнений образуется в условиях недостаточной биоцидной обработки охлаждающей воды.

Считается, что из-за мощных отложений на поверхностях оросителей охлаждающая способность градирен снижается до 40 и более процентов. Столь значительное снижение эффективности охлаждения негативно сказывается на показателях энергопотребления предприятий теплоэнергетики и приводит к росту общих затрат.

Очистка оросителей требует значительных финансовых затрат и затрат рабочего времени, так как связана с необходимостью осуществления процессов демонтажа и последующего монтажа элементов конструкций и их трудоёмкой очисткой или даже полной заменой. Сама очистка может осуществляться как механическими, так и химическими методами.

При механической очистке производится обработка поверхностей различными абразивами. Гидродинамические методы позволяют удалять загрязнения путём отмывки отложений под высоким давлением воды. Также используются другие, в том числе инновационные, методы удаления отложений, пока не получившие повсеместного распространения [3, 4].

Широко используется очистка загрязнений с помощью острого пара и растворов различных химических реагентов. Однако, все вышеперечисленные способы характеризуются трудоёмкостью, достаточно высокими затратами и дополнительной нагрузкой на окружающую среду в результате образования вторичных загрязнений.

На состояние градирен напрямую влияет величина солесодержания оборотной воды, вызывающая отложение солей не только в оросительных устройствах, но и в подводящих трубопроводах и других конструктивных элементах. Особенно опасны отложения в оросителях, вызывающие снижение площади их рабочих поверхностей и, следовательно, снижая эффективность их работы. В процессе эксплуатации градирен происходит частичное испарение воды, приводящее к повышению концентрации солей. Одним из вариантов снижения солесодержания является продувка - сброс части оборотной воды в канализационную сеть и восполнение необходимого объема свежей водой, что позволяет поддерживать требуемую концентрацию солей в объеме оборотного цикла.

Таким образом, вопросы минимизации отложений на поверхностях оросителей градирен весьма актуальны, поскольку имеют как технологический, так и экономический аспекты.

Существуют различные варианты решения проблемы осадкообразования в системах оборотного охлаждения. Например, в [2, 5] выполнен анализ эффективности использования многокомпонентной реагентной обработки циркуляционной воды путем дозирования органических фосфонатов и композиций на их основе. Однако, в случае нахождения воды в системах оборотного охлаждения в состоянии перенасыщения возможно возникновение негативного эффекта, что выражается в дезактивации фосфонатов, приводящей к созданию аварийных ситуаций.

Также на проблемы осадкообразования оказывают влияние гидравлические характеристики сооружения [6] - при превалировании капельного уноса над процессами испарения воды, характерным для условий низкой тепловой нагрузки, сочетающейся с высокой скоростью циркуляции возможны значительные потери фосфонатов за счет их поступления в атмосферный воздух с каплями влаги.

В работе [1] сделан вывод, что даже при низких коэффициентах упаривания циркуляционной воды, не превышающем 1,2-1,3, в системах оборотного охлаждения происходит отложение малорастворимых соединений. Авторы связывают данный негативный эффект прежде всего с нестационарностью потоков природной добавочной воды, подаваемой в системы оборотного охлаждения, и расходами циркуляционной воды.

Выполненные авторами расчеты [7, 8] доказывают значительное влияние сезонных изменений качества исходной природной воды на процессы осадкообразования в системах оборотного охлаждения. Например, характерное для зимнего периода состояние незначительного пресыщения малорастворимыми соединениями и состояние близкое к насыщению, характерное для летнего периода, существенно отличается от ненасыщенных вод паводкового периода в плане смещения химических равновесий. Соответственно, обеспечивающий безнакипную работу коэффициент упаривания должен иметь сезонную зависимость. Анализ работы действующих систем оборотного охлаждения ТЭС показывает, что они большую часть времени работают с превышением допустимой степени упаривания воды.

Из введения читатель должен понять, что было сделано и зачем. Поэтому в нем представляется изучаемая проблема и поясняется, что является самым важным в вашем исследовании и по какой причине.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Для разработки эффективных мероприятий, позволяющих снизить скорость образования отложений на поверхностях оросителей градирен, целесообразно подробно исследовать как химический состав воды системы охлаждения, так и химический состав и особенности структуры образовавшихся отложений. Полученные данные позволят прогнозировать интенсивность процессов накипеобразования в оборотных системах охлаждения и оперативно нивелировать негативные процессы.

Исследования показателей воды системы охлаждения проводили с помощью классических методов количественного химического анализа. Для повышения точности проведенных измерений и исключения случайных ошибок измерения применялось троекратное измерение показателей с определением среднего значения.

Основные физико-химические показатели состава исходной воды, используемой в исследуемой системе охлаждения, представлен в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Диапазон изменения физико-химических показателей охлаждающей воды
Range of changes in physicochemical parameters of cooling water

Показатель	Единицы измерения	Диапазон значений
1	2	3
Величина общей жесткости	мг-экв/дм^3	9,5-10,8
Величина щелочности	мг-экв/дм^3	6,8-7,4
Концентрация хлоридов	мг/дм^3	118,3-139,1
Концентрация сульфатов	мг/дм^3	680-748
Величина электропроводности	мкСим/см	2960-3150
Общее содержание железа, Fe	мг/дм^3	0,08-0,25
Величина pH	ед. pH	7,95-8,54

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

Как видно из таблицы, исходная вода имеет достаточно высокие показатели жесткости, а также, по-видимому, содержит природные гуминовые соединения и коллоидные примеси, что подтверждается дополнительно проведёнными анализами, показавшими высокие значения окисляемости.

Учитывая физико-химические показатели исходной воды перед подачей в циркуляционные каналы её подвергают обработке методами коагуляции и известкования. В качестве коагулянта используют хлорное железо дозой 0,1 мг-экв/дм^3, а доза известкового молока находится в диапазоне 0,1 - 0,3 мг-экв/ дм^3.

Для подавления жизнедеятельности микроорганизмов, присутствующих в исходной воде, её дополнительно обрабатывают биоцидами. Биоциды подразделяются на два класса - с окисляющим и неокисляющим действием [10-12]. Первые способны вступать в реакцию с белками и липидами, вызывая биодеструкцию клеточных структур. Они эффективны, но их действие достаточно краткосрочно. Вторые обладают пролонгированным действием, вступая во взаимодействие с компонентами клеточных мембран микроорганизмов.

Представляют интерес биоциды на основе солей четвертичного аммония и биоразлагаемый сульфат тетракис(гидроксиметил)фосфония THPS 25, так как наиболее безопасны в экологическом отношении, оказывая минимальную нагрузку на окружающую среду.

В нашем случае воду обрабатывали бромбиоцидом дозой соответствующей показателям окисляемости воды в циркуляционных каналах, которые по результатам многолетних наблюдений находятся в интервале от 9,6 до 13,6 мгO_2/ дм^3.

Однако визуальное обследование оросителей градирен показало, что данный комплекс мероприятий по физико-химической и бактерицидной обработке воды не позволяет избавиться от выделения на оросителях значительного количества нерастворимых солей, образования разнообразных отложений минерального и органического характера.

***Результаты** (Results)*

Исследования отложений, образовавшихся на оросителях, осуществлялись с помощью классических методов химического анализа, а также с использованием оборудования центра коллективного пользования (ЦКП) ЮРГПУ (НПИ), а именно: анализатора размеров частиц лазерный MICROTRAC S 3500, производства США, с общим диапазоном измерений 0,024 - 2800 мкм; сканирующего электронного микроскопа Quanta 200, производства Нидерланды, с разрешающей способностью 3,5 нм и сканирующего зондового микроскопа Solver HV, производства Россия. Проведённые ранее исследования с единичным образцом отложений оросителя [12] показали достаточность данного комплекса лабораторных изысканий, позволяющих достаточно полно охарактеризовать состав и структуру исследуемого материала.

Наиболее информативные результаты проведённых исследований приведены на рисунке 1.

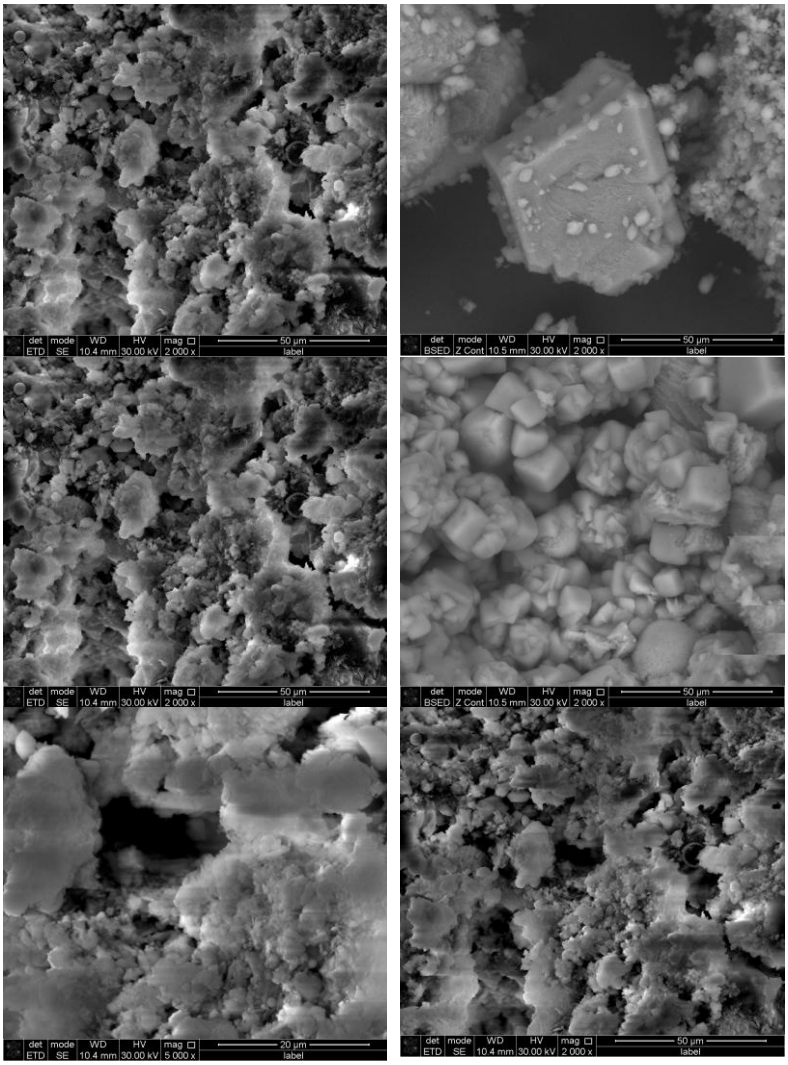


Рис. 1. Результаты исследования образцов отложений оросителя башенной градирни, выполненные с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 200

Fig. 1. The results of the study of sediment samples of the sprinkler of the tower cooling tower, performed using a scanning electron microscope Quanta 200

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

Результаты исследования образцов отложений оросителей с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 показывают, что отложения достаточно разнородны, имеют различную структуру и, по-видимому, различный химический состав. Также можно в составе отложений заметить включения, которые можно отнести к останкам живых микроорганизмов размером от 1,5 до 8,5 мкм. Данное предположение было проверено и подтверждено с помощью соответствующих экспериментов.

Исследования элементного состава образцов отложений, структура которых приведена на рисунке 1, выполняли с помощью лазерного анализатора MICROTRAC S 3500, сканирующего зондового микроскопа Solver HV и классических методов химического анализа. Результаты данных исследований приведены в таблице 2. Минимальные и максимальные процентные значения элементного состава по массе и по атомному весу, приведённые в таблице 2, получены по результатам исследования восьми образцов отложений.

Таблица 2

Table 2

Элементный состав исследованных образцов отложений оросителей башенной градирни

Elemental composition of investigated tower cooling tower sprinkler sediment samples

Элемент	Содержание по массе,%		Содержание по атомному весу, %	
	Максимальное значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Минимальное значение
C	41,1	2,5	52,4	4,2
O	70,4	37,5	82,8	41,4
Mg	1,6	0,1	1,3	0,2

K	0,3	0,2	0,1	0,1
Al	9,2	0,7	6,9	0,4
Si	7,7	0,2	5,4	0,1
P	0,4	0,2	0,2	0,1
S	0,5	0,2	0,3	0,1
Ca	45,6	10,7	23,7	4,1
Fe	4,7	0,5	1,7	0,1
Cu	0,4	0,1	0,1	0
Ti	0,2	0	0,1	0
Co	0,2	0,1	0,1	0
Cr	0,5	0,3	0,1	0
W	0,1	0	0	0
Mn	0,5	0	0,2	0

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

***Обсуждение** (Discussions)*

Анализ полученных результатов показывает, что отложения на оросителях имеют неоднородный характер и по данным рентгенофазного анализа представлены преимущественно кристаллической формой $CaCO_3$ и незначительными включениями $Mg(OH)_2$. Кроме того, присутствуют аморфные неорганизованные формы отложений, содержащие окислы алюминия, кремниевой кислоты и незначительного количества соединений железа.

Усреднённый состав отложений показал, что доля кристаллических соединений превышает 65%, а доля органики составляет порядка 10-12%. Остальная масса отложений приходится на аморфные неорганизованные формы.

Содержание органики определяли в лабораторных условиях по разности общих потерь массы при прокаливании и теоретическому значению данного показателя, обусловленному улетучиванием CO_2 в процессе нагревания. Теоретическое значение оценивается соотношением 0,79CaO.

Таким образом, можно предположить, что осуществляемые на станции мероприятия по обработке охлаждающей воды не являются достаточными.

Для подтверждения данного вывода были рассчитаны индексы стабильности Ланжелье и Ризнера воды циркуляционного канала. Результаты химических анализов проб воды циркуляционного канала приведены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Физико-химические показатели пробы воды циркуляционного канала

Physico-chemical parameters of the circulation canal water sample

Показатель	Единицы измерения	Значения показателей
1	2	3
Величина общей жесткости	мг-экв/л	21,4 - 24,9
Величина щелочности	мг-экв/л	10,5 - 12,3
Концентрация хлоридов	мг/л	368 - 387
Концентрация сульфатов	мг/л	2156 - 2351
Величина окисляемости	мгO_2/л	10,1 - 11,4
Значение температуры	^{0}C	27,6 - 30,8
Величина pH	ед. pH	8,7 - 9,1

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

Предварительно были рассчитаны коэффициент фактической кратности упаривания f и определена расчётная величина карбонатной жесткости воды циркуляционного канала g.

Коэффициент фактической кратности упаривания f воды был установлен по соотношению величин концентраций остающихся в истинно растворенном состоянии ионов хлора в оборотной и добавочной воде. Исходя из результатов дополнительно проведённых лабораторных исследований, согласно которым концентрацию хлоридов в воде после осветлителя приняли в среднем равной 127,5 мг/л, а концентрацию хлоридов в подводящем канале - в среднем 375 мг/л, расчетное значение коэффициента упаривания составило 2,9.

Расчетная величина карбонатной жесткости воды g, найденная из соотношения величин жесткости оборотной и добавочной вод, составила 2,8 мг-экв/л.

Согласно п. 2 РД 34.22.501-87 «Водный режим системы оборотного водоснабжения и определение накипеобразующей способности охлаждающей воды» контролировать процессы накипеобразования в охлаждающей системе следует с помощью соотношения величин f и g. Если величина f превышает расчётную величину карбонатной жесткости

воды циркуляционного канала g, то в системе оборотного охлаждения интенсифицируются процессы образования накипи.

Дополнительный расчет индексов стабильности воды был осуществлен согласно СНиП 2-04-02-84 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» с использованием фактических значений концентрации кальция и величины щелочности воды, а также с учетом величин pH, температуры и солесодержания. Расчёт показал, что значения индексов Ланжелье и Ризнера составляют соответственно LSI=2,48 и RSI=4,04 единиц. Значения индексов Ланжелье и Ризнера, соответственно, более 0 и менее 6 однозначно свидетельствуют о склонности воды к осадкообразованию.

Анализируя результаты проведенных расчётов можно сделать вывод, что вода в системе охлаждения имеет склонность к образованию накипи и для предупреждения образования отложений карбоната кальция на конструктивных элементах башенных градирен требуется дополнительная обработка охлаждающей воды - либо реагентными, либо физико-химическими методами, либо их комбинацией.

Как один из вариантов изменения технологии подготовки добавочной воды можно рассмотреть замену реагентных методов осаждения на более совершенные варианты снижения концентрации коллоидных примесей и значения жесткости. В частности, на стадии предочистки возможно осуществлять дополнительное дозирование флокулянтов, доза которых определяется в ходе пробной коагуляции в зависимости от текущих показателей исходной воды. Также возможно использование баромембранных технологий для снижения жесткости и величины солесодержания.

Также в качестве превентивных методов можно предложить использование более эффективных вариантов биоцидной обработки исходной воды, так как существующий метод обеззараживания не позволяет предотвратить развитие колоний микроорганизмов на оросителях градирен.

В лабораторных условиях проводилось исследование эффективности применения биоразлагаемого реагента THPS, являющегося относительно безопасным для окружающей среды по сравнению с биоцидами окисляющего действия и классическими препаратами на основе брома. Лабораторные исследования проводились в соответствии с межгосударственным стандартом по ГОСТ 34786-2021 и включали определение общего числа микроорганизмов (ОМЧ) и общих колиморфных бактерий (ОКБ - грамотрицательных, оксида-зоотрицательных, не образующих спор палочек). Приготовление реагентов и питательных сред осуществлялась в соответствии с ГОСТ ГОСТ 31955.1, ГОСТ ISO 7899-2 и ГОСТ ISO 11133.

Исследования показали, что обработка THPS позволяет обеспечивать полное отсутствие в обработанных пробах речной воды спор сульфитредуцирующих клостридий и ОМЧ менее 50 колониеобразующих единиц в 1 мл исследуемой воды.

Биоцидную обработку проводили пониженными концентрациями реагента (до 30 мг/л) в широком диапазоне pH (от 6,5 до 9,0 ед). Эксперименты показали высокую эффективность препарата в широком диапазоне pH даже при его дозировании малыми дозами и снижение эффективности данного биоцида при использовании повышенных концентраций катионных флокулянтов, используемых на стадии предварительной обработки речной воды.

Выводы *(Conclusions)*

Отложения на оросителях имеют неоднородный характер и представлены в основном кристаллической формой карбоната кальция с незначительными включениями гидроксида магния. Кроме кристаллических форм в пробах отложений присутствуют аморфные неорганизованные формы, содержащие окислы алюминия, кремниевой кислоты и незначительного количества железа и органических соединений.

С учетом того, что коэффициент фактической кратности упаривания превышает расчётную величину карбонатной жесткости воды циркуляционного канала делаем вывод, что в исследуемой системе оборотного охлаждения интенсивно протекают процессы образования накипи. Об этом же свидетельствуют расчётные значения индексов Ланжелье и Ризнера. Следовательно, для минимизации отложений на конструктивных элементах башенных градирен необходимо проведение дополнительной обработки охлаждающей воды.

Доказана эффективность использования в качестве превентивной обработки воды пониженных доз биоразлагаемого сульфата тетракис(гидроксиметил)фосфония. Данный реагент относительно безопасен для окружающей среды, а также показывает высокую эффективность в широком диапазоне pH при относительно низких концентрациях,

обеспечивая в обработанных пробах воды полное отсутствие спор сульфитредуцирующих клостридий и низкое значение общего микробного числа.

Литература

1. Определение причин осадкообразования в системе технического водоснабжения на ТЭС/Муртазин А.И., Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власов С.М. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.2012, № 1-2.

2. Мониторинг физико-химических процессов в системе оборотного охлаждения Набережночелнинской ТЭЦ/Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Волков М.А., Муртазин А.И. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.2010.

3. Повышение эффективности очистки водосборных бассейнов башенных испарительных градирен/Кольченко О.Л., Нагибина И.А., Матевосян Ю.М., Домрина Г.В., Тюменев И.П. // Глобальная ядерная безопасность, 2015, № 2(15), С. 91-99.

4. Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций/ Зенович Лешкевич Ольцинский Ю.А., Широглазова Н.В., Зенович Лешкевич Ольцинская А.Ю. // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ, 2016, Т.59, № 3.

5. Чичиров А.А., Смирнов А.Ю., Васильев В.А., Чичирова Н.Д. Экспериментальное определение испарения воды в градирнях системы оборотного охлаждения ТЭС // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2007. № 5-6.С. 134-140.

6. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Галеев И.И., Муртазин А.И., Смирнов А.Ю., Волков М.А. Моделирование и анализ процессов при функционировании систем оборотного охлаждения ТЭС // Труды Академэнерго.2009. № 2. С. 64-80.

7. Математическое моделирование материальных потоков в системе оборотного охлаждения ТЭС/А.А. Чичиров, Н.Д. Чичирова, А.Ю. Смирнов, И.Ю. Силов, А.И. Муртазин // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. № 5-6.С. 28-34.

8. Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Хусаинов Р.Р. Математическое моделирование физико-химических процессов при реагентной обработке воды // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. №2. с. 31-34.

9. Finnegan E.J., Kovac K.A., Jaligot E. et.al. The down-regulation of Flowering Locus C (FlC) expression in plants with low levels of DNA methylation and by vernalization occurs by distinct mechanisms // The Plant Journal. 2005. Vol. 44. Is.3.P. 420-432. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02541.x.

10. Kahrilas G.A., Blotevogel J., Corrin E.R., Borch T. Downhole transformation of the hydraulic fracturing fluid biocide glutaraldehyde: implications for flowback and produced water quality // Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 50. P. 11414-11423. DOI: 10.1021/acs.est.6b02881.

11. Liu X. A Lightweight Database of Human Nonsynonymous SNPs and Their Functional Predictions // Human Mutation. 2011. Vol. 32. No. 8. P. 894-899. DOI: 10.1002/humu.21517.

12. Веселовская Е.В. К вопросу минимизации отложений в системах оборотного охлаждения ТЭС/Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов XLIV Международной научно-технической конференции. Новочеркасск, 2023. С. 335-337.

Авторы публикации

Веселовская Елена Вадимовна – докт. техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции и теплотехника», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия. E-mail: elenaveselovsckaja@yandex.ru

Лазарева Елена Александровна – канд. техн. наук, доцент, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующая кафедрой «Дизайн», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

References

1. Opredelenie prichin osadkoobrasovanija v sisteme technicheskogo vodosnabjenija na TES/Murtasin A.I., Chicherova N.D., Chicherov A.A., Vlasov S.M. Isvestija vyshich uchebnyh savedenj. Problemy energetiki. 2012.

2. Monitoring fisiko-himicheskih prozessov v sisteme TES/ Chicherov A.A., Chicherova N.D., Volkov M.A., Murtasin A.I./ Isvestija vyshich uchebnyh savedenj. Problemy energetiki. 2010.

3. Povyshenie effektivnosti ochistki vodosbornyh bassejnov bashennyh isparitel'nyh gradiren/Kol'chenko O.L., Nagibina I.A., Matevosyan Yu.M., Domrina G.V., Tyumenev I.P.//Global'naya yadernaya bezopasnost', 2015, № 2(15), S. 91-99.

4. Sovershenstvovanie sistem tekhnicheskogo vodosnabzheniya s gradirnyami s cel'yu uluchsheniya tekhniko-ekonomicheskih pokazatelej teplovyh elektrostancij/ Zenovich Leshkevich Ol'cinskij Yu.A., Shiroglazova N.V., Zenovich Leshkevich Ol'cinskaya A.Yu.//Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. ob"edinenij SNG, 2016, T.59, № 3.

5. Chichirov A.A., Smirnov A.Yu., Vasil'ev V.A., Chichirova N.D. Eksperimental'noe opredelenie ispareniya vody v gradirnyah sistemy oborotnogo ohlazhdeniya TES//Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2007. № 5-6.S. 134-140.

6. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Galeev I.I., Murtazin A.I., Smirnov A.Yu., Volkov M.A. Modelirovanie i analiz processov pri funkcionirovanii sistem oborotnogo ohlazhdeniya TES//Trudy Akademenergo.2009. № 2. S. 64-80.

7. Matematicheskoe modelirovanie material'nyh potokov v sisteme oborotnogo ohlazhdeniya TES/A.A. Chichirov, N.D. Chichirova, A.Yu. Smirnov, I.Yu. Silov, A.I. Murtazin// Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2008. № 5-6.S. 28-34.

8. Chichirov A.A., Chichirova N.D., Husainov R.R. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-himicheskih processov pri reagentnoj obrabotke vody//Energosberezhenie i vodopodgotovka. 2006. №2. s. 31-34.

9. Finnegan E.J., Kovac K.A., Jaligot E. et.al. The down-regulation of Flowering Locus C (FlC) expression in plants with low levels of DNA methylation and by vernalization occurs by distinct mechanisms//The Plant Journal. 2005. Vol. 44. Is.3.P. 420-432. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02541.x.

10. Kahrilas G.A., Blotevogel J., Corrin E.R., Borch T. Downhole transformation of the hydraulic fracturing fluid biocide glutaraldehyde: implications for flowback and produced water quality // Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 50. P. 11414-11423. DOI: 10.1021/acs.est.6b02881.

11. Liu X. A Lightweight Database of Human Nonsynonymous SNPs and Their Functional Predictions // Human Mutation. 2011. Vol. 32. No. 8. P. 894-899. DOI: 10.1002/humu.21517.

12. Veselovskaya E.V. K voprosu minimizacii otlozhenij v sistemah oborotnogo ohlazhdeniya TES/Kibernetika energeticheskih sistem. Sbornik materialov XLIV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii. Novocherkassk, 2023. S. 335-337.

Authors of the publication

Elena V. Veselovskaya **–** M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia. E-mail: tes252@yandex.ru.

Elena A. Lazareva **–** M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено ***06.06.2024 г.***

Отредактировано ***10.06.2024 г.***

Принято ***17.06.2024 г.***

© Гиззатуллин А.Р., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д.

(cc) BY

УДК 662.76 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135**

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА

Гиззатуллин А.Р., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
gizzatar@gmail.com

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ. Паровая конверсия метана – доминирующий способ получения водорода. Значительная доля этого процесса в мировых выбросах CO_2 задаёт важность оптимизации его технологических параметров для снижения экологического воздействия. Разработанная многокомпонентная модель паровой конверсии метана в COMSOL Multiphysics актуальна не только благодаря ее применимости к оптимизации существующих производственных установок, но и потенциалом для разработки новых методов утилизации попутного нефтяного газа. В контексте импортозамещения в сфере водородной энергетики данная модель также представляет собой интерес, позволяя рассчитывать технологические параметры промышленных установок. ЦЕЛЬ. Цель работы состоит в разработке и верификации многокомпонентной модели паровой конверсии метана. МЕТОДЫ. Методология исследования включает в себя использование экспериментальных данных из литературы и промышленных показателей для интеграции в многокомпонентную модель в COMSOL Multiphysics. Это обеспечивает моделирование сложных химических взаимодействий в условиях, характерных для промышленного процесса паровой конверсии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработанная многокомпонентная модель позволяет рассчитывать ключевые параметры процесса паровой конверсии метана, включая концентрацию компонентов (метана, водорода, монооксида и диоксида углерода) и температуру по длине реактора. Модель успешно описывает химические взаимодействия между компонентами и учитывает влияние операционных условий, таких как температура, давление и соотношение пар/газ, на эффективность процесса. Верификация модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными и показателями реальных промышленных процессов. Их соответствие подтверждает высокую степень достоверности и пригодность модели для практического применения в инженерных расчетах и оптимизации процессов паровой конверсии метана. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Выводы, сделанные на основе моделирования, могут быть использованы для дальнейшего усовершенствования технологий конверсии метана что способствует повышению их эффективности и экологичности. Существует также потенциал применения модели для расчёта ступеней установок по утилизации продуктов переработки попутного нефтяного газа.*

Ключевые слова: *паровая конверсия метана; COMSOL Multiphysics; верификация модели; многокомпонентное моделирование; химическая кинетика.*

Благодарности: *Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки «Изучение процессов в гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001*

Для цитирования: Гиззатуллин А.Р., Филимонова А.А., Чичирова Н.Д. Разработка и верификация многокомпонентной модели паровой конверсии метана // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 124-135. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135.

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF A MULTI-COMPONENT MODEL FOR STEAM METHANE REFORMING

Gizzatullin A.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
gizzatar@gmail.com

Abstract: *RELEVANCE. Steam methane reforming is the dominant method of hydrogen production. Its significant share in global CO2 emissions highlights the importance of optimizing technological parameters to reduce environmental impact. The developed multi-component model of steam methane reforming in COMSOL Multiphysics is relevant not only due to its applicability for optimizing existing production facilities but also for its potential in developing new methods for utilizing associated petroleum gas. In the context of import substitution in the hydrogen energy sector, this model is also of interest, allowing for the calculation of technological parameters of industrial installations. THE PURPOSE. The aim of the work is to develop and verify a multi-component model of steam methane reforming. METHODS. The research methodology includes the use of experimental data from the literature and industrial indicators for integration into a multi-component model in COMSOL Multiphysics. This enables the modelling of complex chemical interactions under conditions characteristic of the industrial steam methane reforming process. RESULTS. The developed multi-component model allows calculating key parameters of the steam methane reforming process, including the concentration of components (methane, hydrogen, carbon monoxide, and carbon dioxide) and temperature along the reactor. The model successfully describes the chemical interactions between components and takes into account the influence of operating conditions, such as temperature, pressure, and steam/gas ratio, on process efficiency. The model verification was carried out by comparing the modelling results with experimental data and indicators of real industrial processes. Their correspondence confirms the high degree of reliability and suitability of the model for practical application in engineering calculations and optimization of steam methane reforming processes. CONCLUSION. The conclusions made based on the modelling can be used for further improvement of methane conversion technologies, contributing to their efficiency and environmental friendliness. There is also potential for using the model to calculate the stages of installations for the utilization of products from the processing of associated petroleum gas.*

Keywords: *methane steam reforming; multi-component modeling; COMSOL Multiphysics; model verification; chemical kinetics.*

Acknowledgements: *The results were obtained with financial support from the Ministry of Science and Higher Education «Study of processes in a hybrid power plant fuel cell - gas turbine» project code FZSW-2022-0001*

For citation: Gizzatullin A.R., Filimonova A.A., Chichirova N.D. Development and verification of a multi-component model for steam methane reforming. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 124-135. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-124-135.

Введение *(Introduction)*

В последние десятилетия водород прочно занимает позицию одного из ключевых энергоносителей будущего. В контексте устойчивого развития и сокращения выбросов углерода, водородные технологии обещают изменить многие отрасли, от транспорта до промышленного производства. Особое внимание в данном контексте уделяется процессу паровой конверсии метана, который на сегодняшний день является доминирующим методом производства водорода. В промышленности 18% водорода получают путем газификации угля, 30% путём частичного окисления углеводородов (каталитическое окисление), 48% путем паровой конверсии метана [1].

Стоит отметить, что процесс паровой конверсии метана для получения водорода или синтез-газа сегодня зависит от сжигания ископаемого топлива и в целом обусловливает почти 3% мировых выбросов CO_2 [2]. Существуют альтернативные паровой конверсии метана методы чистого производства водорода, однако по разным причинам они пока не получили широкого промышленного распространения [3].

Одним из чистых вариантов получения водорода рассматривают электролиз, однако этот процесс значительно проигрывает конверсии по энергетической эффективности. Для производства одной молекулы водорода методом электролиза термодинамически требуется в четыре раза больше энергии, чем для получения водорода из природного газа [1]. Принимая во внимание доминирующее положение сжигания ископаемых топлив для получения электричества, преимущества электролиза сводятся на нет. Хотя в будущем, возможно, доля солнечной или атомной генерации возрастёт, но на текущий момент электролиз плохо подходит для существующей инфраструктуры. [4, 5, 6].

Таким образом, паровая конверсия метана остаётся ключевым способом получения водорода. Этот процесс широко исследуется и оптимизируется с точки зрения повышения

эффективности и снижения экологического воздействия (утилизация тепла в атмосферу и выбросы CO_2 и CO) [7, 8].

Разработка цифровой модели, учитывающей многокомпонентную смесь исходного сырья для паровой конверсии метана и способной описывать масштаб промышленного производства важна по нескольким причинам:

- Повышение эффективности процесса: состав смеси исходного сырья в значительной степени влияет на эффективность процесса конверсии. Учёт взаимодействия между различными компонентами сырья и катализаторами помогает при оптимизации условий реакции с целью максимизации производства водорода и минимизации образования побочных продуктов [9, 10].
- Снижение воздействия на окружающую среду: Разработка эффективных моделей производства может помочь в минимизации выбросов CO_2 и других вредных веществ за счет более эффективного использования сырья и энергии. Это способствует созданию более экологичных производственных процессов [3].

Другим перспективным направлением применения модели является расчёт ступеней установок по утилизации продуктов переработки попутных нефтяных газов. В настоящий момент значительное количество попутных газов на производствах утилизируется факельным методом. Тем не менее существуют предпосылки, указывающие на возможность утилизации газа в газовых турбинах [11]. На предприятии ПАО «Нижнекамскнефтехим» в 2023 году состоялся пуск одной из первых в России турбин такого рода [12]. Она предназначена для утилизации продуктов отдувок производства пиролиза завода этилена. Такие турбины требуют заданного состава топлива и не могут работать в составе существующих производств без ступени предварительной подготовки топлива. Разрабатываемая модель потенциально позволяет проектировать ступень конверсии газа, обеспечивая заданный состав конвертируемого газа и позволяя расширять практику использования газовых турбин для утилизации продуктов переработки попутного нефтяного газа. Первым шагом в решении этой задачи является разработка модели паровой конверсии метана. Далее необходимо добавлять в модель учёт других компонентов в составе исходного газа.

Использование программного обеспечения COMSOL Multiphysics для моделирования паровой конверсии метана позволяет интегрировать в модель как экспериментальные данные, так и данные промышленных процессов. Это обеспечивает возможность тестировать цифровые модели в различных условиях и с разнообразным сырьем, что является ключевым для разработки универсальных и эффективных технологических решений в области водородной энергетики.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

Паровая конверсия [13] представляет собой процесс, в котором углеводороды и водяной пар превращаются в смесь оксидов углерода и водорода с использованием катализатора в трубчатых реакторах при высокой температуре. Типичные параметры промышленного процесса показаны в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Типичные условия паровой конверсии для различных применений
Typical steam reforming conditions for various applications

Назначение синтез-газа	Сырьё	Соотношение пар/газ	Температура, °C	Давление, атм
Аммоний	Природный газ, нафта	3..4,5	775..825	3,5..4,5
Метанол	Природный газ	2,5..3,5	840..870	1,5..2,5
Водород для нефтепереработки	Природный газ	2,5..3,5	800..870	2,0..3,5
Восстановительный газ (Прямое восстановление железа)	Природный газ	1..2	850..900	0,3..1
Пре-конверсия	Природный газ	0,8..2	400..550	2..3,5
CO	Природный газ	1,5..2,5	800..850	1,5..2,5
Топливные элементы	Метанол, Природный газ, Нафта	1..10	700..850	0,1..0,3
Процесс Фишера–Тропша	Природный газ	0,6..2,0	700..1200	2..5

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

Важно отметить, что соотношение пар-газ, давление и температура в значительной степени определяют перечень протекающих реакций. Однако было показано, что при условиях, близких к промышленным, рассматриваются только три реакции. Они показаны в таблице 2 вместе с эмпирическими константами равновесия [14].

Таблица 2
Table 2

Реакции, рассматриваемые при паровой конверсии метана
Reactions considered in steam methane reforming

	Реакция	Константа равновесия реакции, K_{pi}	Размерность
1	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow 3H_2 + CO$	$1{,}198\times10^{17}\exp(-26830/T)$	$(кПа)^2/(kPa)^2$
2	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$1{,}767\times10^{-2}\exp(4400/T)$	$(кПа)^0/(kPa)^0$
3	$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$	$2{,}117\times10^{15}\exp(-22430/T)$	$(кПа)^2/(kPa)^2$

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

Таким образом, химические реакции, происходящие в процессе паровой конверсии природного газа, включают обратимые реакции метана с водяным паром и паровую конверсию монооксида углерода. Их продуктом является синтез-газ с составом, который может быть скорректирован в зависимости от условий процесса и технологической схемы, чтобы соответствовать требованиям конечного потребителя.

Типичное промышленное предприятие по паровой конверсии метана для производства водорода (>50 000 $нм^3/ч$ водорода) включает в себя ряд операционных блоков [14]. В подаваемом природном газе может содержаться незначительное количество серы, которая негативно влияет на активность катализатора [17]. Для удаления серы используется блок десульфуризации [15, 18]. В случае наличия высших углеводородов в составе исходного сырья используется предварительный риформер, работающий при температуре около 450°C. Он превращает все высшие углеводороды с паром в процессный газ, состоящий из метана, водорода, пара и оксидов углерода [15]. Перед тем как попасть в основной риформер [15] – самый большой, сложный и дорогой операционный блок завода [19], газ предварительно нагревается до примерно 650°C за счет использования тепла от дымовых газов. Реакции паровой конверсии преимущественно протекают в риформере, который состоит из сотен узких (диаметр 8..15 см) и длинных (10..15 м) труб, заполненных катализатором в виде гранул, расположенных в большой печной камере. Обычно по экономическим причинам используется никелевый катализатор, хотя другие материалы (Ru, Rh) демонстрируют более высокую активность [15, 18]. Гранулы катализатора имеют форму, минимизирующую падение давления и максимизирующую площадь поверхности. Множество горелок расположены по ходу технологической схемы для оптимального распределения тепла [15, 20, 21].

В случае референсного производства главным продуктом конверсии является водород. Поэтому после получения синтез-газа необходимо выполнить адсорбцию оксида углерода и других примесей. Схема процесса представлена на рисунке 1.

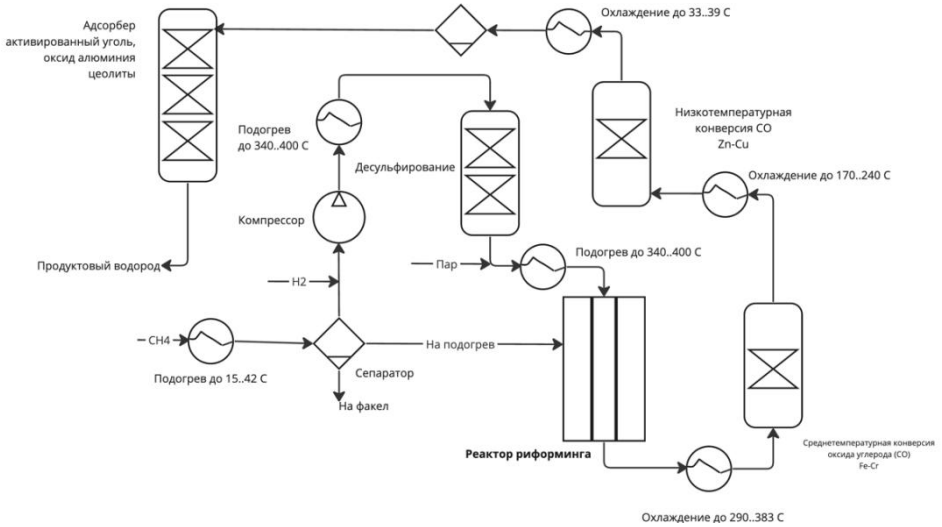


Рис 1. Принципиальная технологическая схема референсного производства водорода через паровую конверсию природного газа

Fig. 1. Schematic diagram of the reference hydrogen production process through steam methane reforming of natural gas

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

Кинетические механизмы *(Kinetics)*

Механизм кинетики легких углеводородов достаточно сложен. Он включает в себя не только перенос и диффузию реагентов и продуктов между объемной фазой и поверхностью катализатора, а также внутри катализатора, но и одновременное протекание нескольких реакций, как параллельных, так и последовательных. Проведение исследований кинетики реакции метана с паром на катализаторах различного состава, полученных разными методами и имеющих различный размер частиц, а также в широком диапазоне температур и давлений, привели к предложению различных механизмов и кинетических моделей. Причины этого двояки: во-первых, изменение состава катализатора влияет не только на параметры кинетической модели, но и на её структуру из-за изменений в механизме реакций [22]; во-вторых, эффекты ограничения диффузии в некоторых экспериментах часто приводят к неправильному пониманию кинетического механизма. К примеру, в реакторах с небольшим отношением длины к диаметру значительное влияние на процесс оказывает скорость диффузии компонентов от разогретой стенки к центру. Соответственно при моделировании распространенное допущение об идеальном смешении приведёт к значительно более высоким значениям по конверсии в сравнении с реальным реактором. Построение модели с этим допущением может привести как к ошибочному выбору кинетического механизма в целом, так и кинетических параметров в частности.

Это обстоятельство делает невозможным создание универсальной кинетики, применимой к различным катализаторам, с возможностью адаптации параметров под каждый конкретный случай. Следовательно, важно экспериментально исследовать механизм и кинетику каждого типа катализатора для паровой конверсии в условиях, исключающих ограничения по массо- и теплопереносу, а также диффузии [14].

Существующие кинетические уравнения скорости реакции можно условно разделить на две группы. Первая группа рассматривает только кинетику распада метана с образованием угарного или углекислого газов. Вторая группа учитывает скорости образования угарного и углекислого газов отдельно, что позволяет делать прогнозы о распределении продуктов реакции. С точки зрения проектирования, моделирования и оптимизации промышленного риформера важно определить детальный состав продуктов и влияние эксплуатационных условий на желаемый выход продуктов. Таким образом, вторая группа кинетических уравнений скорости реакции больше подходит для этих целей. Среди них кинетические модели делятся на два типа: элементарные реакции и схема Ленгмюра-Хиншельвуда.

Схема Ленгмюра-Хиншельвуда (ЛХ)

Исследователями были предложены различные модели для описания работы коммерческих катализаторов. Ключевыми различиями моделей являются эмпирические выражения и параметры для скоростей проходящих реакций в зависимости от парциального давления реагентов. В таблице 3 приведён краткий обзор литературных данных.

Таблица 3

Table 3

Типы и параметры кинетических моделей для различных катализаторов при паровой конверсии

Types and parameters of kinetic models for various catalysts in steam reforming

Автор	Катализатор	T, K	P, бар	Тип модели
Xu и Froment [23]	$Ni/MgAl_2O_4$	400..727	30	ЛХ
Rostrup-Nielsen [19]	$Ni/MgAl_2O_4$	500..800	1..35	ЛХ
Trimm and Onsan [26]	Ni/MgO	310..550	1..30	ЛХ
Wei and Iglesia [25]	Ni/MgO и Ru,Ir, Rh и Pt/ZrO2	550..750	1..5	Элементарные реакции
Gokon et al [27]	Ru/Al_2O_3	600..750	1	ЛХ
Kaihu Hou [14]	$Ni/\alpha - Al_2O$	475..550	1,2..6	ЛХ
Hye Jin Jun[28]	Ni-CeO_2/ $MgAl_2O_4$	700–900	2,5–10	ЛХ

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

Из обзора видно, что большинство моделей основаны на кинетике Ленгмюра-Хиншельвуда. Это связано с тем, что для этой кинетики в условиях экспериментов реально проводить валидацию. Нахождение же скоростей элементарных реакций – трудоёмкая задача. Также из обзора видно, что при смене катализатора необходима корректировка уравнений по кинетике ЛХ. Авторами были найдены подобные модели, разработанные в COMSOL Multiphysics, однако их валидация с промышленными параметрами конверсии не проводилась.

Задачей, поставленной в исследовании, явилась разработка цифровой модели реактора паровой конверсии метана в программе инженерного моделирования COMSOL Multiphysics версии 6.2. Для верификации разработанной модели использовались данные исследования [14] и рабочие параметры промышленной установки нефтеперерабатывающего предприятия Республики Татарстан производительностью 26500 нм^3/ч водорода высокой чистоты (99,9 % об.).

Рабочие параметры установки, используемые на референсном нефтехимическом предприятии, схожи с условиями работы, задаваемыми в исследовании [14]. Экспериментальные условия по температуре и давлению также были близки. Существенным отличием тем не менее является массовый расход компонентов. В промышленности он значительно превосходит лабораторные условия, приведенные в исследованиях. В промышленном реакторе также используются сразу два слоя никелевого катализатора разных марок.

В таблице 4 перечислены условия конверсии для исследования (п.1-4) и промышленного производства (п.5).

Таблица 4

Table 4

Условия конверсии в референсном исследовании и на производстве

Conversion conditions in reference study and production

№	W/FCH$_4$, кг*с/кмоль	P, кПа	T_вх	T_вых	Q, кВт/м^3	Соотношения компонентов
1	12500	300	800	800	-	H2O:CH4:H2 = 5:1:1
2	12500	300	750	750	-	H2O:CH4:H2 = 5:1:1
3	12500	120	800	800	-	H2O:CH4:H2 = 5:1:1
4	12500	120	750	750	-	H2O:CH4:H2 = 5:1:1
5	7,54*10^6	3100	740	1097	30,5	H2O:CH4= 3,5:1

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

В таблице 4 W – загрузка катализатора, кг; FCH4 – поток метана, кмоль/с. Их соотношение позволяет сравнивать между собой эксперименты с различной загрузкой катализатора и потоком газа. Фактически это соотношение определяет время взаимодействия газа с катализатором.

Описание модели *(Model Description)*

Объектом моделирования является единичная труба реактора. В случае производства её длина составляет 15 м, диаметр – 0,94 м. В референсном исследовании [14] реактор имеет длину 20 см, диаметр – 1 см.

При разработке модели были сделаны следующие допущения:

1. Пренебрежимо малое падение давления.
2. Отсутствие межфазных и внутричастичных ограничений массопереноса.
3. Проточное течение в реакторе (отсутствие радиального изменения параметров).

Допущение 1 справедливо для промышленного производства и исследования. Падение давления соответственно не превышает 0,127 МПа (0.4%) и 20 Па (0.02%). Допущение 2 было подтверждено экспериментами с изменением размера частиц катализатора и теоретическими расчетами [16]. Допущение 3 принято из-за большого отношения длины реактора к его диаметру. В референсном исследовании дополнительно к указанным допущениям также задавался изотермальный режим течения жидкости, термодинамика не рассчитывалась. Это справедливо для исследования по причине небольшой загрузки и малого размера гранул катализатора. В случае промышленного производства предположение о малом влиянии допущения не будет справедливым. В разрабатываемой модели течение неизотермальное, термодинамика рассчитывается.

Баланс масс частиц в таком реакторе задаётся:

$$\frac{dF_i}{dV} = R_i \quad (2)$$

где F_i - молярный поток компонента, моль/с; V - объем реактора, м^3; Ri - скорость реакции для компонента, моль/(м^3·с); она связана с количеством реакций r_i через стехиометрические коэффициенты. Схематично решаемая задача показана на рисунке 2.

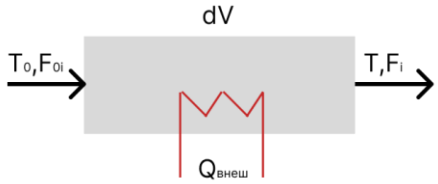


Рис. 2. Схематичное представление решаемой задачи

Fig. 2. Schematic representation of the problem being solved

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

Выражение (2) задаёт баланс масс частиц в зависимости от объема реактора. Его решение лежит в 0D пространстве и не предполагает наличия расчётной сетки и задания геометрических параметров. При постоянном поперечном сечении реактора, можно перейти от распределения концентраций по объему к их распределению по длине реактора. Проверка сеточной сходимости соответственно не требуется.

$$\frac{dF_i}{SdL} = R_i \tag{3}$$

С учётом сделанных допущений, энергетический баланс для идеально реагирующего газа, так же как для несжимаемой и идеально перемешиваемой реагирующей жидкости, задается следующим образом:

$$\sum_i F_i \; C_{p,i} \frac{dT}{dV} = Q + Q_{\text{внеш}} \tag{4}$$

$$Q = -\sum_i H_i r_i \tag{5}$$

где Cp,i молярная теплоёмкость частиц, Дж/(моль К); H_i – энтальпия реакции, Дж/моль; $Q_{\text{внеш}}$ – подводимая к реактору теплота, Вт/м^3; r_i – скорость реакции, моль/(м^3·с).

В уравнении энергетического баланса (4) молярная теплоемкость определяется при использовании уравнения состояния Пенга-Роббинсона, использующееся в COMSOL для расчета термодинамических свойств в условиях реального газа. Значения теплоёмкости извлекаются из интегрированной термодинамической базы данных COMSOL, обеспечивая точность в энергетических расчетах при заданных температуре и давлении. Из этой же базы данных берутся значения энтальпии.

Граничные и начальные условия в данном случае состоят из начальной температуры, давления процесса, подводимой теплоты, расхода газа и соотношений компонентов. В модели они соответствуют данным, приведенным в таблице 4. Однако поскольку в отличие от исследования [14], режим течения разрабатываемой модели – неизотермический, то подводимая к реактору теплота задавалась значением, обеспечивающим соответствие конечной температуры газа с данными исследования.

Кинетикой реакций задаются источники расхода или наработки веществ. По проведенному обзору наиболее подходящей для условий моделирования является кинетика Ленгмюра-Хиншельвуда. Выбранная кинетическая модель определяет скорости химических реакций из таблицы 2, она представлена уравнениями скоростей реакций:

$$r_1 = k_1\left(P_{CH4}\frac{P_{H2O}^{0.5}}{P_{H2}^{1.25}}\right) * \frac{1 - \left(\frac{P_{CO}P_{H2}^3}{KP_{SRM1} * P_{CH4} * P_{H2O}}\right)}{DEN^2} \tag{6}$$

$$r_2 = k_2\left(P_{CO} * P_{H2O}^{0.5}/P_{H2}^{0.5}\right) * \frac{1 - \left(\frac{P_{CO2}P_{H2}}{KP_{WGS} * P_{CO} * P_{H2O}}\right)}{DEN^2} \tag{7}$$

$$r_3 = k_3\left(P_{CH4}\frac{P_{H2O}}{P_{H2}^{1.75}}\right) * \frac{1 - \left(\frac{P_{CO2}P_{H2}^4}{KP_{SRM2} * P_{CH4} * P_{H2O}^2}\right)}{DEN^2} \tag{8}$$

где $DEN = (1 + K_{CO}P_{CO} + K_{H2}P_{H2}^{0.5} + K_{H2O}(\frac{P_{H2O}}{P_{H_2}}))$; P_i – парциальные давления компонентов, кПа; K_{pi} – константы равновесия реакций; K_i – константы адсорбции реакций, задаются уравнением Аррениуса:

$$K_{pi} = A(K_i)\exp\left(-\frac{\Delta H_i}{RT}\right) \tag{9}$$

где ΔH_i - энтальпия адсорбции (теплота хемосорбции)

k_i – константы скорости реакций, задаются уравнением Аррениуса

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad (10)$$

Параметры, используемые в кинетической модели, перечислены в таблице 5.

Таблица 5
Table 5

Параметры кинетической модели
Kinetic model parameters

E_1, кДж/моль	E_2, кДж/моль	E_3, кДж/моль	$\Delta H_{CO,a}$, кДж/моль	$\Delta H_{H,a}$, кДж/моль	$\Delta H_{H_2O,a}$, кДж/моль
209,2	15,4	109,4	−140,0	−93,4	15,9
A_1	A_2	A_3	$A(K_{CO})$	$A(K_H)$	$A(K_{H2O})$
$5{,}922 \times 10^{8}$	$6{,}028 \times 10^{-4}$	$1{,}093 \times 10^{3}$	$5{,}127 \times 10^{-13}$	$5{,}68 \times 10^{-10}$	9,251

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

Здесь скорости реакций имеют размерность кмоль/кг$_{кат}$ с. Для перевода скоростей реакций в объемные скорости нужно знать насыпную плотность катализатора. В исследуемых случаях $\rho_{кат1}$ = 970 кг/м^3 и $\rho_{кат2}$ = 1790 кг/м^3 для производства и лабораторных условий, соответственно.

Результаты и обсуждение *(Results and Discussion)*

В данном разделе представлены результаты и верификация многокомпонентной модели паровой конверсии метана в COMSOL Multiphysics, которая учитывает различные компоненты исходной газовой смеси. Модель была сопоставлена с экспериментальными данными из других исследований, а также с операционными данными крупного промышленного производства, что позволило оценить ее точность и пригодность для анализа процессов конверсии. На рисунке 3 приведены распределение молей компонентов и температуры по длине реактора.

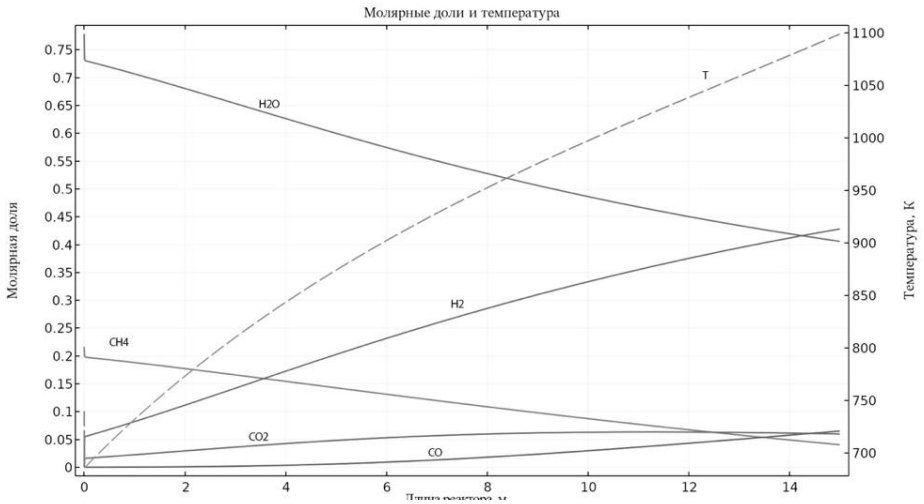


Рис 3. Молярные доли компонентов и температура по длине реактора, эксперимент №5

Fig. 3. Molar fractions of components and temperature along the reactor length, experiment No. 5

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

Результаты полученного распределения хорошо согласуются с промышленными данными и анализом литературных источников. Температура газа на выходе практически идентична данным с производства. Картина корректно иллюстрирует процесс распада метана и наработки продуктов конверсии.

В таблице 6 приведено сравнение показателя конверсии метана модели с результатами [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] и промышленным производством.

Таблица 6
Table 6

Сравнение конверсий метана в различных условиях
Comparison of methane conversions under different conditions

№	XCH4_модель, %	XCH4_эксп, %
1	37%	32%

2	18%	15%
3	31%	28%
4	17%	14%
5	93%	96%

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

По сравнению с результатами исследования, где были использованы меньшие по сравнению с производством значения температуры, давления и массового расхода (п.1-4), разработанная модель показала на 3..5% большую конверсию метана. Это различие может быть обусловлено существующими в модели допущениями, прежде всего – идеальным смешением.

Видим, что по сравнению с производством (п.5) модель показала на 3% меньшую конверсию метана. Таким образом, несмотря на допущение об идеальном смешении, использование двух слоёв катализатора в установке, как видно, даёт значительный выигрыш в конверсии. Тем не менее, незначительное отклонение модели в 3% подчеркивает ее способность достаточно точно воспроизводить промышленные процессы.

Что касается молярных долей компонентов, модель дала следующие результаты, таблица 7.

Таблица 7
Table 7

Сравнение долей компонентов на выходе реактора
Comparison of the proportions of components at the reactor outlet

	CH4	H2	CO	CO2
Модель	7,1%	74,4%	0.5%	18,5%
Производство	не более 4,2 %	75..76,4 %	не более 3,2 %	16..17,2 %

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

Несмотря на небольшие расхождения в долях CH4 и CO2, общая картина соответствует промышленным данным, подтверждая валидность модели для использования в качестве инструмента для анализа и оптимизации процессов конверсии.

Заключение *(Conclusion)*

Разработанная модель представляет собой ценный инструмент для понимания и оптимизации процесса паровой конверсии метана. Разработанная модель хорошо описывает ступень одного из крупнейших промышленных производств республики Татарстан. Верификация модели с использованием реальных данных подтверждает ее пригодность для применения в промышленности и научных исследованиях.

Результаты исследования открывают путь для дальнейшего совершенствования технологий конверсии и повышения их эффективности. Ключевыми из них станет разработка 3-Д модели с учётом эффектов диффузии и возможностью расчёта реактора с двумя слоями катализатора. Добавление в модель дополнительных реакций позволит провести исследования по численному моделированию конверсии любого газообразного углеводородного топлива. Это, в свою очередь, позволит решать задачи по проектированию ступеней установок по утилизации продуктов переработки попутного газа с помощью газовых турбин.

Литература

1. Lemus R.G., Duart J.M.M. Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. Vol. 35, № 9. P. 3929–3936.

2. Quéré C.L. et al. Global Carbon Budget 2015 // Earth System Science Data. 2015. Vol. 7, № 2. P. 349–396.

3. Yan W., Hoekman S.K. Production of CO2-free hydrogen from methane dissociation: A review // Environmental Progress & Sustainable Energy. 2013. Vol. 33, № 1. P. 213–219.

4. 2023 levelized cost of energy+ [Electronic resource] // Lazard. 2023. URL: https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/ (accessed: 04.02.2024).

5. World Energy Outlook 2023 [Electronic resource] // IEA. 2023. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 (accessed: 04.02.2024).

6. Abánades A., Rubbia C., Salmieri D. Technological challenges for industrial development of hydrogen production based on methane cracking // Energy. 2012. Vol. 46, № 1. P. 359–363.

7. Msheik M., Rodat S., Abanades S. Methane cracking for hydrogen production: A review of Catalytic and molten Media Pyrolysis // Energies. 2021. Vol. 14, № 11. P. 3107.

8. Lee J.H., Jegarl S. Selecting optimal CO2-Free hydrogen production technology considering market and technology // Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy. 2023. Vol. 19, № 2. P. 13–22.

9. А. А. Филимонова, А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, А. В. Печенкин. Риформинг углеводородного топлива в электрохимических системах (обзор) // Теплоэнергетика. – 2023. – № 8. – С. 75-85. DOI: 10.56304/S0040363623080027.

10. Di Giuliano A., Gallucci K. Sorption enhanced steam methane reforming based on nickel and calcium looping: a review // Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. 2018. Vol. 130. P. 240–252.

11. А. Г. Х. Алфаяад, Д. З. Валиев, Р. А. Кемалов, А. Ф. Кемалов. Применение газотурбинной установки для утилизации попутного нефтяного газа с различным углеводородным составом // Технологии нефти и газа. – 2023. – № 5(148). – С. 39-46. – DOI: 10.32935/1815-2600-2023-148-5-39-46.

12. «Нижнекамскнефтехим Л.Е.Ф.П. На природном газе: на ПГУ-ТЭС «Нижнекамскнефтехима» состоялся розжиг первой газотурбинной установки [Electronic resource] // Реальное Время. 2021. URL: https://realnoevremya.ru/articles/216576-na-pgu-tes-nknh-sostoyalsya-rozzhig-pervoy-gazoturbinnoy-ustanovki.

13. CChem M.V.T.Bs.P., Twigg M.V. Catalyst Handbook // Routledge eBooks. 2018.

14. Hou K., Hughes R. The kinetics of methane steam reforming over a Ni/α-Al2O catalyst // Chemical Engineering Journal. 2001. Vol. 82, № 1–3. P. 311–328.

15. Rostrup-Nielsen J.R., Christiansen L. Concepts in Syngas manufacture // Catalytic science series. 2011.

16. C K. Hou, Experimental study of intrinsic kinetics and diffusion during methane steam reforming, Ph.D. thesis, The University of Salford, UK, 1998

17. Pagliaro M. Catalysis: Concepts and Green Applications.Gadi Rothenberg Wiley-VCH: Weinheim, 2008, 273 pages + XII; ISBN: 978-3-527-31824-7 55,00 €/45,00 £/80,00 $ // Advanced Synthesis & Catalysis. 2008. Vol. 350, № 13. P. 2133–2134.

18. Aasberg-Petersen K. et al. Natural gas to synthesis gas – Catalysts and catalytic processes // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2011. Vol. 3, № 2. P. 423–459.

19. Rostrup-Nielsen J.R., Sehested J., Noerskov J.K. Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO2 reforming // ChemInform. 2003. Vol. 34, № 17.

20. Kumar A., Bâldea M., Edgar T.F. A physics-based model for industrial steam-methane reformer optimization with non-uniform temperature field // Computers & Chemical Engineering. 2017. Vol. 105. P. 224–236.

21. Latham D.A. et al. Mathematical modeling of an industrial steam-methane reformer for on-line deployment // Fuel Processing Technology. 2011. Vol. 92, № 8. P. 1574–1586.

22. В. А. Мунц, Ю. В. Волкова, Н. С. Плотников [и др.]. Исследование характеристик энергетической установки 5 кВт на твердооксидных топливных элементах с паровым риформингом природного газа // Теплоэнергетика. – 2015. – № 11. – С. 15.

23. Xu J., Froment G.F. Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics // AIChE Journal. 1989. Vol. 35, № 1. P. 88–96.

24. Aparicio L.M. Transient Isotopic Studies and Microkinetic Modeling of Methane Reforming over Nickel Catalysts // Journal of Catalysis. 1997. Vol. 165, № 2. P. 262–274.

25. Jin W., Iglesia E. Isotopic and kinetic assessment of the mechanism of reactions of CH4 with CO2 or H2O to form synthesis gas and carbon on nickel catalysts // Journal of Catalysis. 2004. Vol. 224, № 2. P. 370–383.

26. Trimm D.L., Önsan Z.İ. ONBOARD FUEL CONVERSION FOR HYDROGEN-FUEL-CELL-DRIVEN VEHICLES // Catalysis Reviews. 2001. Vol. 43, № 1–2. P. 31–84.

27. Gokon N. et al. Kinetics of methane reforming over Ru/γ-Al2O3-catalyzed metallic foam at 650–900°C for solar receiver-absorbers // International Journal of Hydrogen Energy. 2011. Vol. 36, № 1. P. 203–215.

28. Jun H.J. et al. Kinetics modeling for the mixed reforming of methane over Ni-CeO2/MgAl2O4 catalyst // Journal of Natural Gas Chemistry. 2011. Vol. 20, № 1. P. 9–17.

Авторы публикации

Гиззатуллин Азамат Русланович – аспирант кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0755-3970. gizzatar@gmail.com

Филимонова Антонина Андреевна – канд. мед. наук, доцент кафедры «Химия и водородная энергетика» Казанского государственного энергетического университета. aachichirova@mail.ru

Чичирова Наталия Дмитриевна – докт. хим. наук, профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Казанского государственного энергетического университета. ndchichirova@mail.ru

References

1. Lemus R.G., Duart J.M.M. Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, vol. 35, no. 9, pp. 3929–3936. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.02.034.

2. Quéré C.L. et al. Global Carbon Budget 2015. Earth System Science Data, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 349–396. DOI: 10.5194/essd-7-349-2015.

3. Yan W., Hoekman S.K. Production of CO2-free hydrogen from methane dissociation: A review. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2013, vol. 33, no. 1, pp. 213–219. DOI: 10.1002/ep.11746.

4. 2023 levelized cost of energy+. URL: https://www.lazard.com/perspective/lcoe2023 (accessed: 04.02.2024).

5. World Energy Outlook 2023. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023 (accessed: 04.02.2024).

6. Abánades A., Rubbia C., Salmieri D. Technological challenges for industrial development of hydrogen production based on methane cracking. Energy, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 359–363. DOI: 10.1016/j.energy.2012.08.015.

7. Msheik M., Rodat S., Abanades S. Methane cracking for hydrogen production: A review of Catalytic and molten Media Pyrolysis. Energies, 2021, vol. 14, no. 11, p. 3107. DOI: 10.3390/en14113107.

8. Lee J.H., Jegarl S. Selecting optimal CO2-Free hydrogen production technology considering market and technology. Journal of the Korean Society for New and Renewable Energy, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 13–22. DOI: 10.7849/ksnre.2023.0008.

9. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Pechenkin A.V. Reforming of hydrocarbon fuel in electrochemical systems (review). Thermal Engineering, 2023, no. 8, pp. 75-85. DOI: 10.56304/S0040363623080027.

10. Di Giuliano A., Gallucci K. Sorption enhanced steam methane reforming based on nickel and calcium looping: a review. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2018, vol. 130, pp. 240–252. DOI: 10.1016/j.cep.2018.06.021.

11. Alfayaad A.G.H., Valiev D.Z., Kemalov R.A., Kemalov A.F. The use of a gas turbine unit for the utilization of associated petroleum gas with different hydrocarbon composition. Oil and Gas Technologies, 2023, no. 5(148), pp. 39-46. DOI: 10.32935/1815-2600-2023-148-5-39-46.

12. On natural gas: The first ignition of a gas turbine unit took place at the CCGT-CHP of «Nizhnekamskneftekhim». URL: https://realnoevremya.ru/articles/216576-na-pgu-tes-nknh-sostoyalsya-rozzhig-pervoy-gazoturbinnoy-ustanovki (accessed: 04.02.2024).

13. Twigg M.V., Bs P.CChem, M.V. Catalyst Handbook, 2018. DOI: 10.1201/9781315138862.

14. Hou K., Hughes R. The kinetics of methane steam reforming over a Ni/α-Al2O catalyst. Chemical Engineering Journal, 2001, vol. 82, no. 1–3, pp. 311–328. DOI: 10.1016/s1385-8947(00)00367-3.

15. Rostrup-Nielsen J.R., Christiansen L. Concepts in Syngas manufacture, 2011. DOI: 10.1142/p717.

16. Hou C.K. Experimental study of intrinsic kinetics and diffusion during methane steam reforming, Ph.D. thesis, The University of Salford, UK, 1998.

17. Pagliaro M. Catalysis: Concepts and Green Applications. Advanced Synthesis & Catalysis, 2008, vol. 350, no. 13, pp. 2133–2134. DOI: 10.1002/adsc.200800426.

18. Aasberg-Petersen K., Dybkjær I., Ovesen C.V., Schjødt N.C., Sehested J., Thomsen S.G. Natural gas to synthesis gas – Catalysts and catalytic processes. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 423–459. DOI: 10.1016/j.jngse.2011.03.004.

19. Rostrup-Nielsen J.R., Sehested J., Noerskov J.K. Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO2 reforming. ChemInform, 2003, vol. 34, no. 17. DOI: 10.1002/chin.200317288.

20. Kumar A., Bâldea M., Edgar T.F. A physics-based model for industrial steam-methane reformer optimization with non-uniform temperature field. Computers & Chemical Engineering, 2017, vol. 105, pp. 224–236. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.01.002.

21. Latham D.A., McAuley K.B., Peppley B.A., Raybold T.M. Mathematical modeling of an industrial steam-methane reformer for on-line deployment. Fuel Processing Technology, 2011, vol. 92, no. 8, pp. 1574–1586. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.04.001.

22. Muntz V.A., Volkova Y.V., Plotnikov N.S., et al. Study of the characteristics of a 5 kW power unit on solid oxide fuel cells with steam reforming of natural gas. Thermal Engineering, 2015, no. 11, pp. 15.

23. Xu J., Froment G.F. Methane steam reforming, methanation and water-gas shift: I. Intrinsic kinetics. AIChE Journal, 1989, vol. 35, no. 1, pp. 88–96. DOI: 10.1002/aic.690350109.

24. Aparicio L.M. Transient Isotopic Studies and Microkinetic Modeling of Methane Reforming over Nickel Catalysts. Journal of Catalysis, 1997, vol. 165, no. 2, pp. 262–274. DOI: 10.1006/jcat.1997.1468.

25. Jin W., Iglesia E. Isotopic and kinetic assessment of the mechanism of reactions of CH4 with CO2 or H2O to form synthesis gas and carbon on nickel catalysts. Journal of Catalysis, 2004, vol. 224, no. 2, pp. 370–383. DOI: 10.1016/j.jcat.2004.02.032.

26. Trimm D.L., Önsan Z.İ. Onboard Fuel Conversion for Hydrogen-Fuel-Cell-Driven Vehicles. Catalysis Reviews, 2001, vol. 43, no. 1–2, pp. 31–84. DOI: 10.1081/cr-100104386.

27. Gokon N., Yamawaki Y., Nakazawa D., Kodama T. Kinetics of methane reforming over Ru/γ-Al2O3-catalyzed metallic foam at 650–900°C for solar receiver-absorbers. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.09.042.

28. Jun H.J., Park M.-J., Baek S.-C., Bae J.W., Ha K., Jun K. Kinetics modeling for the mixed reforming of methane over Ni-CeO2/MgAl2O4 catalyst. Journal of Natural Gas Chemistry, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 9–17. DOI: 10.1016/s1003-9953(10)60148-x.

Authors of the publication

Azamat R. Gizzatullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0755-3970. gizzatar@gmail.com

Antonina A. Filimonova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. aachichirova@mail.ru

Natalia D. Chichirova **–** Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ndchichirova@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено ***29.03.2024 г.***

Отредактировано ***02.05.2024 г.***

Принято ***17.06.2024 г.***

© Куницкий В.А., Лукин С.В.

(cc) BY

УДК 620.97 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-136-149**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Куницкий В.А., Лукин С.В.

ФГБОУ ВО Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия
globee@mail.ru

Резюме: *Авторами исследуется потенциальный энергетический, экономический и экологический эффект от использования локальной утилизации теплоты стоков, образующихся в душевых. АКТУАЛЬНОСТЬ. На данный момент в России практически все хозяйственно-бытовые сточные воды удаляются в канализационные сети без полезного использования теплоты, которой они обладают. Важно определить эффект от реализации такого способа утилизации теплоты, выявить и проанализировать проблемы, мешающие это сделать. ЦЕЛЬ. Цель работы заключается в определении потенциального эффекта от использования локальной утилизации теплоты стоков, образующихся в душевых. МЕТОДЫ. На основе верифицированной математической модели теплообменника определяется энергетический эффект от отдельного использования душевой. К структуре теплопотребления отдельного здания применяется ряд допущений и на основе имеющихся данных о среднегодовом теплопотреблении жилых зданий в г. Москве рассчитывается экономический и экологический эффект от энергосберегающего мероприятия. РЕЗУЛЬТАТЫ. Относительная экономия в рамках годового теплопотребления здания с децентрализованной и централизованной системой горячего водоснабжения (ГВС) составила 5,3 % и 3,1 % соответственно (64 и 37 Гкал). Экономия топлива составила: 9145 тонн условного топлива (т.у.т.) и 5227 т.у.т для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС соответственно (14,5 и 8,5 тыс. тонн CO_2-эквивалента). Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия для случая с децентрализованной системой ГВС на основе проточного электрического водонагревателя составил 1,5 года. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Локальная утилизации теплоты стоков дает возможность получить существенный энергетический и экологический эффект в рамках любого населенного пункта, но на данный момент отсутствуют меры поддержки потребителей, реализующих энергосберегающие мероприятия. В настоящее время подобный способ утилизации теплоты интересен только тем потребителям, у которых источником тепловой энергии для нужд ГВС является электричество.*

Ключевые слова: *утилизационный теплообменник для сточных вод; утилизация теплоты воды; энергоэффективность систем ГВС; экспериментальное испытание теплообменного аппарата.*

Благодарности: *Авторы благодарны Департаменту экономического развития Вологодской области за поддержку и содействие развитию научно-исследовательской деятельности в регионе.*

Для цитирования: Куницкий В.А., Лукин С.В. Определение эффективности локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 136-149. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-136-149.

DETERMINING THE EFFICIENCY OF LOCAL HEAT RECYCLING WASTEWATER BASED ON A HEAT EXCHANGER

Kunitskiy V.A., Lukin S.V.

Vologda State University, Vologda, Russia
globee@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE. The authors research the potential energy, economic and environmental effects of using local heat recovery from wastewater generated in showers. At the moment in Russia, almost all household wastewater is disposed of in sewer networks without the beneficial use of the heat that they possess. It is important to determine the effect of implementing this method of heat recovery, to identify and analyze the problems that prevent this from being done. THE PURPOSE. The purpose of the work is to determine the potential effect of using local heat recovery from wastewater generated in showers. METHODS. Based on a verified mathematical model of the heat exchanger, the energy effect from the individual use of the shower room is determined. A number of assumptions are applied to the heat consumption structure of an individual building and, based on available data on the average annual heat consumption of residential buildings in Moscow, the economic and environmental effect of energy-saving measures is calculated. RESULTS. Relative savings within the annual heat consumption of a building with a decentralized and centralized hot water supply system were 5,3% and 3,1%, respectively (64 and 37 GCal). Fuel economy amounted to: 9145 toe and 5227 toe for a building with a decentralized and centralized hot water supply system, respectively (14,5 and 8,5 thousand tons of CO_2-eq). The payback period for energy-saving measures for the case of a decentralized hot water system based on an instantaneous electric water heater was 1,5 years. CONCLUSION. Local waste heat recovery makes it possible to obtain a significant energy and environmental effect within any locality, but at the moment there are no measures to support consumers implementing energy-saving measures. Currently, this method of heat recovery is of interest only to those consumers whose source of thermal energy for the needs of hot water supply is electricity.*

Keywords: *utilization heat exchanger for wastewater; utilization of water heat; energy efficiency of hot water systems; experimental testing of a heat exchanger.*

Acknowledgment: *The authors are grateful to the Department of Economic Development of the Vologda region for supporting and promoting the development of scientific research activities in the region.*

For citation: Kunitskiy V.A., Lukin S.V. Determining the efficiency of local heat recycling wastewater based on a heat exchanger. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 136-149. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-136-149.

Введение *(Introduction)*

На сегодняшний день в России практически все хозяйственно-бытовые сточные воды удаляются в канализационные сети без предварительного отбора тепловой энергии, которой они обладают [1]. Исследование данной проблемы и поиск путей её решения согласуется с политикой рационального использования ресурсов, реализуемой, в частности, в топливно-энергетическом комплексе нашей страны.

Авторами исследуется способ утилизации теплоты сточных вод, образующихся в душевых, на основе утилизационного теплообменного аппарата. Теплообменник при этом располагается в непосредственной близости к месту образования стоков (водоразборному устройству), что позволяет практически полностью избежать тепловых потерь при транспортировке стоков до места рекуперации тепловой энергии. На основе данного способа осуществляется предварительный нагрев холодной воды, планируемой к использованию в душевой, при помощи отбора теплоты у удаляемой горячей воды. Такое устройство работает только во время использования душа и позволяет получить существенный энергетический эффект как в сетях с индивидуальным горячим водоснабжением, так и с централизованным. В первом случае энергетический эффект выражается в снижении необходимого количества теплоты для нагрева холодной воды в водонагревателе, а во втором случае выражается в виде уменьшения доли горячей воды, необходимой для получения единицы воды требуемой (комфортной) температуры [2].

Подобные устройства распространены на рынках развитых стран и стран с высокой ценой на энергоресурсы. Изображение утилизационного теплообменного аппарата (ТОА) в общем виде представлено на рисунке 1.

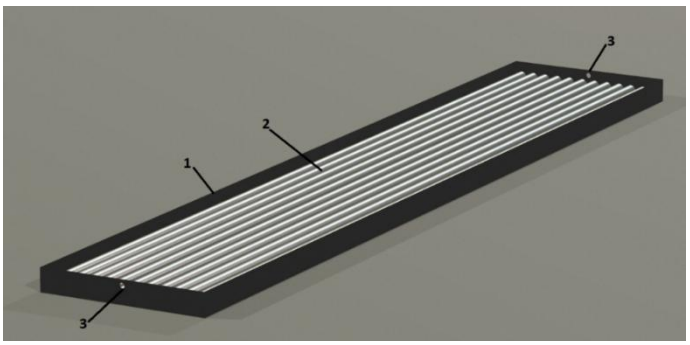


Рис. 1. Схематичное изображение теплообменного устройства, где 1 – корпус ТОА; 2 – стальные трубы с холодной водой (нагреваемой средой); 3 – отверстия для подачи воды в корпус ТОА (удаления из корпуса)

Fig. 1. Model of the heat exchange device:1 – heat exchanger housing; 2 – a tube with heated water; 3 – opening for supply/removal of the heating medium from the heat exchanger housing

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

Анализируя опыт развития топливно-энергетических комплексов других стран, можно предположить, что с ростом технического, экономического и социального уровня развития появляется необходимость более эффективного использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Рациональным путем для России представляется использование уже существующего мирового опыта в области использования ВЭР и ведение работы по решению потенциальных задач уже сейчас.

На данный момент авторами разработано техническое решение рекуперативного теплообменного аппарата для локальной утилизации теплоты сточных вод [3], разработана и верифицирована экспериментом математическая модель теплопередачи в данном устройстве [4], определены условия работы, влияющие на эффективность утилизации тепловой энергии стоков, рассчитаны капитальные затраты и определено необходимое количество приемов душа для того, чтобы окупить энергосберегающее мероприятие [5].

Для качественной оценки потенциального эффекта от энергосберегающего мероприятия необходимо учитывать то, что существенную часть времени устройство работает при нестационарном тепловом режиме. При этом создание теплообменника с унифицированными идеальными параметрами, подходящими для любого водоразборного устройства, вероятно, невозможно, так как условия и режим работы каждой душевой уникальны. В каждом конкретном случае приходится подбирать конфигурацию теплообменника для имеющихся условий, с оптимальными параметрами устройства [2].

Данная статья посвящена определению потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от использования локальной утилизации теплоты сточных вод, образующихся в душевых, в рамках отдельного жилого здания в России.

Литературный обзор (*Literature Review)*

В работах отечественных ученых, занимающихся проблемой утилизации теплоты хозяйственно-бытовых сточных вод, данная проблема рассмотрена подробно и обстоятельно. В том числе качественно рассмотрен вопрос потенциального эффекта от использования данных стоков, как источника энергии. Оценка теплового потенциала хозяйственно-бытовых сточных вод, доступного для полезного использования, на примере конкретного населенного пункта представлена в публикации Бежана А.В. [6]. В исследовании Кологривых А.С. и Семиненко А.С. приводятся данные об объёме образующихся сточных вод в разных федеральных округах нашей страны, температуре стоков в разных местах канализационной сети (в месте образования, в выпусках многоквартирных домов, канализационно-насосных станциях, водоочистных сооружениях), определяется энергосодержание потока сточных вод, образующихся от отдельного многоквартирного дома [7]. В работе Андрианова А.П. и Грибкова А.Н. определяется средняя температура сточных вод, поступающих на очистные сооружения, и определяется потенциальный энергетический эффект от использования данных стоков на станциях с тепловыми насосными установками в качестве источника низкопотенциальной теплоты [8]. В работе коллектива авторов Васильева Г.П., Дмитриева А.Н., Абуева И.М. и Юрченко И.А. сделан вывод, что в г. Москве при широком внедрении утилизации теплоты сточных вод есть возможность ежегодно экономить более 250 млн. м^3 природного газа [9]. В работе коллектива авторов Юсупова Р.Д., Зиганшина Ш.Г., Политовой Т.О. и Базуковой Э.Р.

рассматривается способ обеспечения нужд горячего водоснабжения путём использования солнечной энергии и приводится расчет необходимого количества теплоты для реализации данного мероприятия [10].

В работах зарубежных авторов также подробно исследуется проблема полезного использования теплоты сточных вод. В публикациях коллектива авторов Sadegh Shahmohammadi, Zoran Steinmann, Henry King, Hilde Hendrickx и Mark A.J. Huijbregts приводятся данные о средней длительности использования душевой, количестве использований душевой за расчетный период, массовом расходе воды в душевой и на основе представленных данных определяется доступное количество теплоты при утилизации хозяйственно-бытовых стоков [11]. Коллектив авторов Meireles I., Sousa V., Bleys B. и Poncelet B. в своём исследовании приводят данные о количестве сточных вод, генерируемых среднестатистическим домохозяйством [12]. В публикации ученых Amanda N. Binks, Steven J. Kenway и Paul A. Lant определяется необходимое количество энергии для обеспечения отдельного домохозяйства горячим водоснабжением и предлагается способ управления данным параметром [13]. В публикации исследователей Vitor Sousa, Cristina Matos Silva и Ines Meireles приводятся данные об энергетическом эффекте, полученном после реализации комплекса энергосберегающих мероприятий (в том числе и повторного использования теплоты сточных вод) в системе водоснабжения общественного здания [14]. Коллектив авторов Skai Edwards, Ian Beausoleil-Morrison и Andre Laperriere представил результаты работы по определению закономерностей в использовании сетей горячего водоснабжения среднестатистическим домохозяйством с целью расчета суммарного энергетического потенциала образующихся стоков, доступного для полезного использования [15]. Коллектив авторов Merida Garcia A., Rodriguez Diaz J.A., Garcia Morillo J. и McNabola A. в своей работе представляют данные о потенциальном энергетическом и экономическом эффекте от рекуперации сточных вод в Испании [16]. Исследователи Djordje Mitrovic, Miguel Crespo Chacon, Aida Merida Garcia, Jorge Garcia Morillo, Juan Antonio Rodriguez Diaz, Helena M. Ramos, Kemi Adeyeye, Armando Carravetta и Aonghus McNabola представили результаты межстрановой оценки потенциального эффекта от рекуперации хозяйственно-бытовых сточных вод: на основе данных, собранных в Ирландии, Северной Ирландии, Шотландии, Уэльсе, Испании и Португалии, определена возможность уменьшения необходимого количества энергии для работы сетей горячего водоснабжения на 6-13 % [17]. Ученые Ziwen Liu, Qingxu Huang, Chunyang He и Changbo Wang в научной публикации представляют результаты работы по определению энергопотребления объектов из различных отраслей промышленности в городской агломерации [18]. Коллектив авторов Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. и Zhang C. анализирует энергетический эффект от использования инновационных способов производства горячей воды, её распределения и циркуляции [19].

Данная публикация подготовлена в рамках работы над диссертацией на соискание ученой степени кандидата наук по научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки). В рамках научно-исследовательской работы решается комплекс задач: разработка математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменнике и её верификация на основе экспериментального испытания (физической модели); исследование влияния изменения геометрических и режимных параметров теплообменного аппарата на эффективность утилизации тепловой энергии сточных вод; оценка эффективности и технико-экономическая оценка применения утилизационного ТОА в рамках системы горячего водоснабжения отдельного здания; разработка на основе полученных результатов исследования инженерной методики проектирования теплообменного устройства для утилизации теплоты сточных вод.

Целью научно-исследовательской работы (диссертации) является решение комплексных задач повышения эффективности систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты сточных вод, оценка энергетической эффективности от применения утилизационного теплообменного аппарата в сетях ГВС; проведение теоретических и экспериментальных исследований для разработки методики проектирования утилизационных теплообменных аппаратов с оптимальными характеристиками для конкретных условий эксплуатации.

Научная значимость исследования состоит в разработанной верифицированной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате; получении закономерностей, описывающих влияние геометрических, теплофизических и режимных параметров ТОА на количество полезно утилизированной тепловой энергии отдельным теплообменным устройством; получении данных о количестве тепловой энергии в системе горячего водоснабжения конкретного объекта теплоснабжения, доступной для

полезного использования путём утилизации теплоты сточных вод на основе утилизационных теплообменных аппаратов.

Теоретическая значимость заключается в разработке и обосновании расчетно-экспериментальной методики на базе использования разработанной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате; оценке потенциального эффекта от внедрения локальной утилизации теплоты сточных вод на конкретном объекте теплопотребления.

Практическая значимость исследования состоит в разработке программного обеспечения для автоматического расчета энергетического, экономического и экологического эффекта при утилизации стоков в душевых жилого здания и формулировании рекомендаций для совершенствования систем горячего водоснабжения на основе локальной утилизации теплоты стоков.

В рамках данной статьи описывается результат, полученный при определении эффективности утилизации тепловой энергии сточных вод: потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта, доступного при интеграции утилизационного ТОА в сети ГВС в рамках конкретного объекта теплопотребления.

Целью данной публикации является определение потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от использования локальной утилизации теплоты сточных вод, отводимых от душевых, в рамках отдельного жилого здания в России. **Научная значимость** данной публикации состоит в расчете потенциального эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод на основе теплообменного аппарата (энергетический, экономический и экологический эффект) при конкретных условиях эксплуатации объекта теплоснабжения. **Теоретическая значимость** данной публикации состоит в расчете потенциального эффекта от использования утилизационных ТОА для отбора теплоты сточных вод и анализе факторов, влияющих на распространенность данного способа рекуперации теплоты сточных вод в топливно-энергетическом комплексе России. **Практическая значимость** данной публикации состоит в представленном алгоритме расчета эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод, который планируется использовать при создании программного обеспечения для автоматического расчета потенциального энергетического, экономического и экологического эффекта от реализации энергосберегающего мероприятия на конкретном объекте теплоснабжения.

Материалы и методы *(Materials and methods)*

В работе используются следующие методы научного исследования: математическое моделирование теплопередачи в утилизационном ТОА с заданными параметрами и при расчетных условиях работы; абстрагирование (упрощение реальной структуры теплопотребления отдельным жилым зданием в течение года и использование допущений в отношении данных о работе душевых); анализ и сравнение полученных расчетным путем значений потенциального эффекта от энергосберегающего мероприятия.

На основе математического моделирования исследуется процесс теплопередачи в ТОА при разных условиях эксплуатации. Результатом расчета является распределение температуры (функция температуры $T_2(x;\tau)$) внутри нагреваемого потока воды в пространстве и времени (рис. 2 и рис. 3). На основе полученных данных о температуре нагреваемой воды на выходе из ТОА определяется количество полезно утилизированной тепловой энергии, отобранной от сточных вод. Далее, данный энергетический эффект экстраполируется на теплопотребление всех душевых в жилом здании.

Достоверная информация о среднем теплопотреблении жилого здания в разных климатических зонах России отсутствует. Для расчета брались данные из открытых источников:

- о среднем теплопотреблении жилых зданий, построенных по типовым проектам, в городе Москве (в расчете на один 1 м^2 полезной площади) [20];
- о доле тепловой энергии, расходуемой на нужды ГВС, относительно всего теплопотребления жилого здания.

Также, из опубликованных работ были взяты данные о среднем массовом расходе, при котором используются водоразборные устройства в душевых, и длительности отдельного использования душевой [11].

Данные, использующиеся для математического моделирования, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Параметры для расчета
Parameters for calculation

Параметр	Расчетное значение параметра
Длина труб в ТОА, м	2
Количество труб, шт	10
Диаметр трубы, $d_{вн}$ / $d_{н}$, м	0,021 / 0,024
Габариты корпуса ТОА (длина, ширина, высота), м	2 / 0,3 / 0,15
Расчетная площадь поверхности теплообмена, м^2	1,15
Массовый расход греющей и нагреваемой среды, G, кг/с	0,14
Температура нагреваемой среды на входе в ТОА, $t_х$,°С	5; 15
Температура греющей среды (сточной воды) на входе в ТОА, $t_г$,°С	40
Температура потоков сред в начальный момент времени $T(x,0)$	20
Длительность отдельного использования душевой, τ_0, с	420
Среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 м^2 полезной площади в жилом здании, w, Гкал/м^2	0,214
Длительность периода с температурой холодной воды на входе в ТОА $t_х$ = 5 °С в течение года, месяц	6
Длительность периода с температурой холодной воды на входе в ТОА $t_х$ = 15 °С в течение года, месяц	6
Количество тепловой энергии, расходуемое на нужды ГВС, от общего теплопотребления здания за год, %	25

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

***Результаты** (Results)*

Энергетический эффект. На рисунке 2 и рисунке 3 представлены распределения температуры внутри потока нагреваемой среды при значениях температуры $t_х$=5 °С и $t_х$=15 °С на входе в ТОА в разные моменты времени после включения теплообменника (после начала работы душевой), полученные на основе верифицированной математической модели теплопередачи в утилизационном теплообменном аппарате [4]. Температура холодной воды в летний и зимний сезон разная, а греющая вода в течение года имеет постоянную температуру $t_г$ = 40 °С. Из-за этого энергетический эффект от утилизации сточных вод будет зависеть от времени года и это также необходимо учитывать.

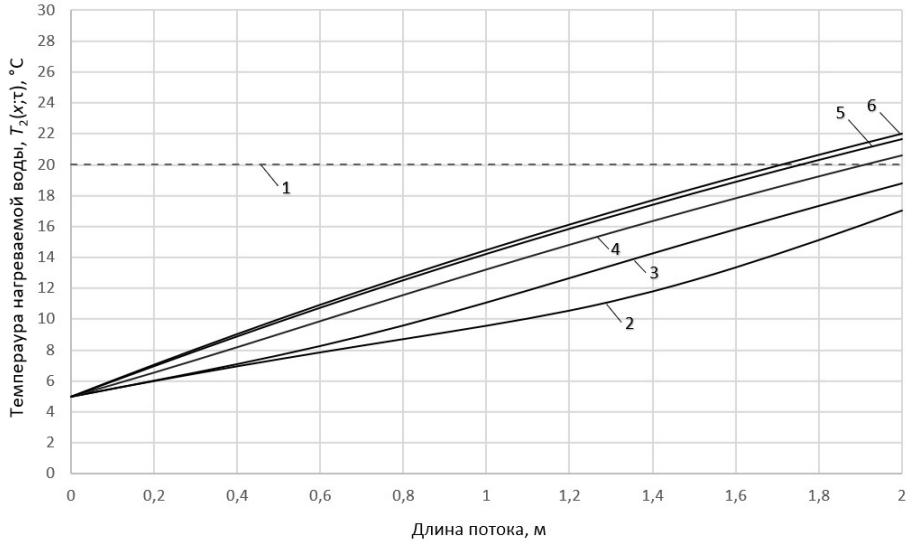


Рис. 2. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОА, где 1 – τ = 0 с; 2 – τ = 60 с; 3 – τ = 120 с; 4 – τ = 180 с; 5 – τ = 240 с; 6 – τ = 300 с

Fig. 2. Temperature distribution inside the flow of the heated flow water at different times after the start of the heat exchange device operation, where 1 – τ = 0 s; 2 – τ = 60 s; 3 – τ = 120 s; 4 – τ = 180 s; 5 – τ = 240 s; 6 – τ = 300 s

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

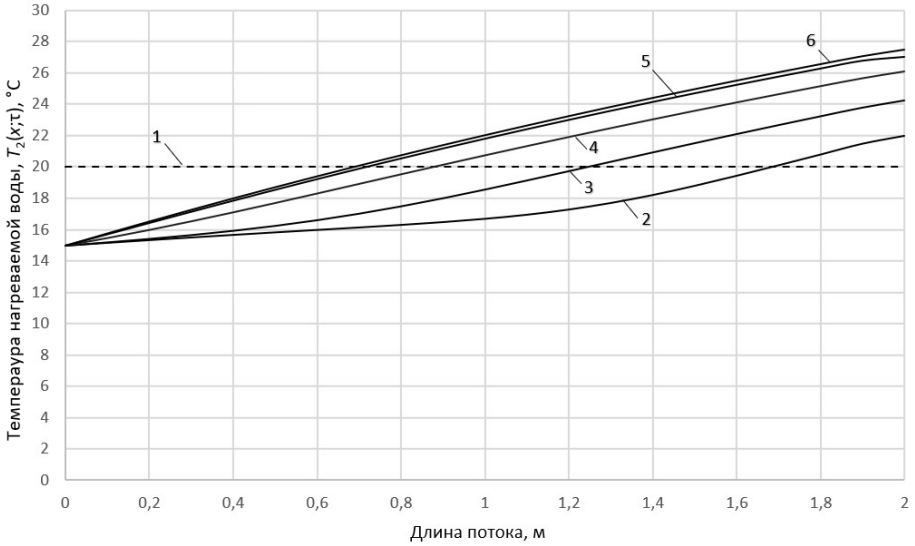


Рис. 3. Распределение температуры внутри потока нагреваемой среды в разные моменты времени после начала работы ТОА, где 1 – τ = 0 с; 2 – τ = 60 с; 3 – τ = 120 с; 4 – τ = 180 с; 5 – τ = 240 с; 6 – τ = 300 с

Fig. 3. Temperature distribution inside the flow of the heated flow water at different times after the start of the heat exchange device operation, where 1 – τ = 0 s; 2 – τ = 60 s; 3 – τ = 120 s; 4 – τ = 180 s; 5 – τ = 240 s; 6 – τ = 300 s

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

Из графиков на рисунке 2 и рисунке 3 видно, что теплообменник с заданными характеристиками достигает условно стационарного теплового режима работы в интервале от 180 до 240 секунд после включения (после начала работы душевой).

При децентрализованной системе ГВС общее количество тепловой энергии, необходимое для работы душевой в течение 7 минут, определяется по формуле:

$$Q = G \cdot \tau_0 \cdot c_p \cdot \left(t_г - t_x\right), \quad (1)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $t_г$ = 40 – температура нагреваемой воды (на выходе из водонагревателя), °С; $t_х$ – температура нагреваемой воды на входе в водонагреватель, °С; τ_0=7·60=420 – длительность отдельного использования душа, с; c_p – теплоемкость воды, Дж/(кг·К).

На основе полученных данных о температуре нагреваемой воды на выходе из ТОА во времени (рис. 2 и рис. 3) определяется мощность теплообменного аппарата в каждый момент времени τ по формуле:

$$Q(\tau) = G \cdot c_p \left(T_2''(\tau) - t_x\right), \quad (2)$$

где G – массовый расход нагреваемой среды в теплообменном аппарате, кг/с; c_p – теплоемкость воды Дж/(кг·К); $T_2''(\tau)$– температура нагреваемой воды на выходе из теплообменного аппарата в момент времени τ, °С; $t_х$ – температура нагреваемой воды на входе в теплообменный аппарат, °С.

При длительности использования душевой τ_0 количество полезно утилизированной теплоты, идущей на нагрев холодной воды, определяется на основе значения мощности ТОА в каждый момент времени его работы (2) согласно выражению:

$$\Delta Q = \int_0^{\tau_0} Q(\tau)\, d\tau, \quad (3)$$

где $Q(\tau)$ – мощность ТОА в момент времени τ, Вт; τ_0 – длительность отдельного использования душевой, с.

Средняя мощность ТОА во время использования душевой определяется по выражению $\overline{Q}$ = ($\Delta Q/\tau_0$), Вт.

Относительное снижение требуемой тепловой энергии для разового приема душа при использовании теплообменного аппарата определяется согласно выражению: $\varphi=(\Delta Q/Q)\cdot 100\%$.

Относительная экономия в таком случае в зимний период составит φ=44,8 %, а в летний φ=41,8 %. Но в абсолютных значениях экономия теплоты за отдельное использование душевой в зимний период составит 3877 кДж, а в летний 2521 кДж. Так как длительность летнего и зимнего периода в представленном расчете одинаковы, то

вычислим общее относительное снижение необходимой тепловой энергии за весь год, как среднее арифметическое между экономией в зимний и летний период, то есть φ` ≈ 43 %.

При централизованной системе ГВС в зимний период для получения 1 м^3 воды комфортной температуры $t_г$ = 40 °С необходимо 0,64 м^3 горячей воды (с температурой 60 °С) и 0,36 м^3 холодной воды (с температурой 5 °С), а в летний период 0,56 м^3 горячей воды и 0,44 м^3 холодной воды.

В централизованной системе ГВС при использовании локальной утилизации теплоты стоков от душевых в зимний период необходимое количество горячей воды снизится до 0,49 м^3, а в летний период снизится до 0,42 м^3. Относительное снижение необходимой горячей воды составляет в обоих случаях φ`` ≈ 25%.

Согласно имеющимся данным среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 м^2 полезной площади в жилом здании составляет 0,214 Гкал/м^2. Принято считать, что на нужды ГВС приходится 25% от общего теплопотребления. Допустим, что на использование душа приходится половина от всей нагрузки на ГВС в жилом здании, то есть $Q_{душ}$ = 12,5% от общего теплопотребления.

Используя имеющиеся данные, определим количество теплоты, доступное к полезному использованию при локальной утилизации стоков от душевых в жилом здании с децентрализованной системой ГВС. Для расчета возьмем жилое здание, в котором находится N=100 квартир со средней площадью каждой f=55 м^2. Среднегодовое теплопотребление такого объекта составит:

$$W = w \cdot f \cdot N, \tag{4}$$

где w – среднее значение удельного потребления тепловой энергии на 1 м^2 полезной площади в жилом здании, w, Гкал/м^2; f – средняя расчетная площадь квартиры, м^2; N – расчетное количество квартир в жилом здании, шт;

Энергетический эффект от локальной утилизации стоков от душевых в жилом здании с децентрализованной системой ГВС составит:

$$E' = W \cdot Q_{душ} \cdot \varphi', \tag{5}$$

где W – расчетное среднегодовое теплопотребление жилого здания, Гкал; φ` ≈ 43 % - относительное снижение необходимого количества тепловой энергии на нагрев воды для душа при децентрализованной системе ГВС, %; $Q_{душ}$ = 12,5 % - доля тепловой энергии, расходуемая на использование душевых, в рамках всего теплопотребления жилого здания, %.

В соответствии с представленным расчетом абсолютная экономия тепловой энергии в год составит E` = 64 Гкал, а относительное снижение необходимой тепловой энергии в рамках общего теплопотребления здания составит 0,43·12,5% = 5,4 %.

При централизованном ГВС локальная утилизация теплоты стоков позволяет уменьшить на 25% количество необходимой горячей воды и, соответственно, получить такой же размер экономии тепловой энергии.

Энергетический эффект от локальной утилизации стоков в жилом здании с централизованной системой ГВС определяется согласно выражению:

$$E'' = W \cdot \varphi'' \cdot Q_{душ}, \tag{6}$$

где W – расчетное среднегодовое теплопотребление жилого здания, Гкал; φ`` ≈ 25 % - относительное снижение необходимого количества тепловой энергии на нагрев воды для душа при централизованной системе ГВС, %; $Q_{душ}$ = 12,5 % - доля тепловой энергии, расходуемая на использование душевых, в рамках всего теплопотребления жилого здания, %.

При централизованной системе ГВС абсолютная экономия тепловой энергии в год составит E`` = 37 Гкал, а относительное снижение тепловой энергии в рамках общего теплопотребления здания составит 0,25·12,5% = 3,1 %.

Экономический эффект. Выгодополучателем при использовании локальной утилизации теплоты сточных вод является отдельное домохозяйство. Экономический эффект в данном случае выражается через экономию денежных средств, расходуемых на оплату тепловой энергии для нагрева воды. Для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС экономия денежных средств составит φ`≈ 43% и φ``≈ 25 % соответственно.

Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия предлагается в данном конкретном случае определять не через время, а через количество отдельных использований душевой с заданными параметрами.

Капитальные затраты на реализацию энергосберегающего мероприятия определяются по формуле:

$$c = k_1 + k_2 + k_3 + k_4, \quad (7)$$

где k_1 – стоимость материалов для создания ТОА, руб.; k_2 – стоимость монтажных работ по сборке и установке утилизационного ТОА, руб.; k_3 – стоимость транспортных услуг, руб.; k_4 – стоимость пуско-наладочных работ, руб.

Количество приемов душа, необходимое для того, чтобы окупить капитальные затраты на энергосберегающее мероприятие, определено по формуле:

$$n = \frac{c}{Q \cdot \varphi \cdot m}, \quad (8)$$

где Q – количество тепловой энергии, необходимое для нагрева воды в рамках разового использования душа, Дж; где φ – относительная экономия тепловой энергии, %; c – капитальные затраты на энергосберегающее мероприятие, руб; m – стоимость 1 Дж тепловой или электрической энергии, руб/Дж.

Рассмотрим количество использований душевой, необходимое для окупаемости энергосберегающего мероприятия при трех разных способах обеспечения горячего водоснабжения в многоквартирном жилом здании:

- децентрализованная система ГВС с газовым проточным водонагревателем;
- децентрализованная система ГВС с электрическим проточным водонагревателем;
- централизованная система ГВС.

Согласно формуле (1), среднее количество тепловой энергии в течение года для отдельного использования душевой составляет 7408 кДж. Стоимость отдельного использования душевой при использовании газового водонагревателя составляет 1,55 руб. (при тарифе на природный газ 6,31 руб/м^3); при использовании электрического водонагревателя стоимость использования душевой составляет 10 руб. (при тарифе 5 руб/кВт·ч); при централизованном обеспечении ГВС стоимость использования душевой составила 4,58 руб (при тарифе на горячее водоснабжение 130 руб/м^3).

Рассмотрим срок окупаемости при разной конфигурации теплообменника (при разном количестве трубок с нагреваемой средой). От данного параметра зависит энергетическая эффективность работы устройства и, следовательно, относительная экономия тепловой энергии φ.

Результаты расчета по формуле (8) для разного количества используемых трубок в ТОА представлены на рисунке 4.

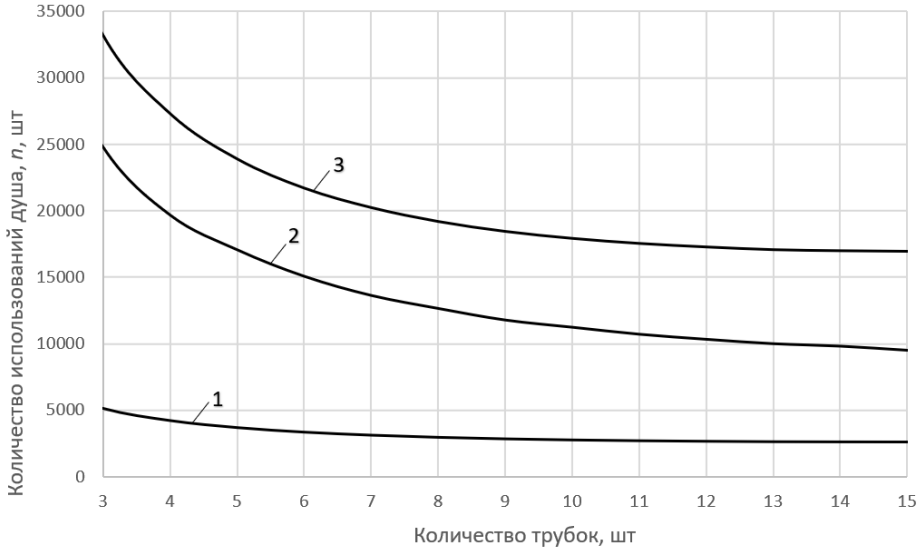


Рис. 4. Количество приемов душа, необходимое для того, чтобы окупить капитальные затраты на реализацию энергосберегающего мероприятия, где 1 – график, полученный для децентрализованной системы ГВС с проточным электрическим водонагревателем; 2 – график, полученный для централизованной системы ГВС; 3 – график, полученный для децентрализованной системой ГВС с проточным газовым водонагревателем

Fig. 4. The number of showers required to recoup the capital costs of implementing an energy-saving measure, where 1 – graph obtained for a decentralized hot water system with a flow-through electric water heater; 2 – graph obtained for a centralized hot water supply system; 3 – graph obtained for a decentralized hot water system with a flow-through gas water heater

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

Экологический эффект от локальной утилизации теплоты сточных вод, отводимых от душевых устройств, в жилом доме также предлагается рассчитать на основе использованного ранее примера – здание с количеством квартир N=100, со средней площадью каждой квартиры f=55 м^2 и заданной конфигурацией теплообменного аппарата (параметры для расчета, представленные в таблице). Среднегодовое теплопотребление такого объекта, согласно формуле (4), составит W = 1177 Гкал. А экономия теплоты в абсолютных величинах составила: для децентрализованной системы ГВС $E`$ = 64 Гкал, а для централизованной $E``$ = 37 Гкал.

При пересчете сэкономленного количества теплоты в тонны условного топлива определяется экономия: в здании с децентрализованной системой ГВС сэкономлено 9145 т.у.т., а в здании с централизованной системой ГВС 5287 т.у.т.

Данное количество тонн условного топлива (9145 и 5287) соответствует примерно такому же количеству каменного угля, а также соответствует объёму природного газа в размере 7925 тыс. м^3 и 4581 тыс. м^3.

Определим значение CO_2-эквивалента для полученных значений сэкономленного топлива. При переводном коэффициенте 2,76 для каменного угля количество CO_2-эквивалента составит 25,2 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 14,6 тыс. тонн для здания с централизованной системой ГВС. При переводном коэффициенте 1,59 для природного газа количество CO_2-эквивалента составит 14,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 8,5 тыс. тонн для здания с централизованной системой ГВС. Именно на такое количество CO_2-эквивалента потенциально можно снизить выбросы от теплоснабжения жилого здания с заданными характеристиками.

***Обсуждение** (Discussions)*

Для качественной оценки энергетического эффекта от реализации локальной утилизации теплоты сточных вод в жилом здании необходимо знать точное количество тепловой энергии, расходуемое на нужды ГВС. Относительное значение расходуемой тепловой энергии на горячее водоснабжение в общей структуре теплопотребления здания будет изменяться в зависимости от климатической зоны, но абсолютное значение этой нагрузки, вероятно, будет постоянным для каждого жилого здания в нашей стране (с учетом количества жильцов). Для России нет статистических данных о среднем количестве отдельных использований душевой человеком в течение суток, длительности этих использований и среднем массовом расходе воды в душе.

При расчете потенциального эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод в жилых зданиях в рамках отдельного населенного пункта или его части можно использовать данные, имеющиеся у теплоснабжающих предприятий относительно конкретных объектов теплоснабжения, управляющих компаний или непосредственно у собственника объекта теплоснабжения (в случае использования отдельных источников теплоснабжения для конкретного здания или индивидуальных поквартирных источников).

Также, для качественного определения энергетического эффекта важно учитывать влияние периода работы утилизационного ТОА при нестационарном тепловом режиме. Для каждого конкретного случая необходимо определять тепловую инерцию устройства (время, необходимое для достижения теплообменником стационарного теплового режима). В противном случае вероятно возникновение ситуации, при котором устройство никогда не достигает установившегося теплового режима, то есть не достигает максимальной располагаемой мощности (использование избыточного количества теплообменной площади), или используется нерационально малое количество площади теплообмена. Это может случаться при некорректном выборе параметров теплообменника или неверном определении условий эксплуатации водоразборного устройства.

Интересным для обсуждения вопросом является определение энергетического эффекта от локальной утилизации теплоты стоков от душевых в общественных зданиях и в бытовых помещениях промышленных предприятий. На основе имеющейся информации можно предположить, что эффективно использовать данный способ рекуперации теплоты стоков в общественных зданиях с регулярно использующимися душевыми (спортивные учреждения, общественные бани) или в душевых на промышленных объектах. Главное требование для расчета потенциального эффекта и проектирования устройства с оптимальными параметрами – это возможность определить режим работы водоразборных устройств на объекте (количество использований за расчетный период, длительность отдельного использования, массовый расход и т.д.) [5].

Для нашей страны при обсуждении локальной утилизации теплоты сточных вод экономический эффект занимает важное место, так как реализация данного способа на сегодняшний день является исключительно инициативой непосредственного пользователя

водоразборного устройства и производиться она будет в большинстве случаев с целью экономии денежных средств. На рис. 4 явно видно, что наименьшее необходимое количество использований душевой для того, чтобы окупить энергосберегающее мероприятие, прогнозируется при использовании электрической энергии для нагрева воды в децентрализованной системе ГВС. Для используемой в расчете конфигурации ТОА данное количество составляет $n \approx 2500$ использований. При использовании данного способа в централизованной системе ГВС и в децентрализованной системе с газовым водонагревателем необходимое количество использований составляет $n \approx 11000$ и $n \approx 18000$ соответственно. Для определения срока окупаемости в каждом конкретном случае необходимо знать, какое количество использований душевой происходит за расчетный период.

Допустим, что в квартире в течение каждых суток душевая используется четыре раза. Тогда при децентрализованном ГВС на основе электрической энергии период окупаемости составит примерно 1,5 года, при централизованном горячем водоснабжении 7,5 лет и при децентрализованной системе на основе газового водонагревателя 12 лет.

Можно сделать вывод, что для потребителей с централизованным и индивидуальным горячим водоснабжением на основе газового водонагревателя данное энергосберегающее мероприятие не является привлекательной инвестицией. Причиной этого является совокупность факторов: низкая цена на тепловую энергию, отсутствие стимулирующих факторов за проведение энергосберегающей политики частными лицами, организационные и материальны издержки при сравнительно большом сроке окупаемости.

Потенциальный экологический эффект от локальной утилизации теплоты стоков в душевых жилых домов существенен, но без привлекательной стимулирующей политики у пользователя водоразборного устройства отсутствует стремление проводить энергосберегающие мероприятия при актуальных ценах на тепловую энергию. Энергоснабжающие организации также не заинтересованы в проведении политики бережного использования ресурсов на стороне потребителя вплоть до возникновения конфликта интересов. Единственным источником поддерживающей политики в сторону подобных инициатив на данный момент представляется власть разного уровня.

Интересным для обсуждения является вопрос социального эффекта от рекуперации теплоты сточных вод в душевой. Предполагается, что снижение необходимого количества тепловой энергии для теплоснабжения здания стимулирует строительство в зонах, где единственным источником теплоты является электрическая энергия или цена на тепловую энергию сравнительно высока. При внедрении ресурсосберегающих технологий в систему отопления, вентиляции, горячего и холодного водоснабжения проживание на таких территориях становится более доступным с материальной точки зрения. Подобное влияние сложно отследить, проанализировать и рассчитать эффект, но мировой опыт использования локальной утилизации стоков показывает, что данная технология находит практическое применение при существовании вышеуказанных условий.

Выводы *(Conclusions)*

1. Получены данные о потенциальном энергетическом эффекте от локальной утилизации теплоты сточных вод в душевой для жилого здания с заданными параметрами. Относительная экономия тепловой энергии в рамках годового теплопотребления здания с децентрализованной системой ГВС составила 5,3 %, а для здания с централизованной системой ГВС составила 3,1 %. В абсолютных значениях экономия тепловой энергии составила для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС $E`$ = 64 Гкал и $E``$ = 37 Гкал соответственно.

2. Определена экономия денежных средств для оплаты тепловой энергии на нужды ГВС при использовании локальной утилизации теплоты сточных вод в душевых: 43% и 25% для децентрализованных и централизованных систем ГВС соответственно.

3. Срок окупаемости энергосберегающего мероприятия для рассматриваемого случая (условий эксплуатации теплообменника и его конфигурации) составит: 1,5 года при децентрализованном горячем водоснабжении на основе электрического проточного водонагревателя; 7,5 лет при централизованной системе ГВС; 12 лет при децентрализованной системе ГВС на основе газового проточного водонагревателя.

4. Определена экономия топлива для жилого здания с заданными параметрами: 9145 т.у.т. и 5227 т.у.т. для здания с децентрализованной и централизованной системой ГВС соответственно.

5. Определено количество CO_2-эквивалента для сэкономленного количества топлива. При использовании каменного угля количество CO_2-эквивалента составит 25,2 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 14,6 тыс. тонн для здания с

децентрализованной системой ГВС. Для природного газа количество CO_2-эквивалента составит 14,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС и 8,5 тыс. тонн для здания с децентрализованной системой ГВС.

6. Для более точного и полного расчета эффекта от локальной утилизации теплоты сточных вод в рамках конкретного объекта теплоснабжения в нашей стране необходимы корректные статистические данные о поведении непосредственных пользователей сетей ГВС в России.

Литература

1. Королев В. И., Зверева Э.Р. Российский опыт применения отходов химводоподготовки в хозяйственной деятельности: перспективы использования при обработке осадков сточных вод (обзорная статья) // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 6. С. 47-62.

2. Куницкий В. А., Лукин С.В. Исследование нестационарных режимов работы утилизационного теплообменного устройства на основе математического моделирования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 4(56). С. 69-79.

3. Куницкий В.А., Лукин С.В. Устройство для утилизации теплоты сточных вод, образующихся при использовании душевой. Патент РФ на полезную модель №223347. 14.02.2024. Бюл. №5. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=223347&TypeFile=html. Ссылка активна на 9 апреля 2024.

4. Куницкий В. А., Лукин С.В. Верификация нестационарной математической модели тепловой работы утилизационного теплообменного аппарата на основе экспериментального испытания // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2023. Т. 15. № 3(59). С. 57-69.

5. Soloveva O., Solovev S., Kunitsky V. et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. Vol. 458.

6. Бежан А.В. Оценка потенциала тепла сточных вод в многоквартирных жилых зданиях (на примере города Апатиты) // Труды Кольского научного центра РАН. 2013. №2(15). С. 33-40.

7. Кологривых А.С., Семиненко А.С. Тепловой потенциал канализационных стоков // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 7. Ч.2. С. 57-58.

8. Андрианов А.П., Грибков А.Н. Использование тепловой энергии сточных вод // Инженерный Вестник Дона. 2023. №7.

9. Васильев Г.П., Дмитриев А.Н., Абуев И.М. и др. Утилизация теплоты сточных вод многоквартирных жилых домов // ЭНЕРГИЯ: ЭКОНОМИКА, ТЕХНИКА, ЭКОЛОГИЯ. 2013. № 8. С. 44-48.

10. Юсупов Р.Д., Зиганшин Ш.Г., Политова Т.О. и др. Применение солнечной энергии для нужд горячего водоснабжения в городе Казань // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 2(54). С. 48-58.

11. Shahmohammadi S., Steinmann Z., King H. et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering // Journal of Industrial Ecology. 2019. Vol. 23, N5. pp. 1186-1195.

12. Meireles I., Sousa V., Bleys B. et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 157.

13. Binks A.N., Kenway S.J., Lant P.A. The effect of water demand management in showers on household energy use // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 157. pp. 177-189.

14. Sousa V., Silva C.M., Meireles I. Performance of water efficiency measures in commercial buildings // Resources, Conservation and Recycling. 2019. Vol. 143. pp. 251-259.

15. Edwards S., Beausoleil-Morrison I., Laperriere A. Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems // Solar Energy. 2015. Vol. 111. pp. 43-52.

16. Garcia M. A., Diaz R.J.A., Morillo G.J. et al. Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain // Water. 2021. Vol. 13, N5.

17. Mitrovic D., Chacon M.C., Garcia A.M. et al. Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU // Water. 2021. Vol. 13, N7.

18. Liu Z., Huang Q., He C. et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy // Resources, Conservation and Recycling. 2021. Vol. 164.

19. Pomianowski M.Z., Johra H., Marszal-Pomianowska A. et al Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 128.

20. Анализ потребления тепловой энергии на отопление многоквартирных домов, как способ повышения энергоэффективности в сфере ЖКХ [Электр. текст]. Аналитический центр при Правительстве РФ. Режим доступа: https://ac.gov.ru/files/content/1290/16-12-13-analitika-zkh-3-pdf.pdf. Дата обращения: 09.04.2024.

Авторы публикации

Лукин Сергей Владимирович – докт. техн. наук, профессор кафедры теплогазоводоснабжения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», s.v.luk@yandex.ru

Куницкий Вячеслав Андреевич – старший преподаватель и аспирант кафедры теплогазоводоснабжения, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», globee@mail.ru

References

1. Korolev VI, Zvereva ER. Russian experience in the use of chemical water treatment waste in economic activity: prospects for use in the treatment of sewage sludge (review article). *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(6):47-62. (In Russ.) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-47-62

2. Kunitskiy VA, Lukin SV. Research of non-stationary operation modes of utilization heat exchanger on the basis of mathematical modeling. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14(55):69-79. (In Russ.)

3. Kunitskiy VA, Lukin SV. Ustroystvo dlya utilizatsii teploty stochnykh vod, obrazuyushchikhsya pri ispol'zovanii dushevoy. Patent RUS №223347. 14.02.2024. Byul. №5. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=223347&TypeFile=html. Accessed: 08 Apr 2024. (In Russ).

4. Kunitskii VA, Lukin SV. Verification of the non-stationary mathematical model of the utilization heat exchanger thermal operation by experimental testing. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN.* 2023; 15; 3(59). 57-69. (In Russ).

5. Soloveva O, Solovev S, Kunitsky V, et al. Determination of the optimal heat exchanger configuration for wastewater heat recovery // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2023); 9-13 October 2023; Voronezh, Russia. (458). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345801024

6. Bezhan AV. Assessing the potential of sewage heat in apartment buildings (for example Apatity). *Transactions Kola Science Centre*. 2013; 2(15):33-40. (In Russ.)

7. Kologrivykh AS, Seminenko AS. Teplovoy potentsial kanalizatsionnykh stokov // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014;7 (Pt 2):57-58. (In Russ).

8. Andrianov AP, Gribkov AN. Ispol'zovanie teplovoy energii stochnykh vod // Inzhenernyy Vestnik Dona. 2023; 7. (In Russ).

9. Vasilev GP, Dmitriev AN, Abuev IM, et al. Utilizatsiya teploty stochnykh vod mnogokvartirnykh zhilykh domov // ENERGIYA: EKONOMIKA, TEKHNIKA, EKOLOGIYA. 2013; 8:44-48. (In Russ).

10. Yusupov RD, Ziganshin SG, Politova TO, et al. Application of solar energy for the needs of hot water supply in the city of Kazan. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN*. 2022; 14; 2(54):48-58. (In Russ.)

11. Shahmohammadi S, Steinmann Z, King H, et al. The influence of consumer behavior on energy, greenhouse gas and water footprints of showering. *Journal of Industrial Ecology*. 2019. 23(5):1186-1195. https://doi.org/10.1111/jiec.12858

12. Meireles I, Sousa V, Bleys B, et al. Domestic hot water consumption pattern: Relation with total water consumption and air temperature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2022; 157. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112035.

13. Binks AN, Kenway SJ, Lant PA. The effect of water demand management in showers on household energy use. *Journal of Cleaner Production.* 2017; 157:177-189. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.128

14. Sousa V, Silva CM, Meireles I. Performance of water efficiency measures in commercial buildings. *Resources, Conservation and Recycling.* 2019; 143:251-259. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.013

15. Edwards S, Beausoleil-Morrison I, Laperriere A. Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems. *Solar Energy.* 2015; 111:43-52. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.026

16. Garcia MA, Diaz RJA, Morillo GJ et al. Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain. *Water.* 2021; 13(5). https://doi.org/10.3390/w13050691

17. Mitrovic D, Chacon MC, Garcia AM et al. Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU. *Water*. 2021; 13(7). https://doi.org/10.3390/w13070899

18. Liu Z, Huang Q, He C et al. Water-energy nexus within urban agglomeration: An assessment framework combining the multiregional input-output model, virtual water, and embodied energy. *Resources, Conservation and Recycling.* 2021; 164. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105113

19. Pomianowski MZ, Johra H, Marszal-Pomianowska A et al. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2020; (128). https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900

20. Analiz potrebleniya teplovoy energii na otoplenie mnogokvartirnykh domov, kak sposob povysheniya energoeffektivnosti v sfere ZhKKh [Electronic resource]. Analytical center for the government of the Russian Federation. Available at: https://ac.gov.ru/files/content/1290/16-12-13-analitika-zkh-3-pdf.pdf. Accessed: 09 Apr 2024. (In Russ).

Authors of the publication

Sergey V. Lukin **–** Vologda State University, Vologda, Russia. ORCID*: http://orcid.org/0000-0002-3002-1078. s.v.luk@yandex.ru

Vyacheslav A. Kunitskiy **–** Vologda State University, Vologda, Russia. globee@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено ***09.04.2024 г.***

Отредактировано ***02.05.2024 г.***

Принято ***19.06.2024 г.***

© Щинников П.А., Садкин И.С., Боруш О.В., Романенко Р.В.

(cc) BY

УДК 621.311 **DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-4-150-159**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ CO_2-ЦИКЛОВ ПРИ КИСЛОРОДНОМ СЖИГАНИИ МЕТАНОЛА

Щинников П.А., Садкин И.С., Боруш О.В., Романенко Р.В.

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия
shchinnikov@corp.nstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ работы заключается в определении массо-расходных характеристик рабочих веществ и энергетических показателей установки на основе CO_2-цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама) при кислородном сжигании метанола. МЕТОДЫ. Представлена методика, в которой массо-расходные характеристики рабочих веществ определяют на основе реакций горения и синтеза метанола и электролиза воды. Эти реакции являются основными для обеспечения рабочих процессов в установке. В основе метода лежат мольные соотношения веществ, участвующих в реакциях при стехиометрических условиях. С использованием термодинамических параметров цикла и при заданной мощности установки определяют расходы рабочего тела, долю обновления углекислоты, количество метанола, получаемого в установке синтеза, количество свежего метанола, подводимого к циклу, количество водорода, получаемого в установке электролиза воды и количество кислорода, необходимого для процессов горения топлива. Одновременно определяют количество коммерческого водорода, то есть выводимого на склад. Затраты электроэнергии на определение мощности собственных нужд определяют по нормативными методам и данным заводов изготовителей оборудования. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что при близких значениях термических КПД CO_2-циклов на основе кислородного сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой из цикла на захоронение на 11% меньше. Показано, что CO_2-цикл, работающий на метаноле, одновременно с выработкой электроэнергии способен вырабатывать коммерческий водород. Удельные затраты электроэнергии на его производство составят на ~22 % меньше, чем при производстве без сочетания с CO_2-циклом.*

Ключевые слова: *цикл Аллама; метанол; водород; кислородное сжигание; метод исследования; эффективность.*

Для цитирования: Щинников П.А., Садкин И.С., Боруш О.В., Романенко Р.В. Энергетические особенности CO_2-циклов при кислородном сжигании метанола // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 4. С. 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-150-159.

ENERGY FEATURES OF CO_2-CYCLES DURING OXYGEN COMBUSTION OF METHANOL

Shchinnikov P.A., Sadkin I.S., Borush O.V., Romanenko R.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
shchinnikov@corp.nstu.ru

Abstract: *The PURPOSE of the work is to determine the mass-flow characteristics of working substances and energy indicators of an installation based on a CO_2 cycle with a two-stage pressure increase (Allam cycle) during oxygen combustion of methanol. METHODS. A research methodology is presented in which the mass-flow characteristics of working substances are determined based on the reactions of combustion and synthesis of methanol and electrolysis of water. These reactions are basic for ensuring operational processes in the installation. The method is based on the molar ratios of substances participating in reactions under stoichiometric conditions. Using the thermodynamic parameters of the cycle being implemented and at a given installation power, the consumption of the working fluid, the share of carbon dioxide renewal in*

the cycle, the amount of methanol produced in the synthesis unit, the amount of fresh methanol, the amount of hydrogen produced in the water electrolysis unit and the amount of oxygen are determined, necessary to ensure fuel combustion processes. At the same time, the amount of commercial hydrogen is determined. Electricity consumption for own needs is determined using regulatory methods and data from equipment manufacturers. RESULTS. The article shows that with similar values of thermal efficiency of CO_2 cycles based on oxygen combustion of methane and methanol, the amount of carbon dioxide removed from the cycle for disposal is 11% less. It has been shown that a CO_2 cycle operating on methanol is capable of producing commercial hydrogen simultaneously with electricity generation. The specific electricity consumption for hydrogen production is 22% less than for its production without combination with the CO_2 cycle.

Keywords: *Allama cycle; methanol; hydrogen; oxygen combustion; research method; indicators.*

For citation: Shchinnikov P.A., Sadkin I.S., Borush O.V., Romanenko R.V. Energy features of CO_2-cycles during oxygen combustion of methanol. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (4): 150-159. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-4-150-159.

Введение *(Introduction)*

В условиях сохранения в мировом энергетическом балансе высокой доли органического топлива, что характерно и для России, требуется разработка углероднейтральных технологий его использования при производстве электроэнергии. Одним из направлений развития таких технологий является создание энергетических установок на основе CO_2-циклов с нулевыми выбросами углекислоты в атмосферу [1-10]. В их основе лежит кислородное сжигание топлива [8, 11, 12]. Могут быть реализованы разные варианты термодинамических циклов [9, 13-15] и разные технические особенности энергетических установок [15-17]. Одновременно рассматривают разные виды топлива - от метана до синтез-газа из угля [2, 8, 9, 16, 18, 19]. Активность исследований CO_2-циклов возросла после практической реализации подобной экспериментальной установки компанией NetPower в г.Ла-Порте, США [6, 20, 21]. Многие научные коллективы США [6, 17, 18], Китая [9], стран Евросоюза [1, 13, 15] развивают данное направление энергетики. В России этим направлением активно занимаются в НИУ МЭИ [12, 22], ОИВТ РАН [3, 10], НГТУ [14, 23]. К последнему коллективу принадлежат авторы статьи.

Постановка задачи *(Formulation of the problem)*

В основе работы CO_2-циклов лежит использование в качестве рабочего тела углекислоты, полученной при кислородном сжигании углеводородного топлива, например, метана по реакции

$$CH_4+2O_2 \rightarrow CO_2+2H_2O. \quad (1)$$

В этом случае избыток углекислоты, полученный при сжигании топлива и не требующийся для обеспечения работоспособности цикла, а также вся вода выводятся за его рамки [4, 11, 14, 20]. Углекислота выводится для захоронения, а вода сбрасывается в окружающую среду. Подобная организация цикла характерна для сжигания любого газообразного углеводородного топлива, очищенного от негорючих элементов и примесей. Вместе с тем из выводимых за рамки цикла продуктов сгорания может быть получен метанол по реакции

$$CO_2+3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O, \quad (2)$$

в которой водород берут в результате электролизного разложения воды, так же выводимой за рамки цикла

$$H_2O \rightarrow H_2 + O. \quad (3)$$

Таким образом, при использовании в качестве топлива метанола можно обеспечить его частичное восполнение по реакции (2).

Реакция горения метанола

$$2CH_3OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O. \quad (4)$$

Кислород, полученный по реакции (3), может быть использован в реакции горения (4) и частично компенсировать полные затраты кислорода, а избыток водорода отправлен на склад для последующей реализации.

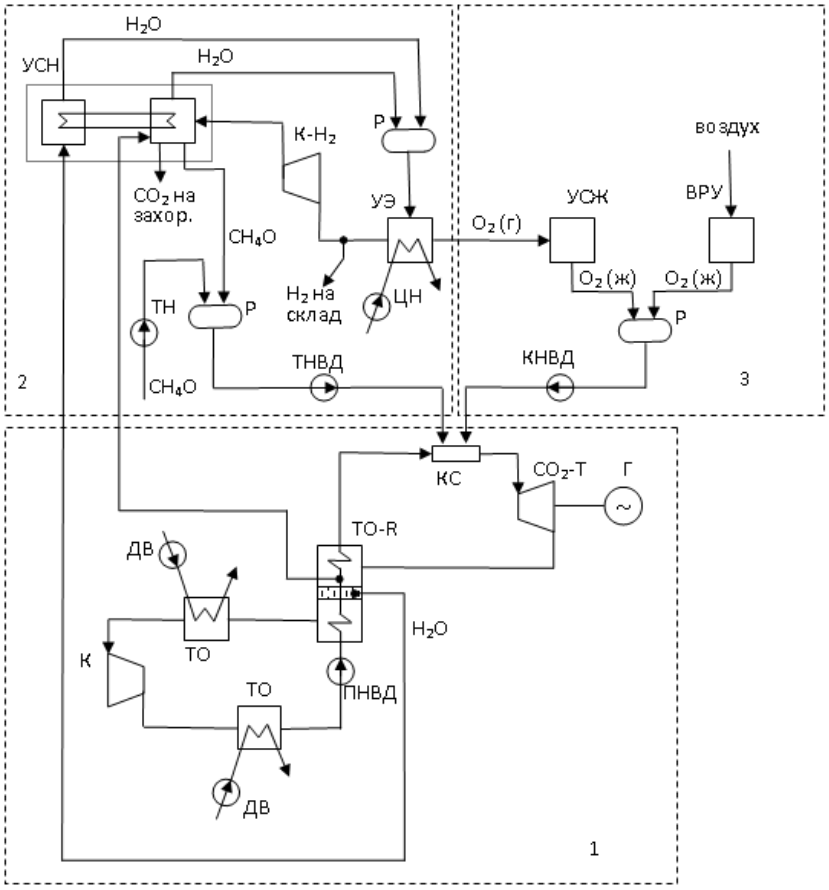


Рис. 1. Принципиальная схема установки на основе CO_2-цикла при кислородном сжигании метанола: 1, 2, 3 – функциональные части установки; КС – камера сгорания; CO_2-Т – CO_2-турбина; К-CO_2 – компрессор первой ступени подъема давления; Р – ресивер; ВРУ – воздухоразделительная установка; УСЖ – установка по сжижению кислорода; УЭ – установка электролиза воды; УСН – установка синтеза метанола; ТО – теплообменники; ТН – топливный насос; ТНВД – топливный насос высокого давления; КНВД – кислородный насос высокго давления; ПНВД – питательный насос высокого давления второй ступени подъема; ДВ – дутьевой вентилятор; ЦН – циркуляционный насос; К-H_2 – компрессор водорода; ТО-R – регенеративный теплообменник; Г – генератор; CH_4O – метанол

Fig. 1. Schematic diagram of an installation based on the CO_2-cycle for oxygen combustion of methanol: 1, 2, 3 – functional parts of the installation; KC – combustion chamber; CO_2-T – CO_2-turbine; K-CO_2 – compressor of the first stage of pressure rise; P – receiver; ВРУ – air separation unit; УСЖ – oxygen liquefaction unit; УЭ – water electrolysis installation; УСН – methanol synthesis unit; TO – heat exchangers; TN – fuel pump; ТНВД – high pressure fuel pump; КНВД – high pressure oxygen pump; ПНВД – high-pressure feed pump of the second stage of lift; ДВ – blower fan; ЦН – circulation pump; K-H_2 – hydrogen compressor; TO-R – regenerative heat exchanger; Г – generator; CH4O – methanol

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

Установку можно представить в виде функциональных частей (рис. 1). Первая часть включает оборудование, объединяющее процессы, реализуемые в термодинамическом цикле и предназначенное для генерации электроэнергии. В эту группу оборудования входят камера сгорания, CO_2-турбина, регенеративный теплообменник, теплообменники для отвода теплоты в окружающую среду, нагнетатели, генератор. Вторая функциональная часть предназначена для обеспечения подвода топлива к камере сгорания. В ней сосредоточены установка синтеза метанола, установка электролиза воды, вспомогательное оборудование и нагнетатели. Здесь же обеспечивается вывод избытка углекислоты на захоронение и вывод избытка водорода на склад. Третья функциональная часть

обеспечивает подвод окислителя к камере сгорания. В ней сосредоточены установка сжижения кислорода, получаемого при электролизе воды, воздухоразделительная установка, а так же вспомогательное оборудование и нагнетатели.

В камере сгорания (КС) обеспечивают сжигание метанола в кислороде по реакции (4) и нагрев рабочего тела в виде углекислоты за счет смешения с продуктами сгорания, рис.1. Полученную смесь углекислоты и водяных паров направляют в CO_2-турбину (CO_2-Т), где совершается работа. Затем смесь направляют в регенеративный теплообменник (ТО-R), где сбросным потоком обеспечивают нагрев углекислоты, подводимой к камере сгорания. Повышение давления рабочего тела обеспечивают по двухступенчатой схеме в компрессоре (К-CO_2) и насосе (ПНВД), что отражает реализацию цикла Аллама [4, 5]. Отвод теплоты в окружающую среду обеспечивают в воздушных теплообменниках (ТО) при нагнетании охлаждающего воздуха дутьевыми вентиляторами (ДВ). Избыток углекислоты направляют в установку синтеза метанола (УСН). Полученный в результате рециклинга углекислоты по реакции (2) метанол направляют в ресивер (Р) для смешения со свежим метанолом. Затем, при помощи топливного насоса высокого давления (ТНВД), направляют в камеру сгорания. Вода, полученная в результате реакции (4) выводится из цикла и направляется в ресивер, где смешивается с водой, полученной по реакции (2) в установке синтеза метанола. Затем ее направляют в установку электролиза (УЭ). Полученный при электролизе воды по реакции (3) водород при помощи нагнетателя (К-H_2) направляют в установку синтеза метанола, а его избыток выводят на склад. Полученный при электролизе кислород направляют в установку сжижения (УСЖ), откуда в ресивер для смешения с кислородом, полученным в воздуразделительной установке (ВРУ). Затем кислородным насосом высокого давления (КНВД) направляют в камеру сгорания. Для функционирования установки электролиза обеспечивают ее охлаждение водой в собственном контуре замкнутого типа при помощи циркуляционного насоса (ЦН).

Представленная установка обладает следующими преимуществами: высокая термодинамическая эффективность; замкнутость всех контуров; минимальное использование воды; отсутствие жидких стоков; сниженный выброс CO_2; рециклинг топлива; наработка коммерческого H_2 на склад.

Анализ работоспособности установки по представленной схеме представляет интерес. Задачей исследования является оценка энергетических и массо-расходных показателй установки. Эта информация необходима при проектировании ее узлов и агрегатов.

Методика исследования *(Research methodology)*

Массовые расходы веществ, обусловленные химическими реакциями горения (4) и синтеза (2) метанола и электролиза (3) воды определяются на основании их мольных отношений на 1 кг CO_2 рабочего тела при стехиометрических условиях

$$\begin{cases} G_{\mathrm{H2O}} = \frac{\mu_{\mathrm{H2O}}}{\mu_{\mathrm{CO2}}}; \\ G_{\mathrm{O2}} = \frac{\mu_{\mathrm{O2}}}{\mu_{\mathrm{CO2}}}; \\ G_{\mathrm{CH3OH}} = \frac{\mu_{\mathrm{CH3OH}}}{\mu_{\mathrm{CO2}}}; \\ G_{\mathrm{CO2}} = \delta G_{\mathrm{CH3OH}} \frac{\mu_{\mathrm{CO2}}}{\mu_{\mathrm{CH3OH}}}; \\ G_{\mathrm{H2}} = \delta G_{\mathrm{CH3OH}} \frac{\mu_{\mathrm{H2}}}{\mu_{\mathrm{CH3OH}}}; \\ G_{\mathrm{H2O}} = \delta G_{\mathrm{H2}} \frac{\mu_{\mathrm{H2O}}}{\mu_{\mathrm{H2}}}. \end{cases} \quad (1)$$

В этих выражениях G – расход вещества, кг/с; μ – мольная масса вещества; δ – доля обновления углекислоты в цикле.

Расход рабочего тела при обеспечении заданной мощности установки определяют выражением, кг/с

$$D_0 = \frac{N \cdot 10^3}{(h_0 - h_1)\eta_{0i}}, \quad (2)$$

где N – электрическая мощность установки, МВт; h_0, h_1 – энтальпия на входе в CO_2-турбину и выходе из нее, кДж/кг; η_{0i} – внутренний относительный КПД CO_2-турбины.

Количество метанола, получаемого в установке синтеза, кг/с

$$D_{\text{СН3ОН}}^{синтез} = 0{,}2 \cdot \frac{\mu_{\text{СН3ОН}}}{\mu_{\text{CO2}}} \cdot \delta \cdot D_0. \quad (3)$$

При работе установки синтеза метанола учитывают, что секвестируется 20% подведенной углекислоты [24].

Количество свежего метанола, подводимого к циклу, кг/с

$$D_B = B - D_{\text{СН3ОН}}^{синтез}, \quad (4)$$

где B – расход топлива на выработку электроэнергии, кг/с

$$B = \frac{N}{Q_н^p \cdot \eta_э}. \quad (5)$$

В этом выражении $Q_н^p$=22,7 МДж/кг – низшая рабочая теплота сгорания метанола; $\eta_э = \eta_t \eta_{0i} \eta_{к.с} \eta_{эм}$ – КПД выработки электроэнергии (η_t – КПД цикла термический; η_{0i} – внутренний относительный КПД CO_2-турбины; $\eta_{к.с}$ – КПД камеры сгорания; $\eta_{эм}$ – КПД электромеханический).

Мощность собственных нужд определяется выражением

$$N_{с.н} = \sum_i N_i, \quad (6)$$

где i – характеризует затраты электроэнергии на обеспечение работы установок электролиза воды, сжижения кислорода, воздухоразделения, насосов высокого давления, топливного и циркуляционного насосов, компрессоров и дутьевых вентиляторов.

Затраты электроэнергии на привод вращающихся механизмов определяют по нормативным методам, а затраты на работу элеткролизёра, воздухоразделения и сжижения кислорода на основе данных заводов изготовителей установок.

Представленный метод позволяет оценить энергетические и массо-расходные показатели установки на основе CO_2-цикла при кислородном сжигании метанола.

Обсуждение результатов *(Discussions and results)*

Условия проведения расчетов. Массо-расходные характеристики потоков веществ определены на 1 кг CO_2 рабочего тела при условии стехиометричности процессов химических преобразований. Рсчеты выполнены при давлении и температуре на входе в CO_2-турбину 300 бар и 1200 °С соответственно для цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама). Термический КПД цикла (η_t) определен по известной методологии [14], внутренний относительный турбины, камеры сгорания и электромеханический КПД приняты в порядке оценки η_{0i}=0,92, $\eta_{к.с}$ =0,99, $\eta_{эм}$=0,99. Расчеты выполнены при использовании двух видов топлива: метана и метанола (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Массо-расходные характеристики рабочих веществ CO_2-циклов
Mass and flow characteristics of working substances of CO_2 cycles

Наименование показателя	Метан (CH_4)	Метанол (CH_4O)
Расход топлива для обеспечения горения при генерации 1 кг CO_2, кг/кг CO_2	0,363	0,727
Расход кислорода при горении для генерации 1 кг CO_2, кг/кг CO_2	1,45	1,091
Образование водяных паров при горении топлива и генерации 1 кг CO_2, кг/кг CO_2	0,818	0,818
Теплоты, выделяемая при горении топлива и генерации 1 кг CO_2, МДж/кг	18,232	16,5
Доля обновления углекислоты в цикле, от.ед.	0,0454	0,0506
Расход углекислоты в систему рециклинга, кг/кг CO_2	–	0,0506
Углекислота, направленная на захоронение, кг/кг CO_2	0,0454	0,0404
Расход водорода в системе рециклинга на синтез метанола, кг/кг CO_2	–	0,00138
Метанол, полученный в системе рециклинга, кг/кг CO_2	–	0,00736
Вода, полученная в результате синтеза метанола, кг/кг CO_2	–	0,00414
Водород, наработанный "на склад", кг/кг CO_2	–	0,00368
Расход топлива в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0166	0,03649
Расход кислорода в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0658	0,0552
Образование водяных паров в камере сгорания, кг/кг CO_2	0,0371	0,0413

Свежий метанол, подводимый к камере сгорания, кг/кг CO_2	–	0,0294
Кислород от ВРУ, кг/кг CO_2	0,0658	0,0147
Термический КПД цикла с учетом работы сжатия, от.ед	0,64	0,635

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

Можно видеть, что при близких значениях термических КПД циклов на основе сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой за рамки цикла на 11% ниже. Одновременно цикл, работающий на метаноле способен генерировать коммерческий водород в количестве 3,68 г на каждый килограмм рабочего тела. При циркуляции в контуре 100 кг/с углекислоты (что приблизительно соответствует 50 МВт установленной мощности) установка в сутки будет производить около 318 т водорода. Кроме того, для цикла, работающего на метаноле требуется в 4,47 раза меньше кислорода, подготовленного в воздухоразделительной установке. Вместе с тем следует отметить, что для этого цикла требуется установка электролиза воды и сжижения кислорода. Обе эти установки потребуют затрат электроэнергии собственных нужд.

Далее в статье рассматриваются три варианта исполнения энергетической установки мощностью 100 МВт на основе CO_2-цикла с двухступенчатым повышением давления (цикла Аллама), при кислородном сжигании метанола.

Вариант 1. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO_2 с превращением его в метанол. Обеспечивается полная переработка выводимой из рабочего тела воды в электролизёре с выработкой водорода и кислорода. Водород используют для синтеза метанола, а его избыток направляют на склад для последующей реализации. Недостаток кислорода, необходимый для сжигания топлива, получают в воздухоразделительной установке. Схема, представленная на рисунке 1, в этом варианте реализована в полном объеме.

Вариант 2. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO_2 с превращением его в метанол, аналогично варианту 1. Водород в электролизёре вырабатывают только для обеспечения реакции синтеза метанола, без наработки на склад. Недостаток кислорода, необходимый для сжигания топлива, получают в воздухоразделительной установке так же, как в варианте 1. Схема, представленная на рисунке 1, в этом варианте так же реализована в полном объеме, но при меньшей загрузке электролизёра и большей загрузке воздухоразделительной установки.

Вариант 3. Установка обеспечивает переработку 20-ти % выводимого из цикла CO_2 с превращением его в метанол, аналогично вариантам 1 и 2. Водород в установку синтеза метанола поступает (закупается) от внешнего источника. Весь кислород, необходимый для сжигания топлива получают в воздухоразделительной установке. Электролизёр и установка сжижения кислорода отсутствуют.

Таблица 2

Table 2

Расходные и энергетические характеристики установки на основе цикла Аллама с кислородным сжиганием метанола

Consumption and energy characteristics of a plant based on the Allama cycle with oxygen combustion of methanol

Наименование показателя	Значение показателя		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Установленная мощность, МВт	100		
Расходы, кг/с			
Рабочего тела	196,5		
Расход топлива в камере сгорания	7,228		
CO_2 в установку синтеза метанола	9,94		
CO_2 на захоронение	7,952		
CO_2 на синтез метанола	1,988		
H_2 на синтез метанола	0,271		
Вывод воды из установки синтеза метанола	0,813		
Метанол из установки синтеза	1,446		
Подвод свежего метанола	5,782		
Вода в установку электролиза	8,945	2,445	–
H_2 на склад	0,719	–	–
O_2 из воздухоразделительной установки	2,892	8,677	10,846
Вода, выводимая из цикла	0	6,5	8,945
Мощности установок собственный нужд, МВт			
Установка электролиза *	164,5	45	–

Установка сжижения O_2	4	1,1	–
Воздухоразделительная установка	5,8	17,5	21,87
Суммарная мощность всех насосов, компрессоров и вентиляторов	23,4	23,2	23,43
Суммарная мощность собственных нужд (СН)	197,7	86,8	45,3
Коэффициент собственных нужд с учетом потерь энергии в трансформаторе СН	–	0,88	0,46
Полезная мощность, МВт	–	12	54

* – при удельных затратах электроэнергии 4,2 кВт·ч/м^3 H_2

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

Можно видеть, что во всех вариантах при заданной электрической мощности установки расходы рабочего тела, топлива, работа камеры сгорания, работа установки синтеза метанола и вывод углекислоты на захоронение остаются неизменными (табл. 2). Несложные расчеты показывают, что при реализации варианта 1 с производством коммерческого водорода, удельные затраты электроэнергии составят ~3,43 кВт·ч/1 м^3 H_2, что на ~22 % меньше, чем при условии поставки электроэнергии для его производства только от внешнего источника.

Вариант 2 характеризуется отсутствием наработки коммерческого водорода, при этом его энергетическая эффективность невысока, так как полезная мощность составляет лишь 12 МВт. Вариант, характеризуемый внешней поставкой водорода для работы синтеза метанола обладает полезной мощностью в 54 МВт.

Авторы обращают внимание, что для принятия решений о практической реализации рассмотренных вариантов необходимо провести их технико-экономический анализ с оценкой коммерческой эффективности продукции, однако подобный анализ является самостоятельной задачей и требует отдельного исследования.

Выводы *(Conclusions)*

1. Показано, что при близких значениях термических КПД CO_2-циклов на основе кислородного сжигания метана и метанола у последнего количество углекислоты, выводимой из цикла на захоронение на 11% меньше.

2. Показано, что CO_2-цикл, работающий на метаноле, одновременно с выработкой электроэнергии способен вырабатывать коммерческий водород. Удельные затраты электроэнергии на его производство составят ~3,43 кВт·ч/1 м^3 H_2, что на ~22 % меньше, чем при его производстве без сочетания с CO_2-циклом.

3. При реализации цикла без выработки коммерческого водорода, полезная мощность для установки в 100 МВт составит лишь 12 МВт, а при внешней поставке водорода на уровне 54 МВт.

Литература

1. Sanz., W., Jericha, H., Moser, M., Heitmeir, F., 2004, "Thermodynamic and Economic Investigation of an Improved Graz Cycle Power Plant for CO2 Capture", ASME Paper GT2004-53722, ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria. (Conference presentation).

2. Wimmer, K., Sanz, W., 2020, "Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle “, International Journal of Greenhouse Gas Control 99 (2020), 103055 (DOI).

3. Парогазовые установки с полным улавливанием диоксида углерода для чистой энергетики / В.В. Даценко, Ю.А. Зейгарник, Е.А. Калашникова, А.А. Косой, А.С. Косой, М.В. Синкевич // Теплофизика и аэромеханика, 2020, том 27, № 5. - С.1-8.

4. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, “The oxy-fuel, supercritical CO2 Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions,” in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).

5. R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed and J. Manning, Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture, ENRGY PROCED, Letters 114, 5948-5966 (2017).

6. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. - https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-1-pager.pdf. - Чтение с экрана.

7. Разработка методики предварительного расчета проточной части газовых турбин цикла R.J. Allam на сверхкритическом диоксиде углерода / А.Н. Рогалев, Е.Ю. Григорьев, В.О. Киндра, С.К. Осипов, С.А. Павлычев // «Вестник ИГЭУ» Вып. 3 2018 г. - С. 5-14.

8. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO2 power cycles with oxygen combustion of methane / I. S. Sadkin, P. A. Shchinnikov. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301. – Text : direct // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.

9. Zhu, Z., Chen, Y., Wu, J., Zhang, S., Zheng, S.: A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO2 capture. Energy. 174, 478–487 (2019). https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.165

10. Концептуальная схема парогазовой установки с полным улавливанием диоксида углерода из продуктов сгорания / А.С.Косой, Ю.А.Зейгарник, О.С.Попель, М.В.Синкевич, С.П.Филиппов, В.Я.Штеренберг // Теплоэнергетика, 2018. - С.1-10.

11. Садкин И.С., Щинников П.А. Способ производства электроэнергии на основе закритического CO2-цикла. – Патент на изобретение RU2810854 C1, 28.12.2023. Заявка от 06.07.2023.

12. Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid / Andrey Rogalev, Vladimir Kindra and Sergey Osipov // AIP Conference Proceedings 2047, 020020 (2018); https://doi.org/10.1063/1.5081653.

13. Michel Moliere, Romain Privat, Jean-Noel Jaubert, Frederic Geiger Supercritical CO2 Power Technology: Strengths but Chellenges. – Energies 2024, 17, 1129. https://doi.org/10.3390/en17051129

14. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO2 power cycles during oxygen combustion of methane / S. V. Alekseenko, P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin. – DOI [10]1134/S0869864323010109. – Text : direct // Thermophysics and Aeromechanics. – 2023. – Vol. 30, iss. 1. – P. 83–92.

15. Sanz, W., Braun, M., Jericha, H., Platzer, M.F., 2016, "Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour“, ASME Paper GT2016-57988, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea (Conference presentation).

16. Влияние термодинамических параметров на мощность воздухоразделительной установки в цикле Аллама / П. А. Щинников, Е. М. Корепанова. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 74–81.

17. The 8th International Supercritical CO2 Power Cycles Symposium will be held in San Antonio, Texas, February 26-29, 2024 / February 26 – 29, 2024 Hilton Palacio del Rio 200 South Alamo Street San Antonio, Texas . - https://co2olheat-h2020.eu/wp-content/uploads/2024/03/2024-sCO2-symposium_detailed-agenda-4.pdf - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024

18. Allam Cycle Zero Emission Coal Power / Reference Number: 89243319CFE000015 Coal-Based Power Plants of the Future. - May 19th, 2020. - https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-06/8-Rivers-Capital-Final-Pre-FEED-Report-Allam-Cycle-Coal-%208924331RFE000015-Public-Version-May-19.pdf - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024

19. U.S. Department of Energy Invests $7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative. NETL, October 11, 2019 - https://netl.doe.gov/node/9282 - Чтение с экрана. Дата обращения 16.05.2024

20. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System.- //https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs-3.html. - Чтение с экрана.

21. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide / Allam R.J. et al. // Energy Procedia. – 2013. – Т. 37. – P. 1135–1149.

22. Разработка методики предварительного расчета проточной части газовых турбин цикла R.J.Allam на сверхкритическом диоксиде углерода / А.Н. Рогалев, Е.Ю. Григорьев, В.О. Киндра, С. К. Осипов, С.А. Павлычев //«Вестник ИГЭУ» Вып. 3, 2018 г. - С. 5-14.

23. Сравнительный анализ расходов топлива перспективными энергетическими установками на основе CO2-циклов / П. А. Щинников, Е. М. Корепанова // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 3 (59). – С. 94–106. – Работа выполнена: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00035, https://rscf.ru/project/23-29-00035/.

24. Исмагилов З.И., Пармон В.Н. Каталитические методы переработки углекислого газа. – 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет. Глобальная энергия, 2021. – С.49-67.

Авторы публикации

Щинников Павел Александрович – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибиский государственный технический университет». *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4313-6907*

Садкин Иван Сергеевич – аспирант кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибиский государственный технический университет».

Боруш Олеся Владимировна – докт. техн. наук, доцент, профессор кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибиский государственный технический университет».

Романенко Роман Владимирович – студент кафедры Тепловых электрических станций (ТЭС) ФГБОУ ВО «Новосибиский государственный технический университет».

References

1. Sanz., W., Jericha, H., Moser, M., Heitmeir, F., 2004, "Thermodynamic and Economic Investigation of an Improved Graz Cycle Power Plant for CO2 Capture", ASME Paper GT2004-53722, ASME Turbo Expo 2004, Vienna, Austria. (Conference presentation).

2. Wimmer, K., Sanz, W., 2020, "Optimization and comparison of the two promising oxy-combustion cycles NET Power cycle and Graz Cycle ", International Journal of Greenhouse Gas Control 99 (2020), 103055 (DOI).

3. Combined-cycle plants with complete carbon dioxide capture for clean energy / V.V. Datsenko, Yu.A. Zeigarnik, E.A. Kalashnikova, A.A. Kosoy, A.S. Kosoy, M.V. Sinkevich // Thermophysics and aeromechanics, 2020, volume 27, no. 5. - P.1-8.

4. R. J. Allam, J. E. Fetvedt, B. A. Forrest and D. A. Freed, "The oxy-fuel, supercritical CO2 Allam Cycle: New cycle developments to produce even lower-cost electricity from fossil fuels without atmospheric emissions," in ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition (American Society of Mechanical Engineers, 2014).

5. R. Allam, S. Martin, B. Forrest, J. Fetvedt, X. Lu, D. Freed and J. Manning, Demonstration of the Allam Cycle: an update on the development status of a high efficiency supercritical carbon dioxide power process employing full carbon capture, ENRGY PROCED, Letters 114, 5948-5966 (2017).

6. Zero Emissions Power from Natural Gas. NET Power Performance Data. - https://netpower.com/wp-content/uploads/2021/05/2021-NET-Power-Performance-Data-1-pager.pdf. - Reading from the screen.

7. Development of a methodology for preliminary calculation of the flow path of gas turbines of the R.J. cycle. Allam on supercritical carbon dioxide / A.N. Rogalev, E.Yu. Grigoriev, V.O. Kindra, S.K. Osipov, S.A. Pavlychev // "Bulletin of ISEU" Vol. 3 2018 - pp. 5-14.

8. Thermodynamic features of the regenerative system of direct fired sCO2 power cycles with oxygen combustion of methane / I. S. Sadkin, P. A. Shchinnikov. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2023.121301. // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 234. – Art. 121301.

9. Zhu, Z., Chen, Y., Wu, J., Zhang, S., Zheng, S.: A modified Allam cycle without compressors realizing efficient power generation with peak load shifting and CO2 capture. Energy. 174, 478–487 (2019). https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.165

10. Conceptual diagram of a combined cycle plant with complete capture of carbon dioxide from combustion products / A.S. Kosoy, Yu.A. Zeigarnik, O.S. Popel, M.V. Sinkevich, S.P. Filippov, V.Ya. Shterenberg // Thermal power engineering, 2018. - pp. 1-10.

11. Sadkin I.S., Shchinnikov P.A. A method for producing electricity based on a supercritical CO2 cycle. – Patent for invention RU2810854 C1, 12/28/2023. Inception dated 07/06/2023.

12. Modeling methods for oxy-fuel combustion cycles with multicomponent working fluid / Andrey Rogalev, Vladimir Kindra and Sergey Osipov // AIP Conference Proceedings 2047, 020020 (2018); https://doi.org/10.1063/1.5081653.

13. Michel Moliere, Romain Privat, Jean-Noel Jaubert, Frederic Geiger Supercritical CO2 Power Technology: Strengths but Chellenges. – Energies 2024, 17, 1129. https://doi.org/10.3390/en17051129

14. Effect of thermodynamic parameters on energy characteristics of CO2 power cycles during oxygen combustion of methane / S. V. Alekseenko, P. A. Shchinnikov, I. S. Sadkin. – DOI 10.1134/S0869864323010109. – Text : direct // Thermophysics and Aeromechanics. – 2023. – Vol. 30, iss. 1. – P. 83–92.

15. Sanz, W., Braun, M., Jericha, H., Platzer, M.F., 2016, "Adapting the Zero-Emission Graz Cycle for Hydrogen Combustion and Investigation of its Part Load Behaviour", ASME Paper GT2016-57988, ASME Turbo Expo 2016, Seoul, South Korea (Conference presentation).

16. Effect of thermodynamic parameters on the capacity of an air separation unit in the Allam cycle / P.A.Shchinnikov, E.M.Korepanova. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-74-81. // Power engineering: research, equipment, technology. – 2023. – T. 25, № 1. – C. 74–81.

17. The 8th International Supercritical CO2 Power Cycles Symposium will be held in San Antonio, Texas, February 26-29, 2024 / February 26 – 29, 2024 Hilton Palacio del Rio 200 South Alamo Street San

Antonio, Texas . - https://co2olheat-h2020.eu/wp-content/uploads/2024/03/2024-sCO2-symposium_detailed-agenda-4.pdf - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

18. Allam Cycle Zero Emission Coal Power / Reference Number: 89243319CFE000015 Coal-Based Power Plants of the Future. - May 19th, 2020. - https://netl.doe.gov/sites/default/files/2020-06/8-Rivers-Capital-Final-Pre-FEED-Report-Allam-Cycle-Coal-%208924331RFE000015-Public-Version-May-19.pdf - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

19. U.S. Department of Energy Invests $7 Million for Projects to Advance Coal Power Generation under Coal FIRST Initiative. NETL, October 11, 2019 - https://netl.doe.gov/node/9282 - Reading from the screen. Date of the application 16.05.2024

20. NET Power's CO2 cycle: the breakthrough that CCS needs. Modern Power System.- //https://web.archive.org/web/20161130185339/http://www.modernpowersystems.com/features/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs/featurenet-powers-co2-cycle-the-breakthrough-that-ccs-needs-3.html. - Reading from the screen.

21. High efficiency and low cost of electricity generation from fossil fuels while eliminating atmospheric emissions, including carbon dioxide / Allam R.J. et al. // Energy Procedia. – 2013. – T. 37. – P. 1135–1149.

22. Development of a method for preliminary calculation of the flow path of gas turbines of the R.J.Allam cycle on supercritical carbon dioxide / A.N. Rogalev, E.Yu. Grigoriev, V.O. Kindra, S.K. Osipov, S.A. Pavlychev // “Bulletin of ISEU” Vol. 3, 2018 - pp. 5-14.

23. Comparative analysis of fuel consumption by advanced power plants based on CO2-cycles / P. A. Shchinnikov, E. M. Korepanova // Bulletin of the Kazan State Energy University. – 2023. – T. 15, No. 3 (59). – pp. 94–106. – Work completed: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00035, https://rscf.ru/project/23-29-00035/.

24. Ismagilov Z.I., Parmon V.N. Catalytic methods for carbon dioxide processing. – 10 breakthrough ideas in the energy sector for the next 10 years. Global Energy, 2021. – pp. 49-67.

Authors of the publication

Pavel A. Shchinnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. *ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4313-6907*

Ivan S. Sadkin – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Olesya V. Borush – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Roman V. Romanenko – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено ***28.07.2024 г.***

Отредактировано ***05.08.2024 г.***

Принято ***15.08.2024 г.***

Сдано в набор 15.08.2024 г. Подписано к печати Формат 60*90/8
Бумага офсет 80 г. Печать Усл. печ. л. 18,3 Уч.изд. л. 11,62.
ризографическая Заказ № Цена свободная
Тираж 500 экз. Дата выхода в свет

© «Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ»