



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) 6 / 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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2024
Т.26, № 6
Ноябрь - Декабрь
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., Stanimir Valtchev, Pliya K. Iliev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Андреев В.П., Аракелян Э.К., Борисов В.В., Боруш О.В., Бочкарев И.В., Брякин И.В., Ваньков Ю.В., Вафин Д.Б., 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., Козелков О.В., Корнилов В.Ю., Лаптев А.Г., Мещеряков В.Н., Мингалеева Г.Р., Николаева Л.А., Сафин А.Р., Суслов К.В., Федотов А.И., Щинников П.А., Якимов Н.Д.

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, № 6
November - December

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:

Iliya K. Iliiev, Ion V. Ion, Kolcun Michail, Pentiu Radu Dumitru, Andreev Victor, Arakelyan Edik, Borisov Andrey, Borush Olesya, Bochkarev Igor, Briakin Ivan, Vankov Yury, Vafin Danil, Golenishchev-Kutuzov Alexander, Gracheva Elena, Dmitriev Andrey, Dovgun Valery, Zvereva Elvira, Igor Ivshin, Kalaida Marina, Vasil Kasimov, Kozelkov Oleg, Kornilov Vladimir, Laptev Anatoly, Meshcheryakov Viktor, Mingaleeva Guzel, Nikolaeva Larisa, Safin Alfred, Suslov Konstantin, Fedotov Alexander, Shchinnikov Pavel, Yakimov Nikolay.

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

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

Printing House: LLC «FOLIANT»

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

Email: problems_ener@mail.ru

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ПАМЯТИ ГОЛЕНИЩЕВА-КУТУЗОВА В.А. ПОСВЯЩАЕТСЯ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, Веществ и природной среды	3
ЗАРИПОВ Д.К., ЗАКИРОВ Д.Ф., ТАРАСОВ Б.П., МИРОНОВА Е.А., НАСИБУЛЛИН Р.А. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора	5
САДЫКОВ М.Ф., ГОЛЕНИЩЕВ-КУТУЗОВ А.В., ИВАНОВ Д.А., ГАЛИЕВА Т.Г., КОЧЕТКОВА А.А. Устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях	20
ГАРИФУЛЛИН М.Ш., СЛОБОДИНА Ю.Н., БИКЗИНУРОВ А.Р., ГИНИАТУЛЛИН Р.А., ЧЕРНЫШОВ В.А. Исследование наличия проокислительных свойств у фенольных ингибиторов окисления в отношении современных трансформаторных масел	30
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	
КАЦАЙ А.В., ШАРЯКОВ В.А. Объёмы рекуперативной энергии трамваев и троллейбусов	42
ЦИЦОНЬ И.И., АБДУЛЛАЗЯНОВ Э.Ю., ГРАЧЕВА Е.И., ПЕТРОВА Р.М., АБДУЛЛИН Л.И. Оценка параметров тепловых режимов кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации	55
БАСЕНКО В.Р., ЦВЕТКОВ А.Н., ПЕТРОВ Т.И., ИБРАГИМОВА А.Р., РАХМАЕВ Р.Н. Разработка системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов	69
САХНО Л.И., ПАРАМОНОВ Е.Д., САХНО О.И., КОЧЕТКОВА Е.Ю., МИНЕВИЧ Т.Г. Выбор аналитического метода расчета индуктивности рассеяния при оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора	81
СОЛУЯНОВ Ю.И., ФЕДОТОВ А.И., АХМЕТШИН А.Р., ФЕДОТОВ Е.А., ХАЛТУРИН В.А. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий	94
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	
КРЮКОВ А.В., СУСЛОВ К.В., КРЮКОВ А.Е. Моделирование электромагнитных влияний шестифазной ЛЭП на трубопроводы	108
СМОЛЕНЦЕВ Н.И., БОНДАРЕВА В.Ю. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1	121
БАЛОБАНОВ Р.Н., ЛАТЫПОВА А.А. Разработка алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 кВ	132
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	
ЗВЕРЕВА Э.Р., МАРЬИН Г.Е., ИШАЛИН А.В. Утилизация низкопотенциальных источников энергии ТЭЦ	147
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА	
САБИРОВА Л.Ю., ЯРУЛЛИН Л.Ю., ХАБРИЕВ И.Ш., КОРЕПАНОВА Я.Ю., ШИНКЕВИЧ Т.О. Энергосберегающие аспекты процесса экстракции биоактивных соединений из растительного сырья сверхкритическими флюидными растворителями	157
ЧАДАЕВ А.Н., ДМИТРИЕВ А.В., ЗИНУРОВ В.Э., МУГИНОВ А.М., ПАВЛОВ Г.И. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом	166
РЫЖИКОВ В.А., ЕРОХИНА О.А., АКИМ Э.Л., ЛУКАНИН П.В. Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры	180
ОЧКОВ В.Ф., АХМЕТОВА И.Г. Современные информационные технологии в теплоэнергетических расчетах: пакет SMath и оптимизация термодинамических циклов энергоустановок	195
КРУТОВА И.А., ЗОЛОТОНОСОВ Я.Д. Решение сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов	214
ВДОХНОВЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: Открытие EnergyNet.Lab в КГЭУ	227

CONTENTS

DEDICATED TO THE MEMORY OF GOLENISHCHEV-KUTUZOV V.A.	3
METHODS AND INSTRUMENTS OF CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT	
ZARIPOV D.K., ZAKIROV D.F., TARASOV B.P., MIRONOVA E.A., NASIBULLIN R.A. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager	5
SADYKOV M.F., GOLENISHCHEV-KUTUZOV A.V., IVANOV D.A., GALIEVA T.G., KOCHETKOVA A.A. A device for measuring soil moisture in the field	20
GARIFULLIN M.SH., SLOBODINA Y.N., BIKZINUROV A.R., GINIATULLIN R.A., CHERNYSHOV V.A. Study of the presence of pro-oxidative properties in phenolic oxidation inhibitors in relation to modern transformer oils	30
ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS	
KATSAY A.V., SHARYAKOV V.A. The volume of regenerative energy of trams and trolleybuses	42
TSITSON I.I., ABDULLAZYANOV E.YU., GRACHEVA E.I., PETROVA R.M., ABDULLIN L.I. Evaluation of heat mode parameters of 10 kV cable lines in different operation conditions	55
BASENKO V.R., TSVETKOV A.N., PETROV T.I., IBRAGIMOVA A.R., RAHMAEV R.N. Development of an electric drive system of modular design for small vessels	69
SAKHNO L.I., PARAMONOV E.D., SAKHNO O.I., KOCHETKOVA E.Y., MINEVICH T.G. Selecting analytical method of leakage inductance calculation for optimizing high-voltage test transformer design	81
SOLUYANOV YU.I., FEDOTOV A.I., AKHMETSHIN A.R., FEDOTOV E.A., KHALTURIN V.A. Determination of estimated electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of residential and public buildings	94
ELECTRIC POWER INDUSTRY	
KRYUKOV A.V., SUSLOV K.V., KRYUKOV A.E. Modeling of electromagnetic effects of six-phase power lines on pipelines	108
SMOLENTSEV N.I., BONDARYEVA V.Y. Results of development and experimental studies of the storage complex with the energy storage unit SPENE-1	121
BALOBANOV R.N., LATYPOVA A.A. Development of an algorithm for automated calculation of the technical condition index of 110 kV gas-insulated circuit breakers	132
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	
ZVEREVA E.R., MARIN G.E. ISHALIN A.V. Utilization of low-potential thermal power plant energy sources	147
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING	
SABIROVA L.YU., YARULLIN L.YU., KHABRIEV I.SH., KOREPANOVA YA.YU., SHINKEVICH T.O. Energy-saving aspects of the process of extraction of bioactive compounds from plant raw materials with supercritical fluid solvents	157
CHADAEV A.N., DMITRIEV A.V., ZINUROV V.E., MUGINOV A.M., PAVLOV G.I. Calculation algorithm for a multilayer thermal insulation system of a thermal energy storage device with a high-temperature working fluid	166
RYZHIKOV V.A., EROKHINA O.A., AKIM E.L., LUKANIN P.V. Research of physical and chemical characteristics of alternative fuel containing synthetic polymers	180
OCHKOV V.F., AKHMETOVA I.G. Modern information technologies in thermal power calculations: SMATH package and optimization of thermodynamic cycles of power plants	195
KRUTOVA I.A., ZOLOTONOSOV YA.D. Solution of the conjugate heat exchange problem for conical heat exchangers	214
INSPIRATION AND TECHNOLOGY IN ENERGY EDUCATION: Opening of Energynet.Lab at KSPEU	227



Российская физическая наука, система высшего профессионального образования страны понесли тяжёлую утрату.

10 ноября 2024 года, на 93-м году, от нас ушёл выдающийся учёный-физик, известнейший российский организатор науки и высшего образования, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета, академик Международной академии наук высшей школы, член-корреспондент Академии электротехнических наук РФ, Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, Заслуженный деятель науки ТАССР, лауреат Государственной премии Республики Татарстан, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Заслуженный профессор КГЭУ

Голенищев-Кутузов Вадим Алексеевич
(01.07.1932 – 10.11.2024)

Профессор Голенищев-Кутузов В. А. был видным представителем советской и российской физической науки, блистательным учёным, талантливым педагогом и уважаемым гражданином страны.

Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов родился 01.07.1932 г. в г. Казань. После окончания в 1955 г. Казанского государственного университета, работал там же ассистентом. С 1962 по 1964 г. учился в аспирантуре при Казанском физико-техническом институте Казанского филиала АН СССР. По окончании аспирантуры работал там же; с 1965 г. – старшим научным сотрудником, с 1968 г. – заведующим лабораторией ядерного магнитного резонанса. В 1973-1993 гг. – заведующим отделом квантовой акустики Казанского физико-технического института Казанского научного центра РАН. Одновременно, с 1979 г. – профессором (по совместительству) кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского филиала Московского энергетического института (КФ МЭИ). В 1993-1998 гг. – заведующим кафедрой «Промышленная электроника» КФ МЭИ. Одновременно, в 1994-1996 гг. – деканом факультета электронной техники и автоматизации КФ МЭИ.

С 1998 г. и до последних дней жизни Вадим Алексеевич работал профессором кафедры «Промышленная электроника» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). С 2001 года – являлся бессменным председателем диссертационного совета по присуждению учёных степеней кандидата и доктора технических наук по специальностям «Физика полупроводников» и «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» КГЭУ.

Многие годы профессор Голенищев-Кутузов В. А. являлся признанным лидером научной школы по изучению особенностей электронной структуры и нелинейных свойств магнито- и электроупорядоченных материалов, в которую входят ученые, преподаватели и аспиранты КГЭУ и КФТИ КНЦ РАН. Под его научным руководством защищено более 20 кандидатских и 8 докторских диссертаций.

Им опубликовано свыше двухсот научных работ, он принимал самое активное участие в работе научных советов РАН по акустике, магнетизму, неразрушающему контролю. Долгое время Вадим Алексеевич был член редакционного совета Всероссийского журнала «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», являлся организатором множества международных конференций и симпозиумов по квантовой акустике и физике твёрдого тела, участником большого числа международных научных мероприятий, выступал с лекциями в ряде зарубежных стран.

В. А. Голенищев-Кутузов внёс неоценимый вклад, свой вдумчивый опыт, мастерство, талант исследователя в становление и развитие знаменитой казанской научной школы квантовой акустики. Он, первым в СССР, в конце 50-х годов XX века начал экспериментальные исследования акустического парамагнитного резонанса, завершённые в 1952 г. обнаружением нового эффекта – нерезонансного поглощения ультразвука системой электронных спинов. На следующем этапе им, совместно с коллегами, были обнаружены и исследованы двойные электронно-ядерные акустические резонансы, позволяющие значительно расширить сферу применения акустической магнитной спектроскопии (Золотая медаль ВДНХ СССР, 1979). Были обнаружены и исследованы такие нелинейные акустические эффекты, как квантование ядерных спинов в поле акустической волны, солитонный режим распространения акустических импульсов в магнетиках.

Развитые им методы акустической ЭПР спектроскопии и оптоакустической спектроскопии были использованы при разработке комплексного способа контроля качества кристаллов для квантовой электроники. В 90-е – двухтысячные годы профессором Голенищевым-Кутузовым В. А. с коллегами, были выполнены основополагающие исследования по разработке и применению в акустоэлектронике нового класса материалов – фононных кристаллов. Им была построена модель образования доменов вблизи примесных ян-теллеровских ионов в оксидных сегнетoeлектриках, и на этой основе разработана методика создания оптически и акустически индуцированных доменных структур. Результаты этих исследований опубликованы в многочисленных научных статьях и монографиях, значимость которых трудно переоценить сегодня и ценность блестящих научных мыслей, заложенных в них, несомненно, будет весьма ещё долгие и долгие годы.

Вадим Алексеевич огромную часть своей многогранной деятельности посвятил педагогической работе, подготовке инженеров-энергетиков и высококлассных учёных-физиков. Он воспитал огромную плеяду учеников. Все они глубоко скорбят о его уходе; они горды тем, что им посчастливилось расти под его мудрым руководством и готовы достойно продолжать дело его жизни, развивая и углубляя его многочисленные творческие и научные идеи.

Вадим Алексеевич беззаветно служил своей Родине, ряд его научных работ были использованы в интересах укрепления обороноспособности страны и нашли применение в развитии её промышленного потенциала. Он был награжден орденом Дружбы, тремя медалями, почетной грамотой Республики Татарстан, российских Министерств энергетики, Образования и науки, Академии наук СССР.

Коллектив кафедры «Промышленная электроника» КГЭУ, в организации, становлении и успешном развитии которой В. А. Голенищев-Кутузов принимал столь активное и деятельное многолетнее участие, вышел с единогласной инициативой к Учёному совету КГЭУ о присвоении кафедре имени, глубоко чтимого и ценимого всеми, Голенищева-Кутузова Вадима Алексеевича.

Благодаря своему прекрасному характеру, богатому опыту, знаниям, целеустремлённости, высоким морально-этическим принципам Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов пользовался непререкаемым авторитетом, любовью и глубочайшим уважением всех тех, кто с ним работал, учился у него, кому он помогал и кого искренне любил и уважал. Он навсегда останется для всех нас примером жизнелюбия, безграничной преданности своей профессии, человечности, возвышенной интеллигентности, милосердия, мудрости, оптимизма и светлого ума.

Ректорат, Учёный совет, общественные организации Казанского государственного энергетического университета глубоко скорбят о невозможной утрате и приносят близким, коллегам и ученикам Вадима Алексеевича глубочайшие искренние соболезнования.

Светлая и трепетная, живая память о Вадиме Алексеевиче Голенищеве-Кутузове, энергичном, жизнерадостном, чистом человеке блестящего ума, замечательном педагоге, выдающемся учёном, талантливом организаторе науки, навсегда останется в наших сердцах, а его имя – в истории российской физической науки и высшего образования.

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



УДК 621.315.624

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗОРА

Зарипов Д.К.¹, Закиров Д.Ф.¹, Тарасов Б.П.¹, Миронова Е.А.¹, Насибуллин Р.А.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия

dzaripov@list.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Наружная изоляция является одним из наиболее повреждаемых элементов высоковольтного оборудования. Изменения климата, экологии оказывают на ее состояние все большее воздействие. Доля отключений воздушных линий электропередачи (ВЛ) из-за загрязнений варьируется в зависимости от региона и конкретных условий эксплуатации, но в среднем она может составлять от 20% до 40% всех аварий на ВЛ. В регионах с высоким уровнем промышленного загрязнения или вблизи морских побережий эта цифра может достигать 50% и более. Основные причины отключений связаны с накоплением загрязнений на изоляторах, что приводит к перекрытию во влажных условиях. Наибольшее влияние атмосферные осадки, такие как морозящий дождь, туман или роса, оказывают именно в сочетании с различными твердыми проводящими частицами, оседающими на поверхности изолятора из воздуха, и образующими слой поверхностного загрязнения. Методы диагностирования изоляции различны, включая тепловизионный. **ЦЕЛЬ.** Изучение влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температуру в лабораторных условиях и оценка возможности диагностирования загрязнённого состояния. **МЕТОДЫ.** Для достижения поставленной цели было проведено тридцать лабораторных экспериментов с подвесными стеклянными и полимерными изоляторами в климатической камере (камере тумана) со снятием термограмм, контролем тока утечки и степени загрязнения. В ходе экспериментов менялись степень и способ загрязнения, условия увлажнения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В ходе лабораторных исследований было показано, что тепловизорами можно диагностировать даже легко загрязненную изоляцию в смоченном состоянии. Среднее и среднеквадратичное значения температурных контрастов в большей степени зависят от уровня загрязнения (засаленности), чем от степени равномерности нанесения загрязнения. Предложена методология построения системы контроля изоляции на ВЛ и алгоритм автоматизированной обработки данных.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; подвесные изоляторы; термограммы; увлажнение изоляции; диагностика загрязнения тепловизором; температурные контрасты; лабораторные исследования.

Для цитирования: Зарипов Д.К., Закиров Д.Ф., Тарасов Б.П., Миронова Е.А., Насибуллин Р.А. Экспериментальное лабораторное исследование возможности выявления загрязнения высоковольтных изоляторов с помощью тепловизора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 5-19. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE POSSIBILITY OF DETECTING CONTAMINATION OF HIGH-VOLTAGE INSULATORS WITH THE HELP OF A THERMAL IMAGER

Zaripov D.K.¹, Zakirov D.F.¹, Tarasov B.P.¹, Mironova E.A.¹, Nasibullin R.A.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²PJSC “Krasnogorsky Zavod named after SA. Zverev”, Krasnogorsk, Russia

dzaripov@list.ru

Abstract: *ACTUALITY.* External insulation is one of the most damaged elements of high-voltage equipment. Changes in climate, ecology have an increasing impact on it's condition. The proportion of overhead transmission line (OTL) outages due to pollution varies by region and specific operating conditions, but on average it can range from 20% to 40% of all OTL failures. In regions with high levels of industrial pollution or near sea coasts, this figure can reach 50% or more. The main causes of outages are related to the accumulation of contaminants on insulators, which leads to overtopping in wet conditions. It is precipitation such as drizzle, fog or dew that has the greatest impact, combined with various solid conductive particles deposited on the insulator surface from the air, and forming a layer of surface contamination. Methods for diagnosing insulation are various, including thermal imaging. **OBJECT.** To study the effect of wetted contaminated surface of glass and polymer insulators on their temperature under laboratory conditions and to evaluate the possibility of diagnosing the contaminated condition. **METHODS.** Three dozen laboratory experiments with suspended glass and polymer insulators in a fog chamber with thermograms, control of leakage current and degree of contamination were carried out to achieve the goal. During the experiments, the degree and method of contamination and humidification conditions were changed. **RESULTS.** In the course of laboratory studies it was shown that thermal imaging cameras can diagnose even lightly contaminated insulation in the wetted state. The mean and rms values of temperature contrasts depend more on the level of contamination (greasiness) than on the degree of uniformity of contamination application. The methodology of construction of the insulation control system on overhead power lines and the algorithm of automated data processing are proposed.

Keywords: *overhead power lines; suspended insulators; thermograms; insulation wetting; thermal imaging fouling diagnostics; temperature contrasts; laboratory tests.*

For citation: Zaripov D.K., Zakirov D.F., Tarasov B.P., Mironova E.A., Nasibullin R.A. Experimental study of the possibility of detecting contamination of high-voltage insulators with the help of a thermal imager. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 5-19. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-5-19.

Введение (Introduction)

По мере совершенствования производства высоковольтных изолирующих конструкций на первый план выходят отказы оборудования, связанные с внешними факторами, влияющими на изоляцию, такими как загрязнения. Доля отключений воздушных линий из-за загрязнений может варьироваться в зависимости от региона, климатических условий и состояния инфраструктуры электросети [1-3]. По различным оценкам, доля отключений из-за загрязнений может составлять от 20% до 40% от общего числа отключений воздушных линий. Загрязнение изоляторов включает в себя накопление солей, пыли, промышленных загрязнений и биологических материалов, что снижает их диэлектрическую прочность и увеличивает риск перекрытия. Вероятность перекрытия загрязненной изоляции зависит от типа и степени загрязнения, а также климатических условий: влажность воздуха, температура и осадение влаги на поверхность изоляторов. Поскольку перечисленные факторы во многом носят непредсказуемый характер, то для снижения вероятности отказов необходимо обеспечить непрерывный контроль состояния изоляции.

Методы, применяемые в системах оперативного контроля за состоянием изоляции разнообразны [4]. Вот некоторые из них:

Акустический метод. Этот метод предполагает измерение акустической эмиссии, генерируемой частичными разрядами на изоляторах, и ее анализ для определения наличия загрязнений [5].

Емкостной метод. Этот метод включает в себя измерение изменения емкости изолятора при загрязнении.

Оптические методы. Визуальные камеры и оптические сенсоры используются для непрерывного наблюдения за состоянием изоляторов. Камеры высокого разрешения могут обнаруживать видимые признаки загрязнения. Ультрафиолетовые (УФ) камеры улавливают корону и частичные разряды, которые являются индикаторами загрязнения изолятора.

Непрерывное измерение поверхностного сопротивления и тока утечки. Использование сенсоров для измерения поверхностного сопротивления изоляции и утечек тока через загрязненные участки изоляции [6].

Диэлектрическая спектроскопия. Этот метод включает в себя измерение любых изменений в его диэлектрических свойствах из-за загрязнения.

Тепловизионные методы. Инфракрасные камеры (тепловизоры) используются для обнаружения аномальных температурных изменений, которые могут быть вызваны токами утечки, частичными искровыми или дугowymi разрядами из-за загрязнения [7].

Метод частичного разряда. Метод предполагает измерение частичных разрядов, возникающих в изоляторе, для обнаружения любых изменений в его диэлектрических свойствах из-за загрязнения [8].

Мониторинг пространственного распределения электрического поля. Метод контроля изменений электрического поля вокруг изолятора. Загрязнение изменяет распределение электрического поля, что может быть зафиксировано соответствующими датчиками.

В перечисленном выше ряду методов тепловизионный не является самым распространённым. Однако, по мере повышения надежности и снижения стоимости тепловизоров они все больше находят применение как еще одни камеры видеонаблюдения за состоянием высоковольтного оборудования [9, 10]. Преимущества тепловизионных камер очевидны. Достаточно провести визуальный анализ термограмм и отпадает необходимость в сложной системе обработки данных, которую требуют другие методы [11].

В последние годы также проводятся исследования по автоматическому анализу теплового состояния изоляции [12, 13]. Такая компьютеризированная система использует комбинацию искусственного интеллекта и методов цифровой обработки изображений [14]. Система может получать любое количество инфракрасных изображений в качестве входных данных перед выполнением автоматической обработки. Алгоритм анализа разделен на этапы [15]. На первом этапе обнаруживается элемент внутри теплового изображения. На втором этапе извлекаются статистические характеристики и другие данные о тепловом состоянии соответствующего элемента электрооборудования. На заключительном этапе вычисленные статистические характеристики анализируются для процесса принятия решения.

Обычно дефектные элементы обнаруживаются путем определения того, какие из этих областей на инфракрасных изображениях имеют более высокие температуры, чем нормальные предписанные уровни. Результаты проверок классифицируются на различные категории в зависимости от обнаруженных уровней температур, которые говорят энергетическим компаниям о серьезности каждой ситуации.

Автоматическая диагностика инфракрасных изображений с помощью интеллектуальной системы все еще находится на ранних стадиях. Проблем нет, когда необходимо выделить яркий объект, легко идентифицируемый на термограмме, например, контактное соединение проводов. Гораздо сложнее автоматически выделить объект и найти на нем дефект, когда тепловой контраст его сливается с фоном и тонет в шумах. Эта ситуация характерна при диагностировании изолирующих конструкций. Для них характерны температурные перепады в десятые доли градуса, из-за малых токов, протекающих в изоляторах. Если слабая локальная горячая точка на изоляторе не будет обнаружена вовремя, ненормальное состояние будет постоянно ухудшаться и в итоге приведет к пробую.

В любом случае, для работы компьютерных алгоритмов необходимы исходные данные о зависимостях тепловых контрастов при различных уровнях и особенностях загрязнения изоляторов. В данной работе описываются результаты лабораторных экспериментов по тепловизионному диагностированию загрязнения подвесных стеклянных и полимерных изоляторов с имитацией различных внешних условий функционирования. Цель исследования заключается в изучении влияния увлажнения загрязненной поверхности стеклянных и полимерных изоляторов на их температуру и оценке возможности применения тепловизионного метода для диагностирования загрязненного состояния изоляторов. Научная значимость данного исследования заключается в определении

зависимости средних и среднеквадратичных значений температурных контрастов от уровня и равномерности загрязнения на изоляторе. Практическая значимость заключается в том, что предложенные в данной работе методология построения системы тепловизионного контроля и алгоритм автоматизированной обработки полученных данных могут помочь в создании автоматизированной системы контроля состояния изоляции, что в свою очередь позволит улучшить эффективность диагностирования высоковольтной изоляции и повысить надежность работы электрооборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

В начале рассмотрим физическую основу проблематики. В процессе работы под переменным напряжением изолирующая конструкция, состоящая из гирлянды изоляторов или цельного полимерного изолятора, нагревается в следствие диэлектрических потерь, величина которых определяется не только активным сопротивлением, но и емкостью. В общем случае каждый i -ый элемент изолирующей конструкции, например, изолятор в гирлянде или часть протяженного изолятора, можно представить, как параллельное соединение активного сопротивления R_i и емкости C_i . Выражение для активной мощности P_i , выделяемой на элементе при протекании через него переменного тока I с частотой ω [16], приведено ниже в формуле (1):

$$P_i = I^2 \frac{R_i}{1 + \omega^2 C_i^2 R_i^2} \quad (1)$$

В данной формуле P_i имеет экстремум при R_i равном $1/\omega C_i$. Для подвешенного изолятора ПС-70 с емкостью около 50 пФ, максимум тепловыделения достигается при значении R_i около 63 МОм. Обычно при анализе загрязненных изоляторов емкостной составляющей тока утечки пренебрегают. В ходе проведенных экспериментов с легко загрязненной гирляндой из трех изоляторов при приложении переменного напряжения 30 кВ (действующее значение) средний ток утечки был в районе 1 мА, что соответствует активному сопротивлению R_i около 20 МОм. Таким образом C_i пренебрегать нельзя. Для полимерного изолятора влияние емкостной составляющей еще более выражено, поскольку ток утечки в разы меньше. Ситуация аналогична поведению гирлянды подвесных фарфоровых изоляторов при наличии внутренних дефектов [15]. Она характеризуется непредсказуемым разбросом мощностей тепловыделения на отдельных изоляторах. Только в нашем случае он определяется неравномерностью поверхностного загрязнения и увлажнения.

Поскольку загрязнение и увлажнение заведомо неравномерно, то предлагается загрязненное состояние отличить по изменению пространственного распределения интенсивности теплового излучения по всей конструкции [17]. Величинами, характеризующими распределение, являются среднее и среднеквадратическое отклонение. Для определения состояния загрязнения необходимо одновременно использовать обе эти характеристики распределения. Снижение активного сопротивления одного из элементов изолирующей конструкции однозначно приводит к некоторому увеличению средней интенсивности излучения конструкции. Однако, ее заметное увеличение происходит при снижении активного сопротивления на нескольких элементах конструкции. В то же время величина среднеквадратического отклонения, характеризующая разброс интенсивностей теплового излучения элементов относительно среднего отклонения, может быть зафиксирована и при малых значениях среднего, когда интенсивность излучения изменяется только на одном элементе, но при снижении активного сопротивления на нескольких элементах возможна ситуация, когда среднеквадратическое отклонение будет близко к нулю.

Описанный принцип изначально был разработан для диагностирования подвесных и опорных фарфоровых изоляторов. Однако, может быть экстраполирован на выявление поверхностных загрязнений стеклянных и полимерных изоляторов. Фактически загрязнение – это тот же дефект. Для полимерных изоляторов в процессе эксплуатации также характерно нарушение герметичности и проникновение влаги под оболочку ближе к оконцевателю, что приводит к перераспределению напряжения вдоль изолятора и появлению локальных частичных разрядов с соответствующим повышением среднего и среднеквадратичного отклонения значений температуры.

В сухих условиях доминирующие виды загрязнения (пылевое, сельскохозяйственное, морское, биологическое, выбросы автомобилей), осаждаемые на поверхности изолятора, не снижает его сопротивления изоляции и не влияет на распределение напряжения вдоль всей конструкции. Однако, когда осаждаемое загрязнение увлажняется (туман, роса, моросящий дождь), сопротивление изоляции на поверхности изолятора будет снижаться, тем самым изменяя распределение напряжения на изоляторах. В этот момент загрязнение на

поверхности изолятора увеличит ток утечки и температуру поверхности каждого изолятора. Термограмма представляет собой картину, где яркость каждой точки определяется его температурой. В свою очередь температура того или иного элемента в изолирующей конструкции однозначно связана с выделяемой на нем электрической мощностью. Мощность нагрева P_i и повышение температуры поверхности над окружающей средой ΔT_i i -го элемента можно рассчитать соответственно по формулам (2) и (3):

$$P_i = U_i I, \quad (2)$$

$$\Delta T_i = U_i I / R_t \quad (3)$$

В формулах (2) и (3): I - ток утечки через всю изолирующую конструкцию; R_t – термическое сопротивление, одинаковое для всех элементов. Из-за неравномерности загрязнения изоляторов U_i и ΔT_i также будут различаться вдоль изолирующей конструкции.

При реализации алгоритма в автоматизированной системе на практике наиболее сложным является выбор порога для среднего и среднеквадратичного значений яркостей изоляторов на термограммах. Возможны два способа. В первом случае оптимальные пороговые значения можно устанавливать по тепловому изображению эталонной (исправной, не загрязненной) изолирующей конструкции, идентичной диагностируемым и полученной в аналогичных метеоусловиях. Для эталонной изоляции среднее и среднеквадратичное значения будут минимальными. Другой вариант возможен при диагностировании в одних метеоусловиях большого числа изолирующих конструкций. В этом случае пороговые значения можно устанавливать при последующем компьютерном анализе, взяв минимальное среднее и среднеквадратичное значения по всем термограммам.

Изложенные выше критерии и методика диагностирования загрязнения могут быть заложены в алгоритмы программы обработки данных и обучения «искусственного интеллекта».

Моделирование работы гирлянды стеклянных изоляторов и полимерного изолятора в атмосфере чистого тумана проводилось с применением экспериментальной установки [18, 19], схема которой и вид климатической камеры представлены на рисунках 1 и 2.

В ходе лабораторных экспериментов исследовалась ситуация с легким загрязнением в соответствии с международной классификацией по ГОСТ Р 56735-2015 (IEC/TS 60815-1:2008). При выборе подаваемого напряжения исходили из соотношения примерно 10 кВ на изолятор ВЛ. Так на ВЛ 110 кВ (фазное напряжение 65 кВ) каждый провод монтируют на гирлянде с 6-8 изоляторами, а на ВЛ 220 кВ (фазное напряжение 127 кВ) – 10-14 изоляторами. Общая длина изолирующей конструкции ограничена размерами климатической камеры.

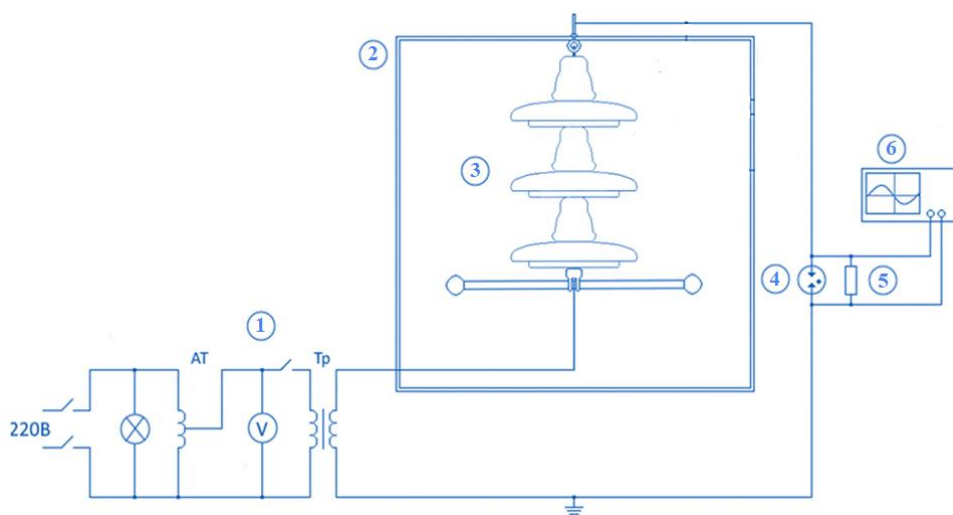


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – испытательная установка 110 кВ;
- 2 – климатическая испытательная камера;
- 3 – изолятор; 4 – разрядник;
- 5 – резистор 1 кОм; 6 – осциллограф

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

Fig. 1. Scheme of the experimental installation:

- 1 – 110 kV test setup;
- 2 – climatic test chamber;
- 3 – insulator; 4 – arrester;
- 5 – 1 kOhm resistor; 6 – oscilloscope



Рис. 2. Фотографии климатической камеры с двумя видами изоляторов
Fig. 2. Photos of the climatic chamber with two types of insulators

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

Климатическая испытательная камера (2, рис. 1) представляла собой куб со стенками, изготовленными из изоляционного материала с внутренним объемом 1 м^3 . В центре камеры устанавливалась изолирующая конструкция, представляющая собой гирлянду из трех стеклянных изоляторов ПС-70Е (3, рис. 1) или полимерный изолятор ЛК-70/35, которая подключалась к испытательной установке (1, рис. 1).

Туман, генерируемый пьезоэлектрическими элементами 2-х ультразвуковых увлажнителей, подавался внутрь камеры через два отверстия, находящиеся сверху и/или внизу задней стенки камеры. Скорость подачи пара для всех испытаний была около 300 мл/ч. Температура и относительная влажность воздуха внутри камеры контролировались датчиками.

Токи утечки по поверхности гирлянды изоляторов регистрировались при помощи цифрового осциллографа TDS2022C (6, рис. 1), связанного с персональным компьютером. Для защиты оборудования от перенапряжений применялся разрядник (4, рис. 1).

Загрязнение изоляторов проводилось в соответствии с методом предварительного загрязнения (ПЗ). В качестве загрязняющего вещества применялся раствор, содержащий 40 граммов каолинового порошка и от 0 до 40 грамм (в разных экспериментах) поваренной соли (NaCl) на 1 литр водопроводной воды. Удельная электропроводность воды составляла около 200 мкСм/см. Полученная суспензия распылялась на поверхность изоляторов пульверизатором. Загрязнённый изолятор оставался подсыхать на срок более 24 часов до начала экспериментов.

Измеренная эквивалентная плотность солевого отложения изоляторов (ESDD) составляла от 0,0034 (только водопроводная вода) до 0,04 мг/см² (водопроводная вода и 20 грамм соли). Данные уровни характеризуют легкое загрязнение.

В отдельных экспериментах перед помещением в камеру изоляторы дополнительно охлаждались. Цель подготовительной операции заключалась в имитации наиболее сильного смачивания, которому могут подвергаться изоляторы в процессе эксплуатации. Кроме того, отдельно имитировалась ситуация с неравномерным смачиванием росой изолирующей конструкции при подогреве ее несущим проводом по которому протекает большой ток нагрузки. Известно, что температура провода может достигать 50 °С и более [24]. Для этого на оконцеватель, примыкающий к удерживающей провод арматуре, прикреплялись пакетики с химическими нагревателями. И, наконец, для имитации значительной неравномерности загрязняющего слоя, поверхность изолятора под нижней юбкой ближней к высоковольтному проводу оставляли чистой.

В двух экспериментах (базовых) стеклянные и полимерный изоляторы оставались чистыми.

Исследования проводились длительным приложением к изолятору переменного напряжения 30 кВ с непрерывным увлажнением в камере в течение одного часа. Напряжение на изолирующую конструкцию подавалось за несколько минут до подачи пара в камеру. Выключение напряжения также осуществлялось через некоторое время после окончания увлажнения, когда разрядная деятельность значительно снижалась.

Температура окружающего воздуха в помещении при исследованиях была в пределах от 16 °С до 20 °С, относительная влажность воздуха составляла от 47 % до 64 %.

Всего было проведено 30 экспериментов со стеклянными и полимерными изоляторами. В ходе экспериментов непрерывно измерялись значения амплитуд синусоидальной составляющей и импульсов тока утечки, протекающего по поверхности загрязненной изоляции. После завершения измерений в камере и выключения напряжения, тепловизором снимались термограммы изолирующих конструкций.

Результаты (Results)

Результаты экспериментов отображены в таблице, где в соответствующих колонках представлены следующие данные:

1. Тип изолирующей конструкции. Гирлянда из трех стеклянных изоляторов или цельный полимерный.
2. Способ предварительного загрязнения. В основном загрязнение старались наносить равномерно по всей поверхности изолирующей конструкции, но в отдельных случаях юбка или часть ее, примыкающая к высоковольтному проводу, оставлялась чистой.
3. Состав раствора для загрязнения изоляторов из распылителя. Способ приготовления раствора был описан выше. В двух случаях эксперимент проводился с чистыми изоляторами. Кроме того, были эксперименты со стеклянными изоляторами, когда соль в раствор не добавлялась и поверхность покрывалась только слоем каолина.
4. Способ увлажнения. Применялись два увлажнителя, пар из которых мог подаваться в камеру тумана сверху или снизу.
5. Дополнительные условия. Для улучшения условий для конденсации влаги на поверхности отдельные изоляторы предварительно охлаждались ниже точки росы. Кроме того, в отдельных экспериментах применялся нагрев нижнего оконцевателя, для имитации большого тока, протекающего по проводу в естественных условиях, и возникающей при этом неравномерности конденсации влаги при выпадении росы [20].
6. Термограмма соответствующей изолирующей конструкции.
7. Средняя разность температур с окружающей средой изолирующей конструкции в целом ΔT_{cp} , определяемая из значений ΔT_i – средних величин перепада температур с окружающей средой трех соседних участков изолирующей конструкции на термограмме.
8. Среднеквадратичное отклонение перепада температур участков $D(\Delta T_i)$ относительно среднего.
9. ESDD измеренная до начала эксперимента
10. ESDD измеренная после окончания эксперимента.
11. $I_{ут.ср}$ – средний ток утечки в ходе увлажнения по уровню амплитуды периодической составляющей.
12. $I_{ут.имп.ср}$ – средняя амплитуда импульсов тока утечки в ходе увлажнения, вызванная поверхностными разрядами.

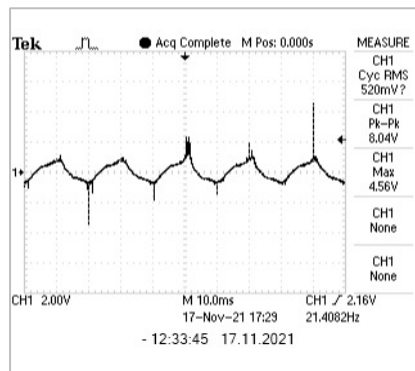
Значения среднего ΔT_{cp} и среднеквадратического отклонения $D(\Delta T_i)$ в распределении температур изоляторов на термограммах вычисляются по формулам (4) и (5):

$$\Delta T_{cp} = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \frac{1}{n}, \quad (4)$$

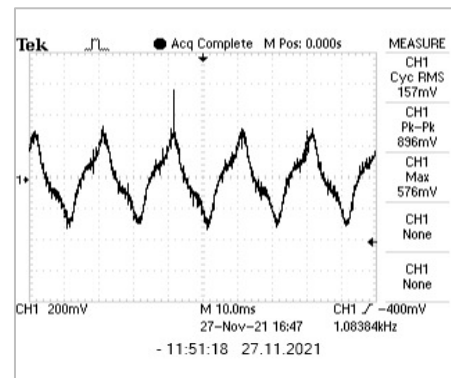
$$D(\Delta T_i) = \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 \frac{1}{n} - ((\Delta T_{cp})^2) \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где ΔT_i – разность температуры i -й области изолирующей конструкции с температурой окружающей среды, $n=1 \dots 3$ – общее число всех областей на изолирующей конструкции.

На рисунке 3 приведены примеры осциллограмм с видами тока утечки для гирлянды стеклянных изоляторов и полимерного изолятора.



A



B

Рис. 3. Примеры осциллограмм, характерных для неравномерного загрязнения раствором, содержащим 20 г. соли: А – для гирлянды стеклянных изоляторов (1 строка таб.); В – для полимерного изолятора (23 строка таб.)

Fig. 3. Examples of oscillograms characteristic of non-uniform contamination with a solution containing 20 g. of salt: A – for a garland of glass insulators (1 row tab.); B – for a polymer insulator (23 row tab.)

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

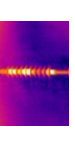
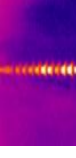
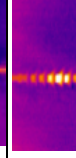
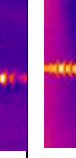
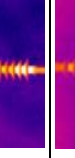
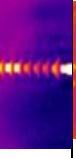
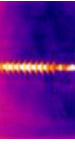
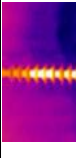
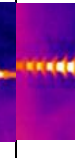
Результаты экспериментов

Объект	Способ загрязнения	Раствор	Способ подачи пара	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{гр}, ^\circ C$	$D(\Delta T), ^\circ C$	ESDD до	ESDD после	$I_{гр. ср.}, mA$	$I_{гр. мин.}, mA$								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12								
Гирлянда стеклянных изоляторов типа ПС-70Е	Неравномерное (нижняя часть нижней тарелки чистая)	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху и снизу	Нет		5,00	0,54	-	-	6,29	2,606								
						2,87	0,52	-	-	0,848	0,987								
			Сверху	Все изоляторы охлаждены	4,57	4,27	4,90	5,27	1,32	0,417	0,161	1,03	1,513						
														2,23	1,52	-	-	1,199	3,976
														7,13	2,96	-	-	0,987	1,679
														10,97	1,79	-	-	1,033	4,166
	Сверху	Нет	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Нет		11,37	2,59	-	-	1,397	9,534							
							4,40	1,31	-	-	1,662	5,779							
	Сверху	Все изоляторы охлаждены	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Все изоляторы охлаждены		4,30	1,24	-	-	0,90	4,576							

Продолжение таблицы

Объект	Способ загрязнения	Раствор	Способ подачи пыли	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{ср}$, °C	D(ΔT), °C	ESDD по	ESDD по п. 10	$I_{ут. ср.}$, МА	$I_{ут. мин.}$, МА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Гирлянда стеклянных изоляторов типа ПС-70Е	Равномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Все изоляторы охлаждены		9,77	0,69	0,0207	0,0106	1,1	3,894	
						8,97	4,53	0,0454	0,0179	1,248	17,931	
		5 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		6,03	5,35	0,037	0,0327	1,428	13,108	
						9,07	1,82	0,0217	0,0093	-	5,492	
	3 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	2 верхних изолятора охлаждены, подогрев снизу		6,40	3,01	-	-	1,089	6,018		
					3,93	1,09	-	-	0,547	0,804		
	40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Все изоляторы охлаждены		4,50	1,06	0,0279	0,0149	0,844	1,615		
					3,37	1,02	0,0031	0,0035	0,618	0,876		
	Чистый	-	Нет	Сверху	Нет		3,03	0,05	-	-	-	-
							2,80	0,14	-	-	0,445	0,835

Продолжение таблицы

Объект	Способ загрязнения	Раствор	Способ подачи пара	Доп. условия	Термограмма	$\Delta T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$D(\Delta T),$ $^\circ\text{C}$	ESDD по	ESDD после	$I_{\text{ут. ср.}}, \text{мА}$	$I_{\text{ут. лим.}}, \text{мА}$	
Полимерный изолятор типа ЛК-70 III	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	2	Неравномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Нет		3,06	0,97	-	-	0,342	0,413	
		Равномерное	20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Нет		2,55	0,72	-	-	0,266	0,847	
				Нет		2,12	1,03	-	-	0,236	1,366	
				Нет		3,70	0,96	-	-	0,435	0,814	
			20 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху и снизу	Подогрев оконцевателя изолятора		2,32	1,13	-	-	0,267	0,414
				Сверху	Нет		3,90	0,89	-	-	0,234	0,989
				Сверху	Нет		3,90	0,93	-	-	0,378	0,764
			10 г. соли, 40 г. каолина на 1 л. воды	Сверху	Подогрев оконцевателя изолятора		3,66	1,34	-	-	0,350	0,431
		Чистый	-	Сверху	Нет		1,19	0,52	-	-	0,150	0,150

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

На рисунках 4-7 значения среднего ΔT_{cp} и среднеквадратического отклонения $D(\Delta T_i)$ в распределении температур изоляторов на термограммах представлены в виде зависимостей от степени солёности загрязняющего раствора.

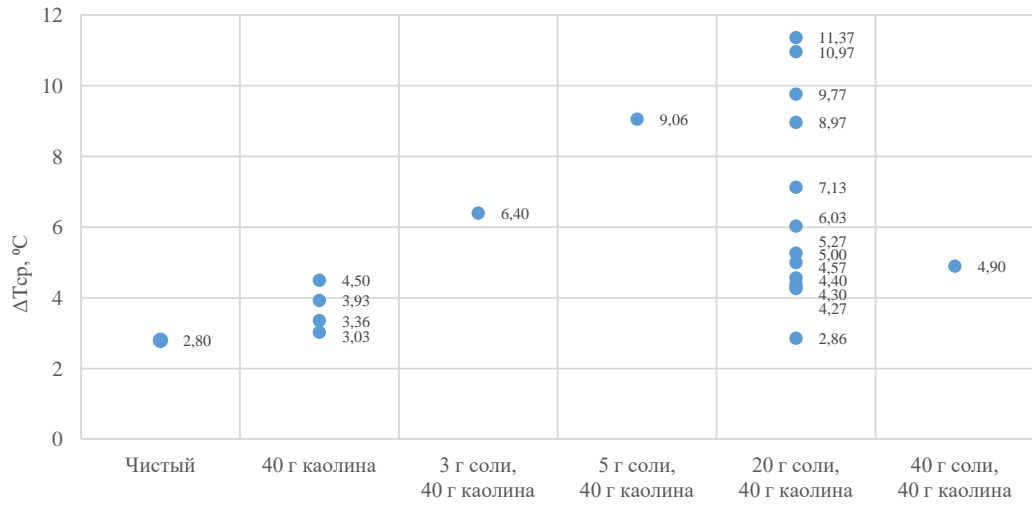


Рис. 4. График зависимости $\Delta T_{cp}, ^\circ C$ гирлянды стеклянных изоляторов от засолённости раствора *Fig. 4. Graph of dependence of $\Delta T_{ave}, ^\circ C$ of glass insulator garland on solution salinity*

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

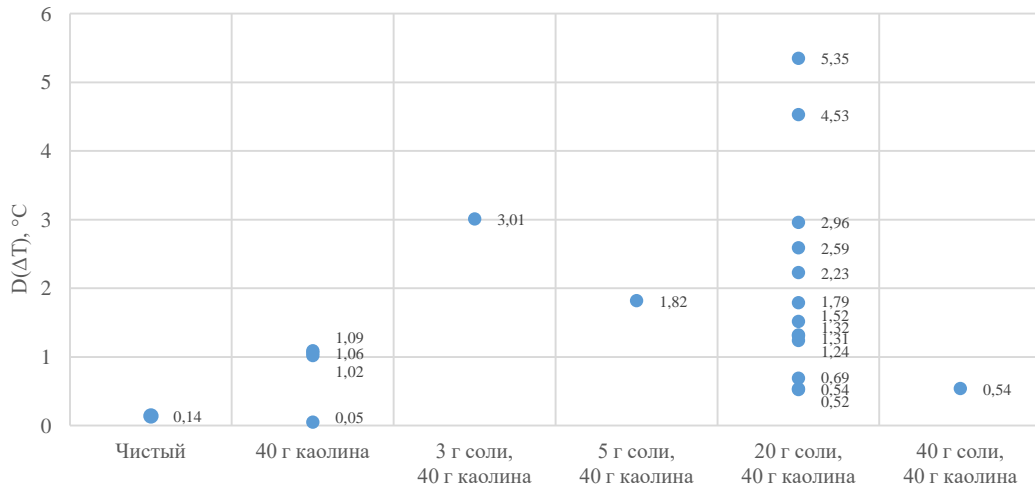


Рис. 5. График зависимости $D(\Delta T), ^\circ C$ гирлянды стеклянных изоляторов от засолённости раствора *Fig. 5. Graph of dependence of $D(\Delta T), ^\circ C$ of glass insulator garland on solution salinity*

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

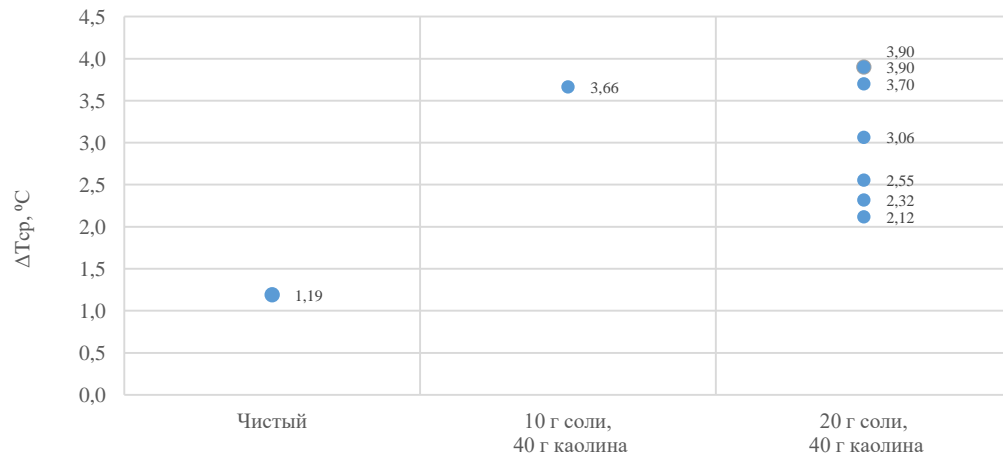


Рис. 6. График зависимости $\Delta T_{cp}, ^\circ C$ полимерного изолятора от засолённости раствора *Fig. 6. Graph of dependence of $\Delta T_{ave}, ^\circ C$ of polymer insulator on solution salinity of the polymer insulator*

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

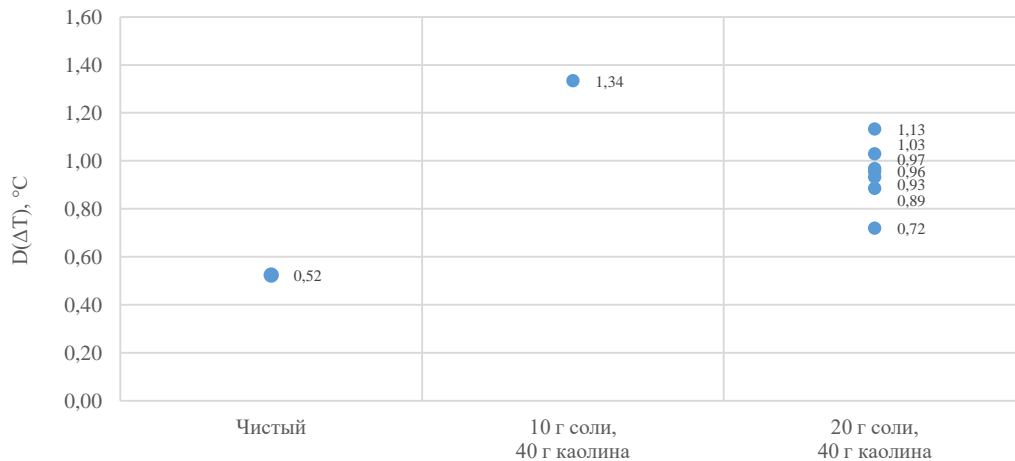


Рис. 7. График зависимости $D(\Delta T)$, °C полимерного изолятора от засоленности раствора *Fig. 7. Graph of dependence of $D(\Delta T)$, °C of polymer insulator on solution salinity*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Обсуждение (Discussions)

Из анализа термограмм, измерений и расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Анализ тепловизионных изображений показывает, что распределение температур вдоль изолирующей конструкции хаотично. Добиться равномерности загрязнения и смачиваний изоляторов сложно, что характерно и для внешних условий. Таким образом при анализе загрязнения по термограммам следует опираться на статистические характеристики (ΔT_{cp} , $D(\Delta T_i)$).

2. Для гирлянды изоляторов диапазон изменения ΔT_{cp} от 2,87 °C до 11,37 °C, а $D(\Delta T_i)$ от 0,54 °C до 5,35 °C. Характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении засоленности раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{cp} = 6,58$ °C, а без нее (только каолин) $\Delta T_{cp} = 3,71$ °C). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с 2,0 °C до 0,8 °C соответственно).

3. Для полимерного изолятора тепловые контрасты ниже (меньше общий ток). Так диапазон изменения ΔT_{cp} от 2,12 °C до 3,9 °C, а $D(\Delta T_i)$ от 0,72 °C до 1,34 °C. Также характерна тенденция к росту ΔT_{cp} при увеличении засоленности раствора (с солью в растворе средняя по экспериментам $\Delta T_{cp} = 3,15$ °C, а чистого $\Delta T_{cp} = 1,19$ °C). $D(\Delta T_i)$ средняя по экспериментам также изменяется примерно в той же пропорции (с 1,0 °C до 0,52 °C соответственно).

4. В ходе экспериментов не было выявлено существенной разницы в результатах при равномерном и неравномерном предварительном загрязнении, а также манипуляциях с охлаждением изоляторов и нагревом оконцевателя. Вероятной причиной этого является то, что данные воздействия оказывают лишь временный эффект. В ходе часового эксперимента за счет увлажнения происходит выравнивание химических и тепловых неоднородностей. Это подтверждается наблюдениями за разрядной деятельностью и электрическими измерениями, проводившимися в ходе тех же экспериментов и описанными в статье ранее [18].

В целом легко загрязненную гирлянду и полимерный изолятор ($ESDD < 0,046$ мг/см²) можно отличить от незагрязненной как по термограмме, так и по вычисленным значениям ΔT_{cp} и $D(\Delta T_i)$.

Выводы (Conclusions)

Эксперименты показали, что с помощью тепловизора можно диагностировать загрязнение изолирующих конструкций ВЛ и подстанций. Необходимое условие - хорошее смачивание поверхности изоляторов при высокой относительной влажности, в тумане или росой. Данные условия возникают во внешней среде, где работают изоляторы периодически в весенне-летне-осенний период. Однако, поскольку предугадать время выпадения конденсата на поверхность практически сложно, необходимы системы непрерывного контроля. Десяток непрерывно работающих тепловизоров, установленных на опоры ВЛ в определенном районе, могут дать достаточную информацию для обслуживающего персонала сетей о состоянии загрязнения изоляции отдельной линии и района.

Методика оценки загрязнения изоляции может быть следующий:

1. Выделение на термограмме всех изоляторов в гирлянде или отдельных стержневых и опорных изоляторов;

2. Вычисление среднего и среднеквадратического отклонения в распределении температур точек в выделенных зонах.

3. Определение загрязненной изоляции по превышению полученных значение среднего или среднеквадратического отклонений температур над значениями для чистой изоляции, снятой в тех же условиях.

Более точные результаты будут получены при статистической обработке совокупности термограмм изолирующих конструкций от разных тепловизоров, полученных в одно время.

Процесс по данному алгоритму может быть автоматизирован и использоваться при разработке онлайн систем тепловизионного контроля оборудования ВЛ и подстанций, которые находят все более широкое применений.

Литература

1. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).

2. Investigating Unexplained Reclosures on Power Grid [Электронный ресурс] // INMR [Сайт]. [2023]. URL: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures/> (дата обращения: 22.08.2024).

3. Vapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system // 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). – IEEE, 2020. – С. 1-6

4. Maraaba L. et al. Contamination level monitoring techniques for high-voltage insulators: a review //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 20. – С. 7656.

5. Базанов В. П., Спирин М. В., Тураев В. А. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35-220 кВ // Энергетик. – 2000. – №. 4. – С. 16-17.

6. Титов Д. Е. и др. К вопросу диагностики линейной изоляции // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – №. 6. – С. 114-120.

7. Yuan H. et al. State detection of electrical equipment based on infrared thermal imaging technology //Pattern Recognition and Computer Vision: Second Chinese Conference, PRCV 2019, Xi'an, China, November 8–11, 2019, Proceedings, Part I 2. – Springer International Publishing, 2019. – С. 251-260.

8. Галиева Т.Г., Иванов Д.А., Садыков М.Ф., Андреев Н.К., Хамидуллин И.Н. Метод и устройство диагностики состояния высоковольтных изоляторов на основе непрерывной регистрации пространственного уровня электромагнитного излучения частичных разрядов. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(4):165-177. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>

9. Wang Y., Yin Y., Ren J. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image // Advances in Mechanical engineering. – 2019. – Т. 11. – №. 4. – С. 1687814019828551.

10. Астапова М. А., Лебедев И. В. Обзор подходов к детектированию дефектов элементов ЛЭП на изображениях в инфракрасном, ультрафиолетовом и видимом спектрах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – Т. 8. – №. 4. – С. 38-39.

11. Ullah I. et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment // Energies. – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 392.

12. Chou Y. C., Yao L. Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography // 2009 international conference of soft computing and pattern recognition. – IEEE, 2009. – С. 155-160.

13. Zhao H. Q. Infrared weak and small target extraction algorithm based on regional feature segmentation // Laser Infrared. – 2016. – Т. 46. – С. 308-312.

14. Lu X. G. An efficient infrared target extraction algorithm combined with radiation features // Laser Infrared. – 2016. – Т. 46. – С. 634-638.

15. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 288. – С. 01070.

16. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Критерии выявления дефектов оборудования для тепловизионной системы контроля электрической подстанции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017;19(5-6):51-57. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>

17. Зарипов Д.К. Лопухова Т.В. Метод дистанционной диагностики высоковольтной изолирующей конструкции. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2006;3-4:56-60.

18. Zaripov D. K., Zakirov D. F., Zakharov A. V. Dynamics of development of discharges on the

contaminated surface of insulators in the process of wetting as a diagnostic sign // Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023). – SPIE, 2024. – Т. 12986. – С. 149-155.

19. Зарипов Д.К., Насибуллин Р.А., Закиров Д.Ф., Захаров А.В. Исследование работы полимерного изолятора при увлажнении искусственным туманом. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023;25(5):20-29. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>

20. Insulator L. Minimum test requirements for non-ceramic insulators //IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – №. 2. – С. 882-890.

Авторы публикации

Зарипов Дамир Камилевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). dzaripov@list.ru

Закиров Динар Файзелханович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). qwerty2014dinar@gmail.com

Тарасов Богдан Павлович – аспирант Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). tarasovbogdanpav@mail.ru

Миронова Елена Анатольевна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электрические станции им. В.К. Шибанова» (ЭС), Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ). mironova.energo@yandex.ru

Насибуллин Рустем Анасович – канд. техн. наук, главный специалист ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». nasrus@yandex.ru

References

1. Research Provided Insight into Unexplained Line Outages. In: INMR; 2023. Available at: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures>. Accessed: 22.08.2024.

2. Investigating Unexplained Reclosures on Power Grid. In: INMR; 2023. Available at: <https://www.inmr.com/analyzing-unexplained-reclosures>. Accessed: 22.08.2024.

3. Bapin Y. et al. Outage data analysis of the overhead transmission lines in kazakhstan power system. 2020 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). IEEE, 2020, pp. 1-6

4. Maraaba L. et al.; Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. Energies 2022.15(20):7656.

5. Bazanov V. P., Spirin M. V., Turaev V. A.; Ul'trazvukovoj metod kontrolya farforovoj izolyacii vozdushny`x linij e`lektroperedachi 35-220 kV. Energetik. 2000. 4:16-17 (In Russ.).

6. Titov D. E. et al. K voprosu diagnostiki linejnoj izolyacii. E`lektroe`nergiya. Peredacha i raspredelenie. 2017;6:114-120 (In Russ.).

7. Yuan H. et al. State detection of electrical equipment based on infrared thermal imaging technology. Pattern Recognition and Computer Vision: Second Chinese Conference, PRCV 2019, Xi'an, China, November 8–11, 2019, Proceedings, Part I 2. – Springer International Publishing, 2019. pp. 251-260.

8. Galieva T.G., Ivanov D.A., Sadykov M.F., Andreev N.K., Khamidullin I.N. Methodology and device for diagnostics of high-voltage insulators based on continuous recording of the spatial level of electromagnetic radiation of partial discharges. Power engineering: research, equipment, technology. 2022;24(4):165-177. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-4-165-177>

9. Wang Y., Yin Y., Ren J. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image. Advances in Mechanical engineering. 2019.11(4):1-14.

10. Astapova M. A., Lebedev I. V. Obzor podxodov k detektirovaniyu defektov e`lementov LE`P na izobrazheniyax v infrakrasnom, ul`trafioletovom i vidimom spektrax. Modelirovanie, optimizaciya i informacionny`e tehnologii. 2020. 8(4):38-39 (In Russ.).

11. Ullah I. et al. Deep learning image-based defect detection in high voltage electrical equipment. Energies. 2020.13(2): 392.

12. Chou Y. C., Yao L. Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography. 2009 international conference of soft computing and pattern recognition. IEEE; 2009. pp. 155-160.

13. Zhao H. Q. Infrared weak and small target extraction algorithm based on regional feature segmentation. *Laser Infrared*. 2016.46:308-312.

14. Lu X. G. An efficient infrared target extraction algorithm combined with radiation features. *Laser Infrared*. 2016.46:634-638.

15. Zariyova A., Zariyov D., Usachev A. Investigation of the algorithm to find defects in high-voltage insulators for an automated thermal imaging control system. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences. 2021. 288:01070.

16. Zariyova A.D., Zariyov D.K., Usachev A.E. Criteria for equipment defects for thermal power substation control system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(5-6):51-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-5-6-51-57>

17. Zariyov D.K., Lopuxova T.V. Method of remote diagnostics of high-voltage insulating construction. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2006; 3-4:56-60. (In Russ.)

18. Zariyov D.K., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Dynamics of development of discharges on the contaminated surface of insulators in the process of wetting as a diagnostic sign. *Third International Scientific and Practical Symposium on Materials Science and Technology (MST-III 2023)*. SPIE, 2024; 12986:149-155.

19. Zariyov D.K., Nasibullin R.A., Zakirov D.F., Zakharov A.V. Study of operation of a polymer insulator under uniform and non-uniform contamination. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(5):20-29. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-20-29>

20. Insulator L. Minimum test requirements for non-ceramic insulators. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1981. 2:882-890.

Authors of the publication

Damir K. Zariyov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. dzariyov@list.ru

Dinar F. Zakirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. qwerty2014dinar@gmail.com

Bogdan P. Tarasov – Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russia. tarasovbogdanpav@mail.ru

Elena A. Mironova – Kazan State Power Engineering University. Kazan, Russia. mironova.energo@yandex.ru

Rustem A. Nasibullin – Public Joint Stock Company Krasnogorskij Zavod named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, Russia. nasrus@yandex.ru

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

Получено **03.10.2024 г.**

Отредактировано **11.11.2024 г.**

Принято **18.11.2024 г.**



УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Кочеткова А.А.

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

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* При строительстве дорог, подготовке фундаментов для высотных зданий необходима информация о таком важном параметре, как плотность скелета грунта – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Точное определение этого параметра является важной задачей, поскольку данный параметр имеет нелинейную зависимость от влажности. Следовательно, в узком диапазоне изменения влажности, плотность скелета грунта становится максимальной, что делает такой грунт наиболее благоприятным для проведения строительных работ. **ЦЕЛЬ.** Разработать автономное устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях. **МЕТОДЫ.** Для разработки устройства измерения влажности грунта использовался диэлькометрический метод. Это косвенный метод измерения влажности веществ, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости этих веществ от их влажности. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Было разработано автономное устройство определения влажности грунта использующее диэлькометрический метод, предназначенное для использования в полевых условиях, что значительно ускоряет процесс анализа и обработки результатов измерения, а, следовательно, и процесс обработки информации о состоянии грунта. В ходе проекта были проведены эксперименты по измерению емкости в зависимости от влажности и температуры на различных частотах от 100 Гц до 100 кГц в различных типах грунтов. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Было разработано устройство определения влажности грунта и предложена методика определения влажности и плотности скелета грунта диэлькометрическим методом, проведены предварительные эксперименты. Однако в ходе экспериментов обнаружилась зависимость от температуры для низких частот, поэтому необходима дополнительная калибровка по температуре.

Ключевые слова: влажность грунта; плотность скелета грунта; диэлектрическая проницаемость; диэлькометрический (емкостной) метод.

Для цитирования: Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В., Иванов Д.А., Галиева Т.Г., Кочеткова А.А. Устройство для измерения влажности грунта в полевых условиях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 20-29. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-20-29.

A DEVICE FOR MEASURING SOIL MOISTURE IN THE FIELD

Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Galieva T.G., Kochetkova A.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
sadykov@kgeu.ru

Abstract: *RELEVANCE.* When building roads, preparing foundations for high-rise buildings, information is needed about such an important parameter as the density of the soil skeleton – the ratio of the mass of soil particles to the volume of the sample of an undisturbed structure. The precise determination of this parameter is an important task, since this parameter has a nonlinear dependence on humidity. Consequently, in a narrow range of humidity changes, the density of the soil skeleton becomes maximum, which makes such a soil the most favorable for construction work. **PURPOSE.** To develop an autonomous device for measuring soil moisture in the field. **METHODS.** The dielkometric method was used to develop a device for measuring soil moisture. This is an indirect method for measuring the humidity of substances based on the dependence of the dielectric constant of these substances on their humidity. **RESULTS.** An autonomous device for

determining soil moisture using the dielkometric method has been developed, designed for use in the field, which significantly speeds up the process of analyzing and processing measurement results, and, consequently, the process of processing information about the state of the soil. During the project, experiments were carried out to measure capacity depending on humidity and temperature at various frequencies from 100 Hz to 100 kHz in various types of soils. CONCLUSION. A device for determining soil moisture was developed and a method for determining the moisture and density of the soil skeleton by the dielkometric method was proposed, preliminary experiments were conducted. However, during the experiments, a temperature dependence was found for low frequencies, so additional temperature calibration is necessary.

Keywords: soil moisture; density of the soil skeleton; dielectric constant; the dielkometric (capacitive) method.

For citation: Sadykov M.F., Golenishchev-Kutuzov A.V., Ivanov D.A., Galieva T.G., Kochetkova A.A. A device for measuring soil moisture in the field. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 20-29. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-20-29.

Введение (Introduction)

В действующей нормативной технической литературе контроль качества уплотнения насыпных грунтов основан на анализе коэффициента уплотнения грунта либо плотности сухого грунта [1, 2]. Данная методика весьма трудоемка из-за необходимости определения максимальной плотности и оптимальной влажности. В то же время за рубежом активно применяются методы экспресс-контроля качества уплотнения грунтов основания, причем данные методы основаны на анализе деформационных характеристик грунта [3, 4]. В связи с этим актуальным является исследование методов экспресс-контроля для снижения трудоемкости работ по контролю качества уплотнения грунтов [5, 6].

Прочность, надежность и долговечность дорожного покрытия в большой степени зависят от плотности скелета грунта – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Его рассчитывают для того, чтобы определить: предполагаемую усадку, потребность в дополнительном уплотнении, допустимую нагрузку [7, 8]. Данный параметр имеет нелинейную зависимость от влажности. Следовательно, в узком диапазоне влажности плотность скелета грунта становится максимальной, что делает такой грунт наиболее благоприятным для проведения строительных работ [9].

Влажность грунта – отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы. Его рассчитывают для того, чтобы определить: предполагаемую усадку, потребность в дополнительном уплотнении, допустимую нагрузку. Известные методы измерения влажности грунта, в соответствии с ГОСТ 5180-2015¹, производятся путем отбора грунта, предварительно подготовленного и взвешенного (масса 15-50 грамм), помещая в заранее высушенный и пронумерованный стаканчик, после чего производится ряд действий для определения гигроскопической влажности грунта, путем помещения образца в нагретый сушильный шкаф при температуре 105 ± 2 °C на 3 часа, с последующим взвешиванием. Разность грунта до и после высушивания позволит определить количество выпаренной влаги. После чего, в соответствии с ГОСТ 5180-2015, можно определить процент влажности грунта.

Разработанное нами устройство использует диэлькометрический (емкостной) метод, который основан на корреляционной зависимости диэлектрической проницаемости материала от содержания в нем влаги при положительных температурах, в соответствии с ГОСТ 21718-84² «Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности».

Разработанное нами устройство является автономным, предназначенным для испытаний в полевых условиях, следовательно, необходимость в транспортировке образцов отпадает, что значительно убыстряет процесс анализа и обработки результатов измерения, а также процесс обработки информации о состоянии грунта.

Понимая важность определения влажности для контроля состояния грунтов различного состава в нашей стране и за рубежом, разрабатываются подобные устройства [10-12].

Основными недостатками известных устройств являются: высокая погрешность измерения, в связи с тем, что устройства реализуют измерения влажности с помощью

стержня или блока сорбции, погружаемых в грунт, который, в свою очередь, имеет разную плотность.

Материалы и методы (Materials and methods)

Устройство определения влажности грунта основано на диэлькометрическом методе. Диэлькометрический метод – метод косвенного измерения влажности веществ, основанный на зависимости диэлектрической проницаемости этих веществ от их влажности.

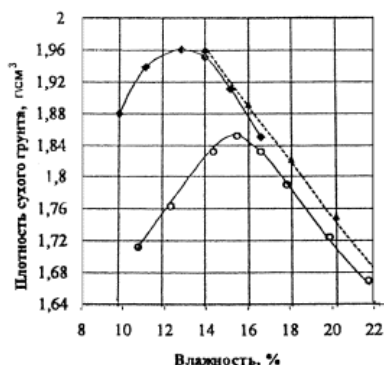


Рис. 1. Зависимость плотности сухого грунта от влажности¹ Fig. 1. Dependence of dry soil density on humidity¹

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

Диэлькометрический (емкостной) метод основан на особых электрических свойствах воды. Вода обладает целым рядом особенностей строения и свойствами, отличающими ее от других веществ. Одним из аномальных свойств воды является очень высокая диэлектрическая проницаемость. Диэлектрическая проницаемость свободной воды $\epsilon \sim 80$. У большинства твердых веществ $\epsilon < 10$, у жидкостей $\epsilon < 10...20$. Диэлектрическая проницаемость воды зависит от ее состояния. При связывании вода теряет подвижность в электрическом поле и ее диэлектрическая проницаемость уменьшается. У химически связанной воды $\epsilon = 4...4,9$.

Влажный материал условно может быть представлен как двухкомпонентная смесь с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{общ}$. Для расчета композиционных диэлектриков (смесей) воспользуемся формулой Лихтенеккера, которая для двухкомпонентных смесей имеет вид:

$$\epsilon_{общ} = \rho_v \epsilon_v + \rho_c \epsilon_c, \tag{1}$$

где ϵ_v и ϵ_c – диэлектрические проницаемости воды и сухого материала соответственно; ρ_v и ρ_c – объемные концентрации воды и сухого материала соответственно.

Сумма объемных концентраций удовлетворяет условию:

$$\rho_v + \rho_c = 1. \tag{2}$$

Первичный преобразователь предлагаемого устройства представляет собой конденсатор. Емкость конденсатора C зависит от диэлектрической проницаемости вещества, находящегося между электродами конденсатора:

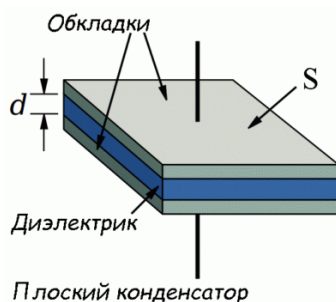


Рис. 2. Схема конденсатора Fig. 2. Capacitor circuit

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

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \tag{3}$$

¹ ГОСТ 5180-2015 «Методы лабораторного определения физических характеристик»

² ГОСТ 21718-84 «Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности»

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика между обкладками конденсатора; S – площадь обкладок конденсатора; d – расстояние между обкладками конденсатора.

Зная геометрию конденсатора (то есть площадь обкладок и расстояние между ними), электрическую постоянную заменим все известные параметры на коэффициент k . Измерив емкость конденсатора, можно вычислить диэлектрическую проницаемость по формуле:

$$\epsilon_{\text{общ}} = \frac{C}{k}. \quad (4)$$

Используя формулы (1), (2) и (3), составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \epsilon = \rho_e \epsilon_e + \rho_c \epsilon_c \\ \rho_e + \rho_c = 1 \end{cases}. \quad (5)$$

В ходе проведения экспериментов с грунтами различной влажности проводились измерения его емкости, что является базой данных для опытных испытаний.

Плотность скелета грунта (ρ_a) – отношение массы частиц грунта к объему образца ненарушенной структуры. Расчет плотности скелета грунта производится следующим образом:

$$\rho_a = \frac{\rho}{1+W}, \quad (6)$$

где ρ – плотность грунта, г/см³; W – влажность грунта (в долях единицы).

Нами было разработано устройство определения влажности грунта использующее диэлькометрический метод, являющееся автономным и предназначенным для использования в полевых условиях.



Рис. 3. Блок-схема разработанного устройства Fig. 3. Block diagram of the developed device

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

Принцип работы устройства заключается в следующем:

1. В специальный отсек засыпается образец (грунт).
2. С помощью измерительного устройства вычисляется емкость грунта.
3. Микроконтроллерная обработка вычисляет влажность и плотность скелета грунта по описанной выше методике.

Результаты выводятся на блок индикации.

Лабораторное устройство состоит из измерительной ячейки с образцами, измерительного устройства (RLC-метр), блока индикации. Измерительная ячейка (2) состоит из шести отсеков для опытных образцов (рис. 4), каждый отсек контактирует с двумя пластинами текстолита, выполняющих функцию электродов конденсатора. Грунт помещается в отсек, а центральная перегородка служит для создания дополнительной прочности. Измерительное устройство RLC-метр присоединяется к проводам, припаянным к металлизированной части текстолита. Полученная с него информация о емкости передается на микроконтроллер, после чего обрабатывается и передается на блок индикации.



Рис. 4. Лабораторное устройство:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1 – измерительная блок с образцами; | 1 – measuring unit with samples; |
| 2 – измерительное устройство (RLC-метр); | 2 – measuring device (RLC meter); |
| 3 – блок индикации | 3 – display unit |

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

Результаты (Results)

В ходе выполнения работы были проведены эксперименты по измерению емкости в зависимости от влажности и температуры на различных частотах от 100 Гц до 100 кГц.

Исходные данные:

Влажность грунта: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%.

Частота измерений: 100Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц.

Температура грунта: 24°C; 18°C.

На рисунке 5 представлены зависимости емкости (пФ) от влажности грунта (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%) для различных частот (100Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц) при температуре грунта 24°C.

На рисунке 6 представлены зависимости емкости (пФ) от влажности грунта (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%) для различных частот (100Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц) при температуре грунта 18°C.

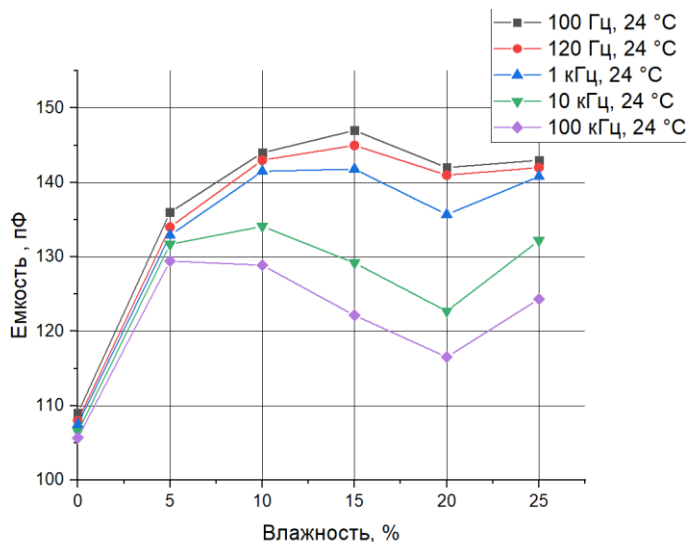


Рис. 5. Зависимости емкости от влажности для различных частот при температуре 24°C

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

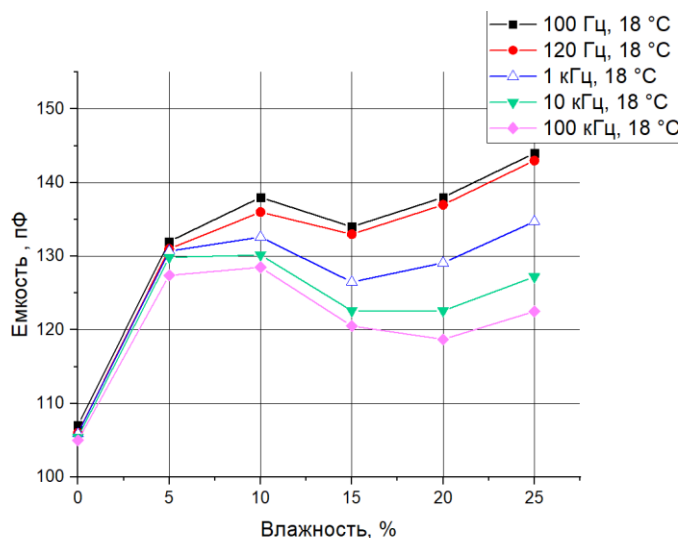


Рис. 6. Зависимости емкости от влажности для различных частот при температуре 18°C

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

На рисунках 7-11 представлены зависимости емкости от влажности на различных частотах отдельно при температурах 24°C и 18°C.

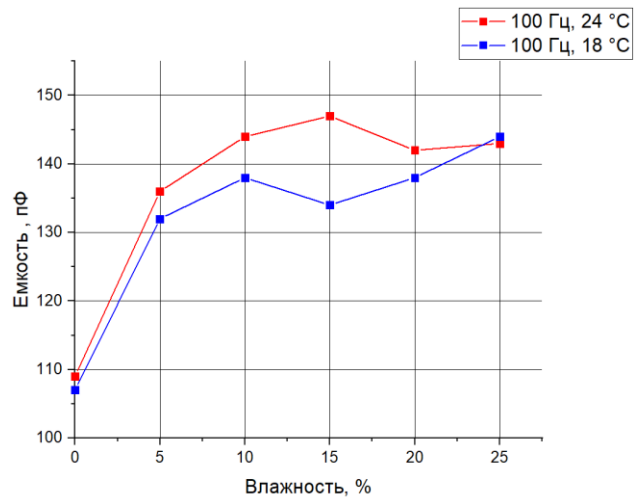


Рис. 7. Зависимость емкости от влажности на частоте 100 Гц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 7. Dependence of the capacity on humidity at a frequency of 100 Hz at temperatures of 24°C and 18°C

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

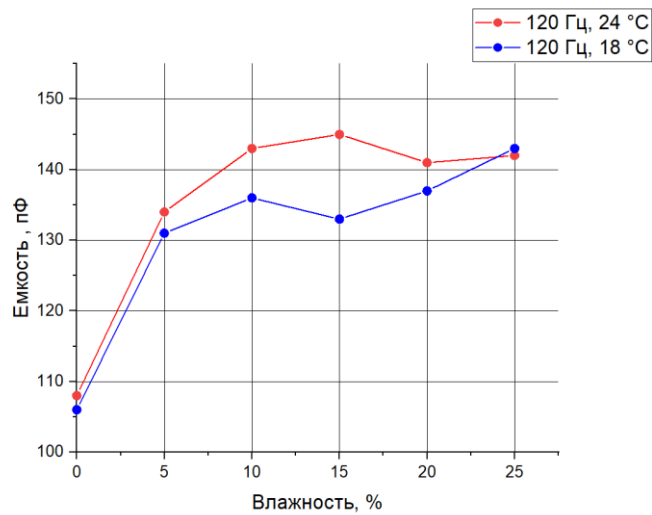


Рис. 8. Зависимость емкости от влажности на частоте 120 Гц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 8. Dependence of the capacity on humidity at a frequency of 120 Hz at temperatures of 24°C and 18°C

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

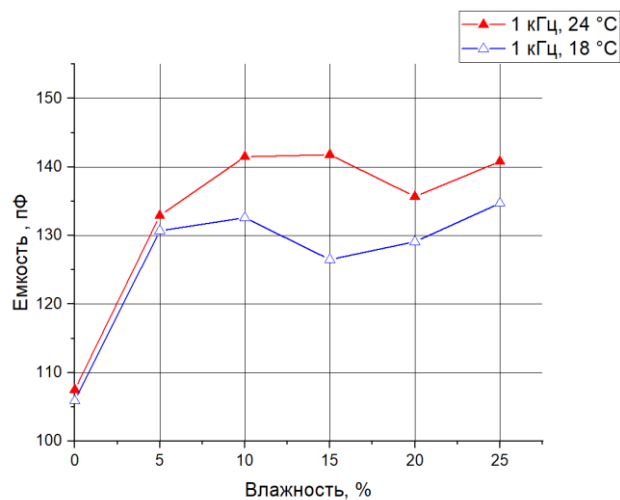


Рис. 9. Зависимость емкости от влажности на частоте 1 кГц при температурах 24°C и 18°C

Fig. 9. Dependence of capacity on humidity at a frequency of 1 kHz at temperatures of 24°C and 18°C

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

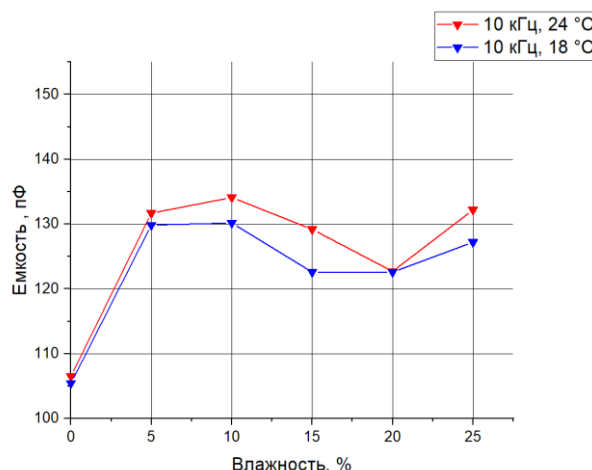


Рис. 10. Зависимость емкости от влажности на частоте 10 кГц при температурах 24°C и 18°C

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

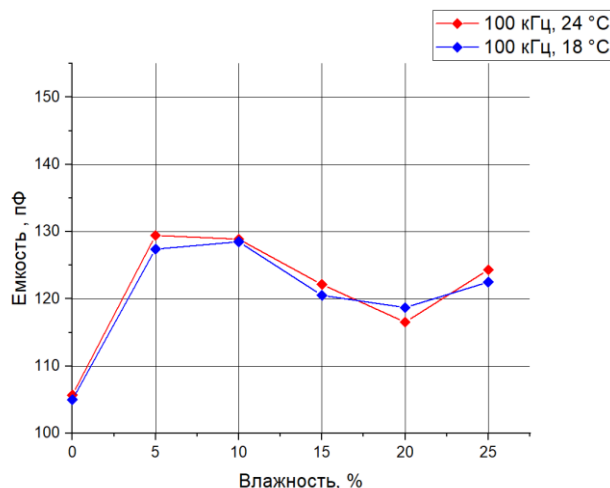


Рис. 11. Зависимость емкости от влажности на частоте 100 кГц при температурах 24°C и 18°C

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

Из графиков можно сделать вывод, что на низких частотах (100 Гц-1 кГц) прослеживается температурная зависимость в среднем при 7-20% влажности.

На высоких частотах (10 и 100 кГц) температурная зависимость выражена слабо, есть экстремум на 5-10% влажности.

Заключение (Conclusions)

Нами был разработан лабораторный стенд и предложена методика определения влажности грунта диэлькометрическим методом. После проведения ряда измерений емкости образцов с известными (неизменными) размерами было установлено, что изменение емкости связано с диэлектрической проницаемостью, которая, в свою очередь, коррелирует с влажностью. Эксперименты проводились на различных частотах.

В ходе исследования было установлено, что на высоких частотах зависимость от температуры выражена слабо, однако есть экстремум на 5-10%. Для совокупного анализа и однозначного определения исследования проводились на низких частотах. На рисунке 6 видна разница значений емкости при 100 Гц (черный график) и при 100 кГц (розовый график), что показывает линейную зависимость от влажности. Погрешность прибора 1%.

Таким образом, в ходе исследования установлена работоспособность метода, но также обнаружена невозможность измерения емкости традиционным диэлькометрическим методом с большой влажностью образца, т.е. устройство показывает верные результаты при малой концентрации воды.

Литература

1. Сазонова С.А., Румянцев С.Д. Применение экспресс-методов для определения характеристик насыпных грунтов // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 113–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.
2. Сазонова С.А., Пономарев А.Б. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 109–116.
3. В. А. Шадских, В. Е. Кижаяева, В. О. Пешкова, И. А. Шушпанов, З. Ф. Иванищева, Е. С. Смирнов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 1(33), Перспективы использования влагомера для оперативного определения влажности почвы, 2019.
4. Fleming P.R., Frost M.W., Lambert J.P. A review of the lightweight deflectometer (lwd) for routine insitu assessment of pavement material stiffness.
5. Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Бондарев А.Б., Берестовой А.А., Микова Е.Ю., Яровенко А. А. Комплексный метод измерения теплофизических характеристик грунтов земляного полотна автомобильной дороги, журнал СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ, 2023 г. № 4. с.34-37.
6. Kopf F., Adam D., Paulmichl I. Investigation of the dynamic plate loading test with the light-weight deflectometer using the boundary element // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf (дата обращения: 10.03.2024).
7. Maria J.S. The application of the modern method of embankment compaction control // Journal of Civil Engineering and Management. – 2004. – Vol. X, suppl. 1. – P. 45–50.
8. Fleming P.R., Frost M.W., Lambert J.P. A review of the lightweight deflectometer (lwd) for routine insitu assessment of pavement material stiffness. TIC service group, available at: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf (дата обращения: 11.03.2024).
9. Use of the light weight deflectometer (lwd) at highland valley copper mine / K. Neil Singh [et al.] // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf (дата обращения: 15.03.2024).
10. Пономарев А.Б., Сазонова С.А., Румянцев С.Д. О современных методах экспресс-контроля характеристик насыпных грунтов. Журнал геотехника Учредители: 2017г., №3, с. 4-8.
11. Александрова Н.П., Семенова Т.В. Совершенствование методов экспресс-контроля уплотнения грунтов в земляном полотне лесных дорог. Часть 1. Обобщающая математическая модель // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6-2(48). С. 10-14.
12. Панкова, Т. А. Применение современных методов определения влажности почвы / Т. А. Панкова // Научная жизнь. – 2016. – № 4. – С. 130–137.
13. Study of the precision farming with soil maps describing environmental load using a real-time soil sensor / H. Umeda, S. Shibusawa, T. Okayama, D. Y. Sakuma, T. Kaho, K. Ninomiya // J. Japan. Soc. Agr. Mach. – 2011. – Vol. 73, № 1. – P. 37–44.
14. Аскеров К.А., Мардахаев А.В., Хидиров А.Ш. О диэлькометрическом методе измерения влажности почвы (TDR метод) DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122 Вестник Азербайджанской инженерной академии 2022, т. 14, №3, с. 104-122.
15. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., and Friedman S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone J., vol. 2, pp 444–475, 2003 (in English)
16. Rothe A., Weis W., Kreutzer K., Matthies D., Hess U., Ansorge B. Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture // Water Resour. Res., vol. 33, iss. 7, pp 1585-1593, 1997.

Авторы публикации

Садыков Марат Фердинантович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6816-0148>. sadykov@kgeu.ru

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7334-7775>. alex.kutuzov@mail.ru

Иванов Дмитрий Алексеевич – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная электроника» (ПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453> Ivanov.da@mail.ru

Галиева Татьяна Геннадьевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5244-1110> 79534929817@ya.ru

Кочеткова Азалия Адиповна – инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Беспилотные и робототехнические платформы в энергетике» (НИЛ БРПЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). azalkakarimova.16@mail.ru

References

1. Sazonova S.A., Rumyantsev S.D. Application of express methods for determining the characteristics of bulk soils // Bulletin of PNRPU. Construction and architecture. - 2017. – Vol. 8, No. 3. – pp. 113-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2017
2. Sazonova S.A., Ponomarev A.B. On some results of studies of bulk soils // Izv. vuzov. Construction. – 2016. – № 2 (686). – Pp. 109-116.
3. V. A. Shadskikh, V. E. Kizhaeva, V. O. Peshkova, I. A. Shushpanov, Z. F. Ivanishcheva, E. S. Smirnov // Scientific Journal of the Russian Research Institute of Problems of Land Reclamation, No. 1(33), Prospects of using a moisture meter for the operational determination of soil moisture, 2019.
4. Fleming P.R., Frost M.V., Lambert J.P. Overview of a lightweight deflectometer (LWD) for routine assessment of the stiffness of pavement material in situ.
5. Bryukhovetsky A.N., Skrypnikov A.V., Bondarev A.B., Berestovoy A.A., Mikova E.Yu., Yarovenko A.A. An integrated method for measuring the thermophysical characteristics of soils of the roadbed, journal CONSTRUCTION AND ROAD MACHINERY, 2023 No. 4. pp.34-37.
6. Kopf F., Adam D., Paulmichl I. Investigation of dynamic plate loading using a light deflectometer using a boundary element // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2011/11/Investigation_of_ZFG_2000_using_Boundary_Element_Method.pdf (accessed: 07/10/2024).
7. Maria Y.S. Application of the modern method of control of embankment compaction // Journal of Civil Engineering and Management. - 2004. – Volume X, Supplement 1. – pp. 45-50.
8. Fleming P.R., Frost M.V., Lambert J.P. Review of a lightweight deflectometer (lwd) for routine assessment of the stiffness of the pavement material in place. TIC Service Group, available at: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/2007_uk_portable_fwd_evaluation.pdf (date of reference: 03/11/2024).
9. The use of a light deflectometer (lwd) at the Highland Valley copper mine / K. Neil Singh [et al.] // TIC service group. – URL: http://www.ticservicegroup.com.au/wp-content/uploads/Use_of_the_Light_Weight_Deflectometer.pdf (date of application: 03/15/2024).
10. Ponomarev A.B., Sazonova S.A., Rumyantsev S.D. On modern methods of express control of the characteristics of bulk soils. Journal of Geotechnics Founders: 2017, No.3, pp. 4-8.
11. Alexandrova N.P., Semenova T.V. Improvement of methods of express control of soil compaction in the roadbed of forest roads. Part 1. Generalizing mathematical model // International Scientific Research Journal. 2016. No. 6-2(48). pp. 10-14.
12. Pankova, T. A. Application of modern methods for determining soil moisture / T. A. Pankova // Scientific life. - 2016. – No. 4. – pp. 130-137.
13. Research of precision agriculture using soil maps describing the environmental load using a soil sensor in real time / H. Umeda, S. Shibusawa, T. Okayama, D. Y. Sakuma, T. Kaho, K. Ninomiya // Japan. Sokr. agr. Max. – 2011. – Vol. 73, No. 1. – pp. 37-44.
14. Askerov K.A., Mardadaev A.V., Idirrov A.Sh. On the digital method of measuring air humidity (TDR method) DOI: 10.52171/2076-0515_2022_14_03_104_122 Bulletin of the Azerbaijan Academy of Sciences 2022, vol. 14, No. 3, pp. 104-122.
15. Robinson D.A., Jones S.B., Reith J.M., Or D. and Friedman S.P. Review of achievements in the field of measuring dielectric and electrical conductivity in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone J., volume 2, pp. 444-475, 2003 (in English)
16. Roth A., Weiss V., Kreutzer K., Mattis D., Hess U., Ansorg B. Changes in soil structure caused by the installation of reflectometric sensors in the time domain and their effect on soil moisture measurement // Water Resources. Res., volume 33, volume 7, pp. 1585-1593, 1997.

Authors of the publication

Marat F. Sadykov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6816-0148>. sadykov@kgeu.ru

Aleksander V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7334-7775>. alex.kutuzov@mail.ru

Dmitriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1344-7453>. Ivanov.da@mail.ru

Tatyana G. Galieva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5244-1110>. 79534929817@ya.ru

Azaliya A. Kochetkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. azalkakarimova.16@mail.ru

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

Получено **15.04.2024 г.**

Отредактировано **30.07.2024 г.**

Принято **15.11.2024 г.**



STUDY OF THE PRESENCE OF PRO-OXIDATIVE PROPERTIES IN PHENOLIC OXIDATION INHIBITORS IN RELATION TO MODERN TRANSFORMER OILS

Garifullin M.Sh.¹, Slobodina Y.N.¹, Bikzinurov A.R.¹, Giniatullin R.A.², Chernyshov V.A.³

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

³Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>, g_marsels@mail.ru

yulya_slobodina@mail.ru

mr.azat780@mail.ru

g_ruslan7@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5955-5540>, blackseam78@mail.ru

Abstract: ACTUALITY. In the community of Russian specialists servicing oil-filled transformers, there is an established opinion that when the concentration of the phenolic oxidation inhibitor Ionol (DBPC) in the oil drops below 0.1% (wt.), the transformer oil begins to oxidize faster than in the absence of Ionol. This is the so-called "pro-oxidizing effect" described in 1968. Modern hydrocracking transformer oils differ significantly from the former oils in terms of hydrocarbon composition, but the opinion about the pro-oxidizing properties of Ionol remains, despite the lack of such information in foreign studies. OBJECTIVE. To reveal the presence or absence of pro-oxidative action of phenolic antioxidants, Ionol and 2,6-DTBP, when their concentration in transformer oil is reduced. METHODS. Two series of oil samples were prepared for the study: with Ionol and 2,6-DTBP additive. The concentration of additives: 0; 0.05; 0.1 and 0.2 % (wt.). VG grade oil produced by hydrocracking technology was used as a base mineral oil. All oils were subjected to accelerated thermal degradation at elevated temperature. Destructive changes in the hydrocarbon base of oils were analyzed by IR absorption spectra. Changes in the relative content of degradation products dissolved in the oil were analyzed using UV-visible absorption spectra. RESULTS. On the basis of the analysis of optical spectra of both series of oils, it was obtained that as the initial concentration of any of the phenolic oxidation inhibitors in the oil decreases, the intensity of thermdestructive changes in the hydrocarbon composition of the oils consistently increases. It is shown that in transformer oils produced by hydrocracking technology both additives in the concentration range of 0.05÷0.1 % do not show pro-oxidizing properties. It is concluded that the widespread idea about pro-oxidizing effect of Ionol at its concentration in transformer oil less than 0.1 % should be considered as not corresponding to reality.

Keywords: mineral transformer oil; oxidation inhibitor; butylated hydroxytoluene (BHT); Ionol; pro-oxidation properties; IR spectroscopy; UV-VIS spectroscopy.

For citation: Garifullin M.Sh., Slobodina Y.N., Bikzinurov A.R., Giniatullin R.A., Chernyshov V.A. Study of the presence of pro-oxidative properties in phenolic oxidation inhibitors in relation to modern transformer oils. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 30-41. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-30-41.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАЛИЧИЯ ПРООКИСЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ У ФЕНОЛЬНЫХ ИНГИБИТОРОВ ОКИСЛЕНИЯ В ОТНОШЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Гарифуллин М.Ш.¹, Слободина Ю.Н.¹, Бикзинуров А.Р.¹, Гиниатуллин Р.А.², Чернышов В.А.³

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

³Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6026-9923>, g_marsels@mail.ru

yulya_slobodina@mail.ru

mr.azat780@mail.ru

g_ruslan7@mail.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5955-5540>, blackseam78@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в получении достоверных сведений об изменении эффективности фенольных ингибиторов окисления применительно к современным минеральным трансформаторным маслам, производимым по технологии гидрокрекинга, при снижении концентрации их в масле от 0.2 % до нуля. ЦЕЛЬ. Исследовать с помощью оптической спектроскопии характер изменений в углеводородной основе трансформаторных масел, подвергнутых искусственной термодеструкции, в зависимости от исходной концентрации в маслах одной из антиокислительных присадок: 1) 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол (Ионол) и 2) 2,6-ди-трет-бутилфенол (2,6-ДТВР). Определить, существуют ли признаки наличия проокислительных свойств у данных фенольных антиоксидантов при их массовой доле в масле менее 0.1 %. МЕТОДЫ. Для исследования были подготовлены 2 серии образцов масел с различным содержанием в них одной из присадок – Ионол и 2,6-ДТВР. Исходная концентрация присадок в маслах: 0; 0.05; 0.1 и 0.2 % (масс.). В качестве базового минерального масла использовалось масло марки ВГ, производимое по технологии гидрокрекинга. Все масла были подвергнуты ускоренной термодеструкции при повышенной температуре. Анализ глубины деструктивных изменений в углеводородной основе масел осуществлялось по ИК спектрам поглощения. Анализ изменений относительного содержания растворенных в масле продуктов деградации осуществлялся с помощью спектров поглощения в УФ-видимом диапазоне. РЕЗУЛЬТАТЫ. На основе анализа оптических спектров обеих серий масел было получено, что по мере снижения в масле исходной концентрации любого из фенольных ингибиторов окисления интенсивность термодеструктивных изменений в углеводородном составе масел последовательно возрастает. Показано, что в трансформаторных маслах, производимых по технологии гидрокрекинга, обе присадки в диапазоне концентраций 0.05÷0.1 % не проявляют проокислительных свойств. Сделан вывод, что распространенное представление о проокислительном действии Ионола при его концентрации в трансформаторном масле менее 0.1 % следует считать не соответствующими действительности.

Ключевые слова: минеральное трансформаторное масло; ингибитор окисления; ионол; проокислительные свойства; ИК-спектроскопия; спектроскопия УФ-видимого диапазона.

Для цитирования: Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., Бикзинуров А.Р., Гиниатуллин Р.А., Чернышов В.А. Исследование наличия проокислительных свойств у фенольных ингибиторов окисления в отношении современных трансформаторных масел // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 30-41. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-3041.

Introduction

An oil-filled power transformer is one of the most important elements in any power system. The ability of these transformers to operate at high power levels is due to the use of a liquid dielectric, transformer oil, which effectively dissipates the heat from the active part of the transformer into the external environment [1].

The traditional type of transformer oil, used in the very first oil-filled transformers, is mineral transformer oil, produced from petroleum. The main disadvantages of mineral oil are related to fire safety problems, as well as the possibility of environmental contamination in case of oil leaks. A promising alternative to mineral oils at present are ester-based oils - synthetic oils (Midel 7131, Envirottemp 360) [2, 3] as well as those produced from vegetable raw materials (MIDEL eN, FR3, etc.) [4-6].

Despite certain advantages, there are a number of factors that will not allow transformer oils based on esters to displace mineral oils in the near future. The main reason is the high cost of ester oils, especially the synthetic version. For example, Midel 7131 is more than an order of magnitude more expensive than GC, one of the best Russian oils. As a result, Midel 7131 oil in

domestic practice has found a niche use, for example on transformers of nuclear power plants, where economic aspects go into the background.

For vegetable-based oils, the main disadvantages are the higher viscosity and pour point values. Therefore, replacement of mineral oil with vegetable oil always leads to an increase in temperature inside the transformer, which can lead to unacceptable overheating of the equipment. At the same time, the geography of use of such oils is limited to a minimum winter temperature of -30°C .

A similar situation is typical for countries with developing economies, where due to the high rate of expansion of electrical networks the need for transformer oils is particularly high, but the economic aspect tilts the scales towards the traditional mineral oils [7].

At the same time, the addition of synthetic [8, 9] and natural esters [10, 11] to traditional mineral oils seems promising, which will increase the operational properties of the resulting oil mixtures without a significant increase in financial costs.

Based on the above, we can conclude that mineral transformer oil will remain the main type of liquid dielectric for oil-filled transformer electrical equipment in the foreseeable future. Therefore, research aimed at improving the efficiency of operation and diagnostics of the condition of mineral transformer oils continues to be relevant.

At one time, R.A. Lipstein made a great contribution to the development of the theory of mineral oils. The results of the research conducted under his supervision are presented in the twice republished monograph [6], which is still a table book for specialists in operation and diagnostics of oil-filled electrical equipment.

It should be noted that most of the research results presented in this monograph were conducted more than half a century ago. Since then, there have been significant changes in the production of oils. Firstly, Baku oils, which served as the main raw material for the production of transformer oils, have now been completely replaced by domestic paraffinic oils. Secondly, and more importantly, modern high-quality transformer oils are produced using hydrocracking technology, which has significantly changed their structural group composition. In particular, the content of aromatic, resinous-asphaltene and unsaturated compounds in oils has decreased. In this regard, some provisions on the properties and characteristics of transformer oils as applied to modern oils may need to be corrected or may be erroneous at all.

One such provision is the idea of the pro-oxidizing properties of the antioxidant additive Butylated hydroxytoluene (BHT). This additive is the most widely used oxidation inhibitor for transformer oils. According to the structural formula, the BHT additive belongs to the class of spatially hindered mononuclear phenols – Figure 1. Other common names for this additive are 2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol or 2,6-di-tert-butyl-p-cresol (DBPC). In Russia, as well as in a significant part of the post-Soviet space, the additive has a well-established name – Ionol. Further in this article we will use the name Ionol along with BHT.

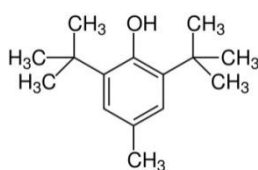


Fig. 1. Structural formula of the antioxidant additive Ionol (BHT) Рис. 1. Структурная формула антиокислительной присадки Ионол (BHT)

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

The mechanism of antioxidant action of this type of additives is to interact with the radicals $\dot{\text{R}}$ and RO_2 formed at the initial stage of oxidation, preventing further development of the oxidation process [13]. During the oil operation the concentration of ionol in it decreases. According to the industry standard STO 34.01-23.1-001-2017, the residual concentration of ionol is a regularly monitored parameter and should not fall below 0.1 % (wt.). It is generally accepted that when the concentration of ionol drops below this limit, transformer oil begins to oxidize faster than in the absence of ionol. This phenomenon has been called "pro-oxidative effect of ionol" [12, 14] and is now a deeply rooted idea of the properties of ionol additive among domestic specialists. As a result, the mention of ionol's prooxidative properties not only occurs regularly in domestic scientific publications [15], but also entered a number of normative documents on transformer oils, as well as reference literature [16].

At the same time in the international standard IEC 60296 [17] the minimum level of ionol for operational transformer oils is set at 0.08 % (wt), and there is no information about the presence of prooxidative effect of ionol at low concentrations.

In addition to ionol in foreign practice for stabilization of oils the additive 2,6-di-tert-butylphenol (2,6-DTBP), also belonging to the class of spatially hindered mononuclear phenols, is used. The structural formula of 2,6-DTBP is shown in Figure 2. The mechanism of action of this additive is similar to ionol, so one would expect both additives to have similar properties at concentrations below 0.1 % as well.

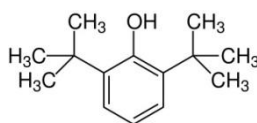


Fig. 2. Structural formula of the antioxidant additive 2,6-DTBP Рис. 2. Структурная формула антиокислительной присадки 2,6-DTBP

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

Based on the above, it was interesting to find the presence of prooxidative action of ionol and 2,6-DTBP additives at their concentration of less than 0.1 % in modern mineral oil, produced using hydrocracking technology, which was the main purpose of the study. For this purpose the depth of thermal-oxidative degradation of oils was determined at different initial concentrations of the specified oxidation inhibitors in them.

Spectral methods are traditionally used to identify the features of changes in the chemical composition of different materials. For mineral oils, among all spectral methods, optical spectroscopy is the most convenient tool. Therefore, a comparative assessment of the depth of destructive changes in oxidized mineral oils was based on changes in their optical spectra. For the analysis we measured absorption spectra of oils in ultraviolet (UV) – visible and infrared (IR) ranges.

Materials and methods

For the study were prepared 2 Series samples of mineral transformer oil with different concentrations of oxidation inhibitor of one of two types: a) Ionol (BHT) and b) 2,6-DTBP.

Fresh VG grade oil (PJSC "Lukoil") produced using hydrocracking technology and containing no oxidation inhibitors was used as a base mineral oil. The acid number of the base oil was 0.003 mg KOH/g oil.

The required concentration of the relevant inhibitor was achieved by adding it to the base oil in the required amount. The inhibitor concentrations in each series are shown in Table 1.

Table 1

Oxidation inhibitor concentrations in two oil series					
Series	Inhibitor	Inhibitor concentration in series oils, % (wt.)			
a	Ionol (BHT)	0	0.05	0.1	0.2
b	2,6-DTBP	0	0.05	0.1	0.2

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

Both series of oils were subjected to thermo-oxidative degradation according to GOST 981-75 at elevated temperature with oxygen barbotage. Thermal oxidation was carried out with the help of apparatus APSM-1. Thermal oxidation conditions are presented below.

Oxidation temperature: 150C;
 Oxidation time: 14 hours;
 Oxygen feed rate: 200 ml/min;
 Catalyst: copper plate.

Since only 6 samples can be oxidized simultaneously in the APSM-1 device, the oxidation of the prepared oil samples was performed in 2 stages: 4 samples of Series a) were oxidized on one day; 4 samples of Series b) on another day. Thermal destruction resulted in samples of oils with different degrees of oxidation and different degrees of degradation of the hydrocarbon base.

We designate the samples of oxidized oils derived from Series a) oils as follows: Ia; IIa; IIIa; IVa in order of increasing initial concentration (before oxidation) of ionol in the oils, according to Table 1.

Accordingly, samples of oxidized oils derived from Series b) oils will be designated as Ib; IIb; IIIb; IVb, in order of increasing the initial concentration (before oxidation) of DBPC in the oils, according to Table 1.

For all samples of oils the acid number was determined by titration method, according to GOST-5985-79.

To assess the degree of degradation of the hydrocarbon base of the oxidized oil samples were measured optical absorption spectra in the UV-visible and in the infrared (IR) range.

Absorption spectra in the UV-visible region were measured using a spectrometer "Cary-100" in the spectral range of 360÷600 nm with a resolution of 1 nm. Measurements were made in a quartz cuvette with thickness (optical path length) of 10 mm.

A TENSOR-27 FT-IR spectrometer was used to measure infrared absorption spectra. IR spectra were measured with a resolution of 1 cm⁻¹ in two spectral ranges. A 10-mm-thick cuvette was used to measure spectra in the 4800÷4500 cm⁻¹ wave number region. In the 6000÷5600 cm⁻¹ wave number region, IR spectra were measured in a 2 mm cuvette. The window material of both cuvettes was CaF₂.

UV and IR spectra of basic VG oil, not subjected to thermal oxidation, were also measured. Hereafter, the spectra of this oil will be referred to as "Fresh Oil".

Results and discussions

As noted above, the oxidation of oils with Ionol (Series *a*) and with 2,6-DTBP (Series *b*) was performed separately. It should be taken into account that the APSM-1 unit has an error of ±10% in maintaining the stability of the oxygen flow rate. Therefore, the oxygen consumption (instantaneous and integral) during oxidation of Series *a*) oils differed from the oxygen consumption during oxidation of Series *b*) oils. Therefore, the comparative analysis of oil samples is performed separately for each Series. For the same reason, the comparative effectiveness of Ionol and 2,6-DTBP additives is not discussed in this work.

Table 2 and Table 3 show the values of acid numbers in the oxidized samples of Series *a*) and Series *b*) oils, respectively.

Table 2

Values of the acid number in the samples of Series *a*) (oxidation inhibitor – Ionol (BHT))

Sample	Ionol concentration before oxidation, % (wt.)	Acid number, mg KOH/g oil
Ia	0	25.40
IIa	0.05	19.59
IIIa	0.10	5.29
IVa	0.20	0.017

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

Table 3

Values of the acid number in the samples of Series *b*) (oxidation inhibitor – 2,6-DTBP)

Sample	Concentration of 2,6-DTBP before oxidation, % (wt.)	Acid number, mg KOH/g oil
Ib	0	26.30
IIb	0.05	20.79
IIIb	0.10	8.76
IVb	0.20	0.17

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

As can be seen from the tables, in both series, the acid number of the oils consistently increases as the initial concentration of the oxidation inhibitor decreases. Characteristically, the samples of oils Ia and Ib, which had no oxidation inhibitor before oxidation, have significantly higher acid numbers than the oils with the addition of 0.05 % of any of the inhibitors. Thus, judging by the acid number of the oils, both inhibitors had no prooxidative effect when their concentration in the oil was less than 0.1 %.

To identify changes in the chemical composition of oxidized oils, consider the optical absorption spectra in the spectral range of 360÷600 nm, relating to the UV-visible range – Figures 3 and 4.

In the spectral region under consideration, the decrease in the intensity of radiation passing through the oils is due to both molecular absorption by the polyaromatic and asphaltene compounds present and formed during oil degradation [18] and scattering on colloidal particles formed from oil degradation products [19]. As can be seen from the presented spectra, the absorption intensity increases as the initial concentration of the oxidation inhibitor in the oil decreases, which leads to a shift of the spectra to the longwave region.

For quantitative comparison, according to 14 ASTM D 6802-02, it is necessary to determine the areas under the analyzed spectra in the range 360÷600 nm. In the case under consideration, the content of degradation products in oxidized oils turned out to be so high that in

the short-wave part of the spectrum the values of optical densities of oils exceeded the sensitivity of the instrument (except for sample IVa). Therefore, a correct numerical integration to determine the value of the area under the spectra was impossible.

However, even a qualitative analysis of the presented spectra suggests that adding any of the considered oxidation inhibitors at a concentration of 0.05% to the oil leads to a decrease in the amount of dissolved degradation products, compared to uninhibited oil. Thus, according to the content of degradation products dissolved in the oil, both oxidation inhibitors have no prooxidative effect.

Further consider the IR spectra of absorption of oils, analysis of which changes allows to assess the degradation of the hydrocarbon base of the mineral oil. For carrying out researches the near infra-red region was chosen, researches in which possess a number of advantages before average and far IR regions.

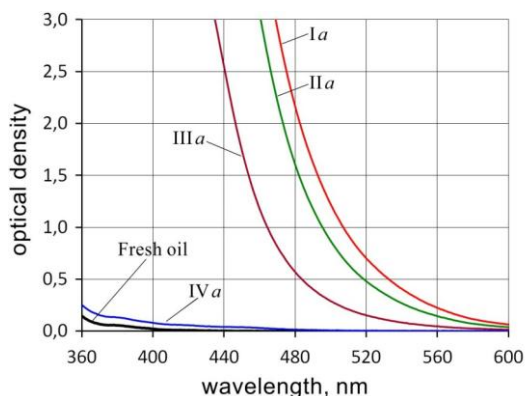


Fig. 3. UV-Visible absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series a) (with Ionol). Cuvette thickness is 10 mm. Designation of sample oils according to Table 2.

Рис. 3. Спектры поглощения в УФ-видимом диапазоне свежего и окисленных масел Серии а) (с Ионолом). Толщина кюветы – 10 мм. Обозначение образцов масел согласно Таблице 2.

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

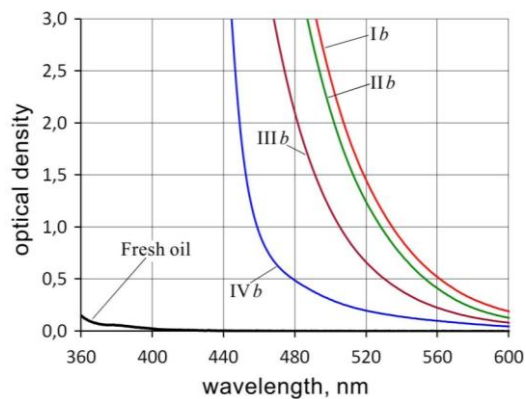


Fig. 4. UV-Visible absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series b) oils (with 2,6-DТВР). Cuvette thickness is 10 mm. Designation of sample oils according to Table 3.

Рис. 4. Спектры поглощения в УФ-видимом диапазоне свежего и окисленных масел Серии б) (с 2,6-ДТВР). Толщина кюветы – 10 мм. Обозначение образцов согласно Таблице 3.

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

Consideration will begin with the spectral range in the region of wave numbers $6000 \div 5600 \text{ cm}^{-1}$ (about $1.67 \div 1.79 \text{ }\mu\text{m}$). IR absorption spectra of both Series of oils are shown in Figures 5 and 6. In this region of the spectrum there are absorption bands belonging to the first overtones of the valence C-H vibrations in the methyl ($-\text{CH}_3$) and methylene ($-\text{CH}_2-$) groups of hydrocarbon molecules of the oils. A 2-mm-thick cuvette was used to measure the IR spectra.

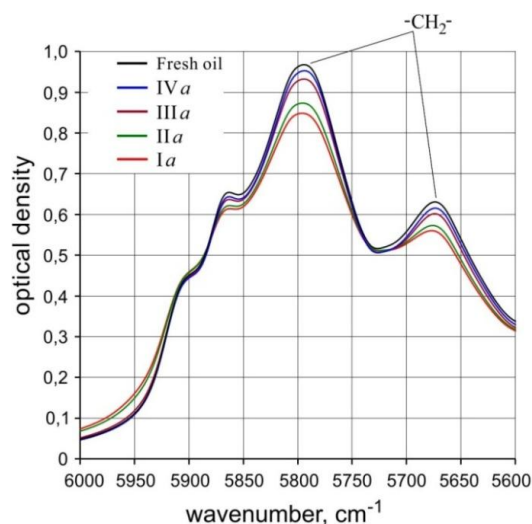


Fig. 5. IR absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series a) in the region of 6000÷5600 cm⁻¹. Cuvette thickness is 2 mm. Designation of samples according to Table 2.

Рис. 5. ИК спектры поглощения свежего и окисленных масел Серии а) в области 6000÷5600 см⁻¹. Толщина кюветы – 2 мм. Обозначение образцов согласно Таблице 2.

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

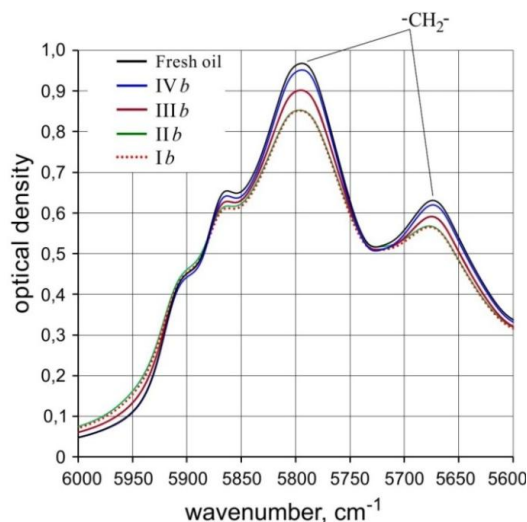


Fig. 6. IR absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series b) in the region of 6000÷5600 cm⁻¹. Cuvette thickness is 2 mm. Designation of samples according to Table 3.

Рис. 6. ИК спектры поглощения свежего и окисленных масел Серии б) в области 6000÷5600 см⁻¹. Толщина кюветы – 2 мм. Обозначение образцов согласно Таблице 3.

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

According to the theory of hydrocarbon oxidation, methyl groups are the most resistant to the oxidation process [20]. Oxidation of methylene $-CH_2-$ groups occurs relatively easily by the introduction of oxygen through C-H bonds [21, 22]. In addition, a decrease in the number of methylene groups occurs during the formation of double C=C and triple $C \equiv C$ bonds, as well as the breaking of carbon chains. Consequently, oxidative degradation of the hydrocarbon base of mineral oil is always accompanied by a decrease in its content of methylene $-CH_2-$ groups, which leads to a decrease in the intensity of the corresponding absorption bands. In the spectra under consideration, the methylene group corresponds to the most intensive absorption band with a peak near 5795 cm⁻¹, as well as a weaker one with a peak near 5673 cm⁻¹ [23, 24].

From the spectra shown in Figures 5 and 6, it can be seen that the intensity of both $-CH_2-$ absorption bands decreases as the initial concentration of the oxidation inhibitor decreases. Consequently, the depth of degradation of the hydrocarbon backbone of the oil also increases as the initial concentration of oxidation inhibitor in the oil decreases.

And if the effect of 2,6-DTBP additive at its concentration in oil of 0.05 % is not so noticeable compared to uninhibited oil (spectra of samples Ib and IIb in Figure 6), the addition of Ionol at a concentration of 0.05 % showed a distinct change in IR spectra (spectra of samples Ia and IIa in Figure 5).

Thus, the addition of any of the considered inhibitors at a concentration of 0.05 % reduces the depth of degradation of the hydrocarbon base of the oil compared to uninhibited oil.

Next, let us consider the spectral range $4800\div4500\text{ cm}^{-1}$ (about $2.08\div2.22\text{ }\mu\text{m}$). Absorption bands of various compounds with unsaturated $\text{C}=\text{C}$ bonds [25] are located in this region. The main advantage of using this spectral range is that there are no absorption bands of other mineral oil compounds here. For example, in the spectral range $2000\div1600\text{ cm}^{-1}$ in addition to absorption bands related to double $\text{C}=\text{C}$ bonds, there are intensive absorption bands of carbonyl groups $\text{C}=\text{O}$ of various oil oxidation products (aldehydes, ketones, acids), as well as absorption bands of aromatic compounds, which makes analysis of changes in the content of unsaturated compounds in oils difficult.

Since the studied absorption bands are very weak, a cuvette with a thickness of 10 mm was used to measure the IR spectra, which is a sufficiently large value for IR spectroscopy.

The absorption bands with peaks around 4600 and 4665 cm^{-1} , which refer to the vibrations of $=\text{C}-\text{H}$ and $\text{C}=\text{C}$ groups of unsaturated hydrocarbons, act as analytical bands in this range [23]. Figures 7 and 8 show absorption spectra of oxidized oils of Series a) and b), respectively, as well as of fresh oil.

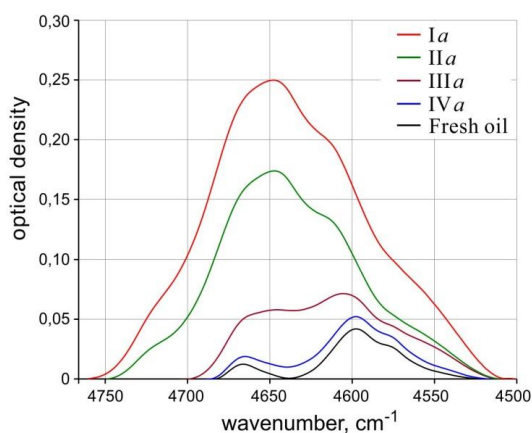


Fig. 7. IR absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series a) in the region of $4800\div4500\text{ cm}^{-1}$. Cuvette thickness is 10 mm. Designation of samples according to Table 2.

Рис. 7. ИК спектры поглощения свежего и окисленных масел Серии а) в области $4800\div4500\text{ см}^{-1}$. Толщина кюветы – 10 мм. Обозначение образцов согласно Таблице 2.

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

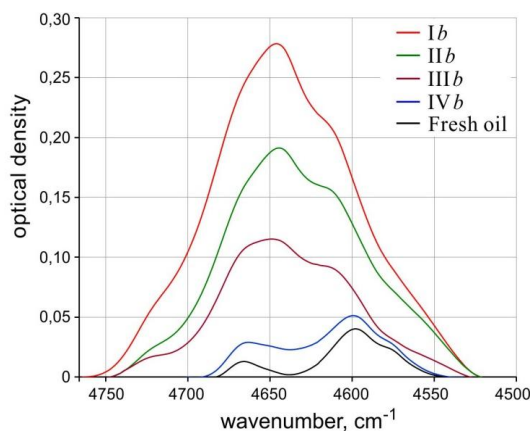


Fig. 8. IR absorption spectra of fresh and oxidized oils of Series b) in the region of $4800\div4500\text{ cm}^{-1}$. Cuvette thickness is 10 mm. Designation of samples according to Table 3.

Рис. 8. ИК спектры поглощения свежего и окисленных масел Серии б) в области $4800\div4500\text{ см}^{-1}$. Толщина кюветы – 10 мм. Обозначение образцов согласно Таблице 3.

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

As can be seen from the spectra, the process of thermal oxidation, which is the main mechanism of degradation of oils in the equipment, leads to an increase in the content of unsaturated compounds containing $\text{C}=\text{C}$ double bonds. The unsaturated compounds are also present in fresh mineral oil, as evidenced by the presence in the spectrum of this oil of both absorption peaks under consideration, but of low intensity.

With increasing degree of oxidation of oils (according to Tables 2 and 3) absorption intensity in the region of the peak 4665 cm^{-1} increases faster than in the region of 4600 cm^{-1} . As a result, there is a change in the shape of the spectrum. This effect can be explained by a significant increase in the proportion of unsaturated hydrocarbons containing carbonyl C=O group, which in turn affects the change in intensity and position in the IR spectrum of some absorption bands. It should be noted that operational transformer oils have a much lower degree of oxidation, so in their IR spectra absorption in the area of the 4600 cm^{-1} peak is always more intense [26, 27].

Based on the analysis of changes in the intensities of the considered absorption bands, it can be argued that the presence of an oxidation inhibitor in oil, even in a small amount - 0.05 % - leads to a significant slowdown in the formation of unsaturated compounds.

Summarizing the results of the study of IR absorption spectra of oxidized oils, we can conclude that neither Ionol nor 2,6-DTBP at a concentration of 0.05 % lead to an increase in the depth of degradation of the hydrocarbon base of oils as compared to uninhibited oils.

Conclusions

The presence of phenolic oxidation inhibitor in mineral transformer oil, as expected, slows down the process of its oxidation and degradation of the hydrocarbon basis. The results of the study lead to the conclusion that neither Ionol (BHT) nor 2,6-DTBP in concentrations below 0.1 % (wt.) show pro-oxidative properties against modern mineral transformer oils, at least in the concentration range of 0.05÷0.1 %. Thus, the representation about the prooxidative effect of Ionol at its concentration in the mineral transformer oil less than 0.1 % should be considered as not corresponding to reality.

The minimum concentration of Ionol in oil established by the standard at the level of 0.1 % significantly slows down the process of thermal-oxidative degradation of oil. However, as demonstrated by the results of the study, bringing the concentration of Ionol to the level of 0.2 % allows to almost completely prevent the process of oil oxidation over a long period of time. This is relevant, because the periodicity of control of the content of Ionol in transformer oil is 2 years. In this regard, it seems advisable not to allow the concentration of Ionol in operating oils to decrease below 0.2% (wt.).

It should also be noted that in practice there is a problem of separate determination in oil of both additives – Ionol and 2,6-DTBP. The traditional method of solving this problem involves the use of gas-liquid chromatography with flame ionization detector [28]. It is also possible to use IR spectroscopy [29, 30], however, the practical realization of this approach has both algorithmic and instrumental difficulties, since the main IR absorption bands of these additives coincide. It seems promising to use the near infrared spectral region [31], studies in which can be carried out in the form of express analysis. The results obtained in solving this problem will be presented in the next paper.

In conclusion, it should also be noted that the presented in this work optical methods of controlling the degradation of hydrocarbon base in the UV-visible and near-infrared spectral regions can be realized using small-size spectrophotometers in which the radiation detector is a multielement CCD photodetector [32]. The use of spectrometers of this type, in particular, with cooled CCD photodetectors, will not only significantly simplify and reduce the cost of measurements, but also make it possible to conduct studies in the field.

The study was carried out within the activities of the Problematic Working Group PWG D1.1 “Determination of Degradation Markers of Mineral Transformer Oils by Infrared Spectroscopy” of the National Research Committee D1 of the Russian National Committee of CIGRE.

References

1. Lukenda N. Not all mineral oils are equal. *Transformers Magazine*. 2019. 6(4):112-117.
2. MIDEL 7131 - premium performance since the 1970s. – URL: <https://www.midel.com/midel-range/midel-7131/> (дата обращения: 01.09.2024)
3. Rozga P., Beroual A., Przybyłek P., Jaroszewski M. et al. A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications. *Energies*. 2020; 13(23):6429. <https://doi.org/10.3390/en13236429>
4. Rapeseed natural ester dielectric fluid. – URL: <https://www.cargill.com/bioindustrial/dielectric-fluids/fr3r-fluid> (дата обращения: 01.09.2024).
5. Rao U.M., Fofana I., N'cho J.S. On Some Imperative IEEE Standards for Usage of Natural Ester Liquids in Transformers. *IEEE Access*. 2020;8:145446-145456. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014600.
6. Shen Z., Wang F., Wang Z., Li J. A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;141. 110783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110783>
7. Transformer oils market. Analytical review. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/transformer-oil-market-967.html/> (дата обращения: 01.09.2024)

8. Lyutikova M.N., Korobeynikov S.M., Rao U.M. Fofana I. Mixed Insulating Liquids With Mineral Oil for High-Voltage Transformer Applications: A Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022;29(2):454-461. doi: 10.1109/TDEI.2022.3157908.
9. Lyutikova M., Korobeynikov S., Konovalov A. Evaluation of the Properties of Mixtures of Aromatic Mineral Oil and Synthetic Ester for High-Voltage Equipment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021; 28(4):1282-1290. doi: 10.1109/TDEI.2021.009636
10. Rouabeh J., M'barki L., Hammami A., et. al. Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers. *Heliyon*. 2019;5(3). doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01159.
11. Hao J., Zhang J., Ye W., et. al. Development of Mixed Insulation Oil as Alternative Liquid Dielectric: A Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2024; 10(3):1242-1258. doi: 10.17775/CSEEJPES.2023.05960
12. Lipshtein R.A., Shakhnovich M.I. *Transformatornoe maslo*. Moscow: Ehnergoatomizdat, 1983. (In Russ).
13. Roginskii V.A. *Fenol'nye antioksidanty: Reaktsionnaya sposobnost' i effektivnost'*. – Moscow: Nauka; 1988. (In Russ).
14. Lipshtein R.A. O mekhanizme deistviya ingibitorov okisleniya. *Prisadki k maslam: Trudy Vtorogo Vsesoyuznogo nauch.-tekhn. soveshchaniya*. Moscow: Khimiya Publ., 1968. 169-177. (In Russ).
15. S.P. Vysogorets, "Improvement of the methodology of physical and chemical diagnostics of oil-filled transformer equipment": D. thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. 05.14.12, St. Petersburg, 2020. 423 p.
16. Lizunov SD, Lokhanin AK, editors. *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga*. Moscow: Energoatomizdat; 2004. (In Russ).
17. Atanasova-Höhlein I. IEC 60296 (Ed. 5) – a standard for classification of mineral insulating oil on performance and not on the origin. *Transformers magazine*. 2021; 8(1):86-91.
18. Turanov A.N. Analiz metodov diagnostiki doli aromatischeskikh grupp v sostave transformatornykh masel. *Elektrichestvo*. 2022; 4: 72-77. (In Russ).
19. N'cho J.S., Fofana I., Hadjadj Y., et al. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers. *Energies*. 2016;9(5):367. doi: <https://doi.org/10.3390/en9050367>
20. Emanuel' N.M., Denisov E.T., Maizus Z.K. *Tsepnye reaktsii okisleniya uglevodorodov v zhidkoi faze*. M.: Nauka; 1965. (In Russ).
21. Ivanov K.I. *Promezhutochnye produkty i promezhutochnye reaktsii avtookisleniya uglevodorodov*. M.;-L.: Gostoptekhizdat; 1949. (In Russ).
22. Waters W.A. *Mechanism of oxidation of organic compounds*. New York: Wiley, 1964. (Russ. ed.: Uoters U.A. Mekhanizm okisleniya organicheskikh soedinenii. Moscow: Mir Publ., 1966; 175 p.)
23. Krishchenko V.P. *Blizhnyaya infrakrasnaya spektroskopiya*. Moscow: KRONA-PRESS; 1997. (In Russ).
24. Jerry Workman, Jr. *The Handbook of Organic Compounds: NIR, IR, Raman, and UV-Vis Spectra Featuring Polymers and Surfactants*. 1st ed. Elsevier; 2000.
25. Garifullin M.Sh. Ispol'zovanie metodov opticheskoi spektroskopii dlya diagnostiki mineral'nykh izolyatsionnykh masel. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013;10: 3299-3304. (In Russ).
26. Garifullin M.Sh., Solobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base. *E3S Web of Conferences*. 2020;216(01055). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601055>
27. Garifullin M.Sh., Slobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Investigation of the content of unsaturated hydrocarbons in transformer oils using IR spectroscopy. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023;25(5):3-19. (In Russ). doi: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19>
28. Lyutikova M.N., Nekhoroshev S.V., Kuklina V.M., et al. Identification of Impurities of Unknown Composition in Insulating Oil by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). *Power Technology and Engineering*. 2020;54(4). doi: 10.1007/s10749-020-01257-0.
29. Ågren P., Lillhonga T., Melzer L. Identification and Improved Quantification of Inhibitors in Mineral Insulating Oils using FTIR Spectroscopy and Partial Least Squares Regression: 48 CIGRE Session; 23-28 Aug 2020; Paris, France; 2020. Paper D1-103.
30. Muratova V.M., Nekhoroshev S.V., Gadzhieva A.S., et al. Determination of phenolic-type antioxidant additives in fresh insulating oils by IR spectrometry on a liquid express analysis attachment. *Analytics and Control*. 2023; 27(2):113-121. (In Russ). doi: 10.15826/analitika.2023.27.2.005
31. Lyutikova M.N., Konovalov A.A., Korobeinikov S.M., et al. Control of the Antioxidant Additive (Ionol) Content in Liquid Insulation of High-Voltage Equipment in Electric Grid Companies Using Modern Instrumental Methods. *Power Technology and Engineering*. 2019;53(1): 118-125.
32. Garifullin M.Sh., Kozlov V.K. Pribor dlya spektral'nykh issledovaniy izolyatsionnykh masel v diapazone 600-1100 nm. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2001; 9-10: 114-116. (In Russ).

Authors of the publication

Marsel Sh. Garifullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yulia N. Slobodina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat R. Bikzinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ruslan A. Giniatullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Vadim A. Chernyshov – Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia.

Литература

1. Lukenda N. Not all mineral oils are equal // Transformers Magazine. 2019. Vol. 6, №4. pp. 112-117.
2. MIDEL 7131 - premium performance since the 1970s. – URL: <https://www.midel.com/midel-range/midel-7131/> (дата обращения: 01.09.2024)
3. Rozga P., Veroual A, Przybylek P., Jaroszewski M., et al. A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 23. 6429. <https://doi.org/10.3390/en13236429>
4. Rapeseed natural ester dielectric fluid. – URL: <https://www.cargill.com/bioindustrial/dielectric-fluids/fr3r-fluid> (дата обращения: 01.09.2024).
5. Rao U.M., Fofana I., N'cho J.S. On Some Imperative IEEE Standards for Usage of Natural Ester Liquids in Transformers. // IEEE Access. 2020. Vol. 8. pp. 145446-145456. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3014600.
6. Shen Z., Wang F., Wang Z., Li J. A critical review of plant-based insulating fluids for transformer: 30-year development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol.141. 110783. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110783>
7. Рынок трансформаторных масел. Аналитический обзор. – URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/transformer-oil-market-967.html/> (дата обращения: 01.09.2024)
8. Lyutikova M.N., Korobeynikov S.M., Rao U.M., Fofana I. Mixed Insulating Liquids With Mineral Oil for High-Voltage Transformer Applications: A Review // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2022. Vol. 29. N. 2. pp. 454-461. doi: 10.1109/TDEI.2022.3157908.
9. Lyutikova M., Korobeynikov S., Konovalov A. Evaluation of the Properties of Mixtures of Aromatic Mineral Oil and Synthetic Ester for High-Voltage Equipment // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2021. Vol. 28. N. 4. pp. 1282-1290. doi: 10.1109/TDEI.2021.009636
10. Rouabeh J., M'barki L., Hammami A., et. al. Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers. Heliyon. 2019. Vol. 5, N3. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e011159.
11. Hao J., Zhang J., Ye W., et. al. Development of Mixed Insulation Oil as Alternative Liquid Dielectric: A Review // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2024. Vol. 10. N.3. pp.1242-1258. doi: 10.17775/CSEEJPES.2023.05960
12. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
13. Рогинский В.А. Фенольные антиоксиданты: Реакционная способность и эффективность. М.: Наука, 1988. 247 с.
14. Липштейн Р.А. О механизме действия ингибиторов окисления // Присадки к маслам: Труды Второго Всесоюзного науч.-техн. совещания. М.: «Химия», 1968. С. 169-177.
15. Высогорец С.П. Совершенствование методологии физико-химического диагностирования маслonaполненного трансформаторного оборудования.: диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. 05.14.12 / Высогорец Светлана Петровна. Санкт-Петербург, 2020. 423 с.
16. Силовые трансформаторы. Справочная книга / Под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоатомиздат, 2004. 616 с.
17. Atanasova-Höhlein I. IEC 60296 (Ed. 5) – a standard for classification of mineral insulating oil on performance and not on the origin // Transformers magazine. 2021. Vol. 8, Iss. 1. pp. 86-91.
18. Туранов А.Н. Анализ методов диагностики доли ароматических групп в составе трансформаторных масел // Электричество. 2022. № 4. С. 72-77.
19. N'cho J.S., Fofana I., Hadjadj Y., et al. Review of Physicochemical-Based Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers // Energies. 2016. Vol. 9, N5. 367. <https://doi.org/10.3390/en9050367>
20. Эмануэль Н.М., Денисов Е.Т., Майзус З.К. Цепные реакции окисления углеводов в жидкой фазе. М.: Наука, 1965. 375 с.

21. Иванов К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводов. М.;-Л.: Гостоптехиздат, 1949. 192 с.
22. Уотерс У.А. Механизм окисления органических соединений. М.: Мир, 1966. 175 с.
23. Крищенко В.П. Ближняя инфракрасная спектроскопия. М.: КРОНА-ИРЕСС, 1997. 638 с.
24. Jerry Workman, Jr. The Handbook of Organic Compounds: NIR, IR, Raman, and UV-Vis Spectra Featuring Polymers and Surfactants. 1st ed. Elsevier; 2000.
25. Гарифуллин М.Ш. Использование методов оптической спектроскопии для диагностики минеральных изоляционных масел // Фундаментальные исследования. 2013. №10. С. 3299-3304.
26. Garifullin M.Sh., Solobodina Y.N., Bikzinurov A.R., et al. Control of the degradation of the mineral transformer oils hydrocarbon base // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 216, 01055. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601055>
27. Гарифуллин М.Ш., Слободина Ю.Н., Бикзинуров А.Р. и др. Исследование содержания непредельных углеводов в трансформаторных маслах с помощью ИК спектроскопии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т. 25(5). С. 3-19. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-5-3-19>
28. Lyutikova M.N., Nekhoroshev S.V., Kuklina V.M., et al. Identification of Impurities of Unknown Composition in Insulating Oil by Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) // Power Technology and Engineering. 2020. Vol. 54, N4. pp. 594-599. – DOI: 10.1007/s10749-020-01257-0.
29. Ågren P., Lillhonga T., Melzer L. Identification and Improved Quantification of Inhibitors in Mineral Insulating Oils using FTIR Spectroscopy and Partial Least Squares Regression: 48 CIGRE Session; 23-28 Aug 2020; Paris, France; 2020. Paper D1-103.
30. Муратова В.М., Нехорошев С.В., Гаджиева А.С. и др. Определение антиоксидантных присадок фенольного типа в свежих изоляционных маслах методом ИК-спектроскопии на приставке для экспресс-анализа жидкостей // Аналитика и контроль. 2023. Т.27, № 2. С. 113-121. DOI 10.15826/analitika.2023.27.2.005.
31. Lyutikova M.N., Konovalov A.A., Korobeinikov S.M., et al. Control of the Antioxidant Additive (Ionol) Content in Liquid Insulation of High-Voltage Equipment in Electric Grid Companies Using Modern Instrumental Methods // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53, N1, pp. 118-125.
32. Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К. Прибор для спектральных исследований изоляционных масел в диапазоне 600-1100 нм // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2001. № 9-10. С. 114-116.

Авторы публикации

Гарифуллин Марсель Шарифьянович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Слободина Юлия Николаевна – магистр, выпускник кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Бикзинуров Азат Рашитович – магистр, выпускник кафедры «Электроэнергетические системы и сети» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гиниятуллин Руслан Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривода и электротехники» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Чернышов Вадим Алексеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение» Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева).

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

Получено **21.10.2024 г.**

Отредактировано **28.10.2024 г.**

Принято **05.11.2024 г.**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 620.97:621.331:629.433:629.085

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54

ОБЪЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ТРАМВАЕВ И ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Кацай А.В.¹, Шаряков В.А.²

¹ООО «Кинемак-Энерго», г. Москва, Россия

²ООО «НПП «ЭПРО», г. Санкт-Петербург, Россия

proton764@mail.ru, v_a_shar@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Существенный потенциал увеличения энергоэффективности городского электрифицированного транспорта содержится в возможности повторного полезного применения на выполнение транспортной работы части энергии, затрачиваемой на тягу подвижного состава, рекуперированной при торможении. Экономическое обоснование имеющихся способов утилизации рекуперированной электроэнергии зависит от её объёмов в целом и имеющейся при стандартных технических параметрах и условиях движения подвижного состава избыточной её составляющей, рассеиваемой на тормозных резисторах в виде тепла в атмосферу. Теоретические симуляционные компьютерно-математические модели расчёта рекуперированной энергии пока ещё не принимают во внимание все ключевые параметры реальных процессов в электрической подсистеме горэлектротранспорта. ЦЕЛЬЮ исследования было проведение инструментального измерения потоков энергии для различных групп электропотребляющего оборудования подвижного состава ГЭТа, а также рекуперативной энергии – полезной и избыточной. МЕТОДЫ. Натурные эксперименты, электротехнические расчёты, сравнительный анализ. РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе исследования были проведены инструментальные замеры потребления и рекуперации энергии в реальной работе трамваев и троллейбусов. Кроме того, проведены сравнения с результатами других отечественных и зарубежных измерений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Получены показатели объёмов энергии рекуперации и их зависимости от типа и характеристик подвижного состава и погодных условий. Выявлены предельные значения доли полной энергии рекуперации от тягового энергопотребления: для трамваев – порядка половины и для троллейбусов – до трети.

Ключевые слова: трамвай; троллейбус; тяговое энергопотребление; полезная и избыточная рекуперация; нетяговые нужды; инструментальные измерения.

Для цитирования: Кацай А.В., Шаряков В.А. Объёмы рекуперативной энергии трамваев и троллейбусов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 42-54. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54.

THE VOLUME OF REGENERATIVE ENERGY OF TRAMS AND TROLLEYBUSES

Katsay A.V.¹, Sharyakov V.A.²

¹Kinemak Llc, Moscow, Russia

²NPP EPRO, St. Petersburg, Russia

proton764@mail.ru, v_a_shar@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. A significant potential for increasing the energy efficiency of urban electrified transport is contained in the possibility of re-useful use of part of the energy spent on traction of rolling stock, recovered during braking, for performing transport work. The economic justification of the available methods of utilization of recovered electricity depends on its volume as a whole and the excess component of it available under standard technical parameters and conditions of movement of rolling stock, dissipated on brake resistors in the form of heat into the atmosphere. Theoretical simulation computer-mathematical models for calculating recovered

energy do not yet take into account all the key parameters of real processes in the electrical subsystem of mountain electric transport. THE PURPOSE of the study was to carry out instrumental measurement of energy flows for various groups of electric power-consuming equipment of the urban electrified transport, as well as regenerative energy – useful and redundant. METHODS. Field experiments, electrical calculations, comparative analysis. RESULTS. In the course of the study, instrumental measurements of energy consumption and recovery in the actual operation of trams and trolleybuses were carried out. In addition, comparisons were made with the results of other domestic and foreign measurements. CONCLUSIONS. Indicators of recovery energy volumes and their dependence on the type and characteristics of rolling stock and weather conditions are obtained. The limiting values of the share of total energy recovery from traction energy consumption are revealed: for trams – about half and for trolleybuses – up to a third.

Keywords: tram; trolleybus; traction energy consumption; useful and excessive recovery; non-traction needs; instrumental measurements.

For citation: Katsay A.V., Sharyakov V.A. The volume of regenerative energy of trams and trolleybuses. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 42-54. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-42-54.

Введение (Introduction)

В последние годы на подвижном составе городского электротранспорта (ГЭТ) активно внедряются тяговые транзисторные преобразователи, позволяющие выдавать энергию рекуперативного торможения вагонов обратно в контактную сеть (КС) на повторное выполнение полезной транспортной работы. В силу стохастичности процесса совпадения мощности выдачи рекуперации в сеть и достаточной мощности наличной сетевой нагрузки часть энергии рекуперации становится избыточной и рассеивается на тормозных резисторах. Для решения проблемы полного возврата на повторное выполнение транспортной работы избыточной энергии рекуперации рассматриваются и опробуются буферные накопители энергии бортового и стационарного применения. Для определения экономической эффективности таких устройств требуются надёжные данные об объёмах и структуре распределения полезной и избыточной рекуперации в системе тягового энергоснабжения (СТЭ) ГЭТа. Задачу изучения сезонного аспекта распределения полезной и избыточной рекуперации решают в своих работах ряд отечественных и зарубежных исследователей (Ребров С.А., Щуров Н.И., Ярославцев М.В., Бартломейчик М., Шевлюгин М.В. и др.). Эти работы позволили выявить зависимости и отношения тягового и нетягового энергопотребления и полезной и избыточной рекуперации вагонов в зависимости от внешних условий работы электроподвижного состава (ЭПС). Однако исследование методов определения абсолютных значений тягового энергопотребления, полезной и избыточной рекуперации ещё находится на начальном этапе. Развитие этих методов направлено на прямое измерение энергопотоков тягового привода трамвайных и троллейбусных вагонов.

При детальном инструментальном измерении потоков энергии на борту подвижного состава (тяга, полезная и избыточная рекуперация, нетяговое энергопотребление) у предприятия ГЭТ появляется мощный инструмент детального анализа и составления энергобаланса всей системы энергоснабжения транспортной работы в дополнение к измерениям энергопотоков в точках после выпрямительных агрегатов тяговых подстанций (ТП) и на высоковольтной стороне их. При наличии подробных непрерывных рядов данных по энергопотреблению становится возможным определить не только разделение энергии по всем типам потребления и объёмы полезной и избыточной рекуперации, но и потери в контактной сети и на тяговых подстанциях.

В настоящее время практически все отечественные производители трамваев (ПК ТС, Синара, УКВЗ, Ростех, Белкоммунмаш и др.) и троллейбусов (ПК ТС, Синара, УТТЗ, Транс-Альфа, Камаз, МАЗ и др.) участвуют в той или иной мере в крупных проектах модернизации парка ЭПС и тяговой инфраструктуры, в т.ч. в концессионных программах. Управляющие компании электротранспортных предприятий сталкиваются с проблемой снижения затрат энергии на транспортную работу. Тотальный инструментальный учёт энергозатрат при помощи устройств энергоучёта на ЭПС и на ТП позволит легко реализовать эффективный способ контроля энергопотребления подвижным составом ГЭТ.

Настоящее исследование направлено на разработку методов измерений указанных энергопотоков на борту трамваев и троллейбусов, а также на определение закономерных

соотношений между тяговым потреблением и рекуперативными потоками различной направленности на современном подвижном составе ГЭТ.

Материалы и методы (Materials and methods)

Способы измерения энергии тяги и рекуперации на ЭПС

Математическое моделирование

Одним из наиболее распространённых способов исследования баланса энергии в СТЭ ГЭТа, в том числе определения объёмов тяги и полезной и избыточной рекуперации, является математическое моделирование электрических процессов при выполнении транспортной перевозочной работы. Современные методы математического моделирования могут строиться как с использованием некоторых первичных данных (пробег, бортовое энергопотребление и др.) [1], так и опираются на чисто аналитические предположения при более глубоких математических описаниях моделей подвижного состава (технические характеристики энергооборудования тяги и нетягового потребления, профили пути, описания сил сопротивления движению вагонов и др.) [2]. Результатами таких расчётов на симулятивных программно-математических моделях реальных электротранспортных систем являются данные электрических параметров тяги и рекуперации поездов, которые могут быть сравнены с показателями натурных измерений. Так, например, исследователи отмечают в отношении легкорельсового транспорта, что «из-за короткого расстояния между станциями городского железнодорожного транспорта и частых торможений электроэнергия, вырабатываемая рекуперативным торможением, очень значительна и может даже достигать более 40% от потребления энергии на тягу» [3].

В некоторых исследованиях было показано, что применение рекуперативного торможения в городских железнодорожных системах потенциально может снизить их чистое потребление энергии на 10-45%, в зависимости от характеристик каждой системы [4]. При этом исследователи зачастую не указывают какое именно потребление энергии поездами имеется в виду – только тяговое или полное, с учётом питания устройств собственных нужд.

Стабильно воспроизводимые на маршрутных линиях состав поездов и графики движения обеспечивают устойчивое воспроизводство показателей тяги и рекуперации, разумеется, с учётом сезонного фактора, активно влияющего на абсолютные показатели. Например, исследователи из Румынии отмечают в отношении того же легкорельсового транспорта, что «согласно фактическим эксплуатационным данным, только 15-19% электроэнергии рекуперативного торможения может быть эффективно использовано» [5]. При этом «остальная электрическая энергия в конечном итоге преобразуется в тепло за счет сопротивления торможению» [6]. Для описания математических моделей в основном применяются два подхода: учитывающие детерминированные факторы и статистические расчеты. Однако чисто математические методы установления энергобаланса ЭПС с определением количественных показателей только с учетом детерминированных факторов, получаемых при моделировании, «не отражает реальной картины режимов движения и электропотребления в условиях эксплуатации и приводит к идеализации режимов движения» [7]. Статистические методы исследования энергопотоков для реальной транспортной работы в ГЭТ также «...не в полной мере учитывают многие факторы, от которых существенно зависит энергопотребление на ЭПС» [7].

Инструментальное измерение тягового энергопотребления и рекуперации

Для инструментального измерения тяговой и рекуперативной энергии в трамваях и троллейбусах широко применяются двунаправленные счётчики и датчики тока и напряжения. Обычно счётчики устанавливаются в точках между токовводом от КС и присоединением тяговой и нетяговой нагрузки: «счетчик электроэнергии должен быть включен таким образом, чтобы он учитывал все расходы на единицу подвижного состава¹». В таком случае происходит измерение входной энергии на тягу и собственные нетяговые нужды поездов, а также на выдаваемую в КС часть энергии рекуперации – полезную, за вычетом избыточной рекуперации, направляемой на тормозные резисторы, а также питания полезной рекуперацией собственных нужд нетягового оборудования самого рекуперирующего вагона, т.к. последняя потребляется до точки подключения счётчика, т.е. им не учитывается.

¹ Методические указания по планированию, учету расхода электрической энергии трамвайным и троллейбусным транспортом и рекомендации по экономии электроэнергии Р0365-96. Утвержден в Минжилкомхоз РСФСР (29.12.1985).

Такая структура измерений не позволяет в чистом виде определять отдельно тяговое и нетяговое энергопотребление вагона и полный объём полезной и всю избыточную рекуперацию.

Решением проблемы адекватности измерений затрат энергии на тягу, вспомогательные нужды и выдачи рекуперации является использование на ПС систем архивации данных, получаемых от установленного электроизмерительного оборудования. В настоящее время наличие таких систем является обязательным пунктом в технических заданиях на поставку ЭПС. К данным, которые должны быть переданы в систему архивации, должны относиться:

- напряжение контактной сети (измеренное счетчиком электрической энергии на токоприемнике и на входе преобразователей питания тяговых двигателей, вспомогательных двигателей, преобразователей напряжения);
- ток, потребляемый ЭПС (измеренный шунтом счетчика электрической энергии)
- ток, потребляемый тяговыми преобразователями;
- выходной ток бортовой сети.

Т. е. в таком случае появляется возможность полностью регистрировать и контролировать энергопотоки в тяговой и нетяговой подсистемах электрооборудования вагона. Архивы могут переписываться на компьютеры служб движения и энергохозяйства предприятий ГЭТ и обрабатываться при помощи стандартных программ матобработки.

В ходе настоящего исследования определялись объёмы тягового и нетягового энергопотребления и рекуперативной энергии (полезной и избыточной) трамвайных и троллейбусных вагонов с фиксацией измеренных показателей энергопотребления и рекуперации в вышеупомянутых точках. Обобщённая схема размещения электрооборудования на современном подвижном составе и направления энергопотоков, регистрируемых бортовыми датчиками тока и напряжения, показаны на рисунке 1.

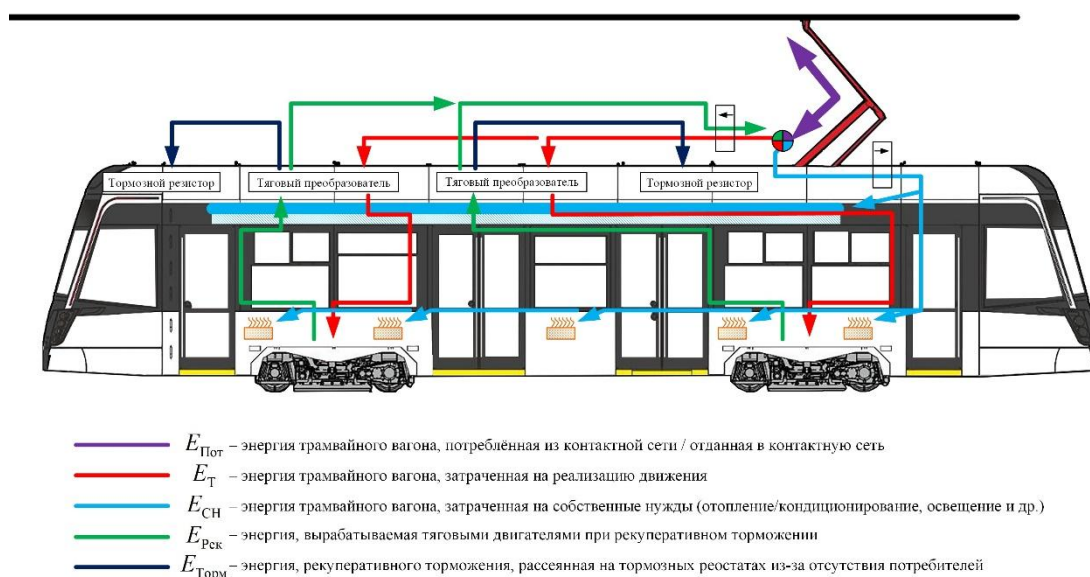


Рис. 1. Схема распределения регистрируемых тяговых и нетяговых энергопотоков трамвайного вагона с интегрированным преобразователем

Fig. 1. Distribution scheme of registered traction and non-traction energy flows of a tramcar with an integrated converter

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

На рисунке 2 на обобщённой принципиальной электрической схеме современной единицы подвижного состава показаны основные элементы цепи: тяговый преобразователь, преобразователь питания собственных нужд вагона, а также основные энергопринимающие устройства собственных нужд: отопители, воздушный компрессор, иные бортовые потребители (питающиеся от преобразователя собственных нужд). Также на схеме показаны места размещения датчиков тока и напряжения, контролирующих питание перечисленных устройств. Размещение датчиков тока и напряжения по приведённой схеме позволяет полностью контролировать энергопотоки в бортовой цепи и обеспечивает достаточный объём первичной информации с подвижного состава для расчёта полного энергобаланса системы тягового энергоснабжения городского электротранспорта. У более ранних моделей подвижного состава некоторые точки учёта могут отсутствовать.

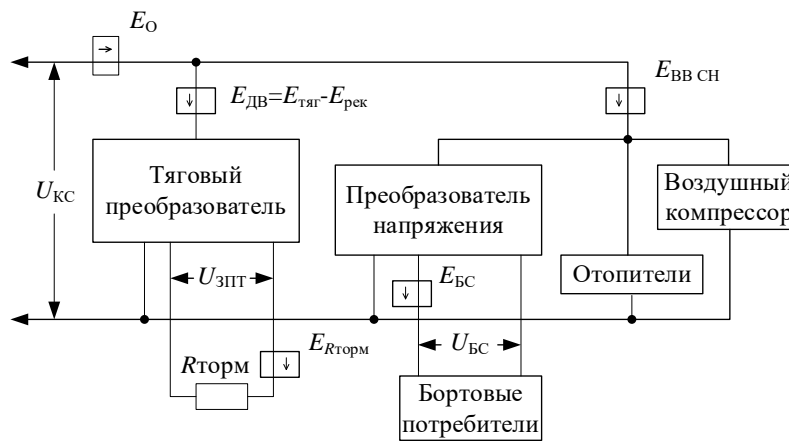


Рис. 2. Схема включения датчиков для измерения потребленной энергии: (E_O) общая потребляемая энергия; ($E_{ВВ\text{СН}}$) не тяговые потребители; ($E_{R_{\text{торм}}}$) энергия, рассеянная на тормозных реостатах; ($E_{\text{рек}}$) энергия рекуперации; ($E_{\text{ДВ}}$) энергия, затраченная на движение; ($E_{\text{БС}}$) энергия затраченная на питание бортовых систем

Fig. 2. Circuit diagram of sensors for measuring energy consumption: (E_O) total energy consumed; ($E_{ВВ\text{СН}}$) non-traction consumers; ($E_{R_{\text{торм}}}$) energy dissipated on braking rheostats; ($E_{\text{рек}}$) recovery energy; ($E_{\text{ДВ}}$) energy spent on movement; ($E_{\text{БС}}$) energy spent on powering on-board systems

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

Измерения производились в различных погодных условиях для обеспечения достаточной верифицируемой выборки. Известно, что существенный рост нетяговой нагрузки возникает при наступлении холодных температур, когда активно работают отопители салона и кабины водителя, примерно, при температурах ниже $+10^{\circ}\text{C}$ [8]. В качестве объектов использовались трамвайные вагоны с тремя моторными тележками, а также двухосные троллейбусы.

Результаты и обсуждение измерений энергии рекуперации (Results and discussions) Трамваи

Измерения проводились для трамваев одного класса – трёхсекционных с тремя моторными тележками и близкими массо-габаритными характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Параметры трамваев, на которых проводились измерения		
Марка	Длина, м	Снаряжённая масса, т
71-631-02.02	28	36
Stadler B85600M	26,715	33
71-931M «Витязь-М»	27,5	37

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

Разница в удельных показателях избыточной части энергии рекуперации у поездов одного класса при одинаковых погодных и маршрутных условиях задаётся только вероятностью сбора в КС достаточной по мощности сетевой нагрузки (тяговой и нетяговой) в период рекуперативного торможения вагонов. Значение такой вероятности определяется плотностью движения ЭПС на участках движения этих вагонов и погодными условиями, влияющими на уровень мощности потребления на тягу и нетяговые нужды. Более высокое удельное значение полезных перетоков рекуперации означает, что этот вагон движется по участкам КС с более высокой плотностью движения и в более холодный сезон.

Трамвай модели 71-631-02.02

На рисунке 3 показаны типовые сводные данные измерений и диаграмма данных по тяге, полезной и избыточной рекуперации вагонов модели 71-631-02.02 в ходе измерений на маршруте при температуре наружного воздуха днём/вечером $+2 / +2^{\circ}\text{C}$.

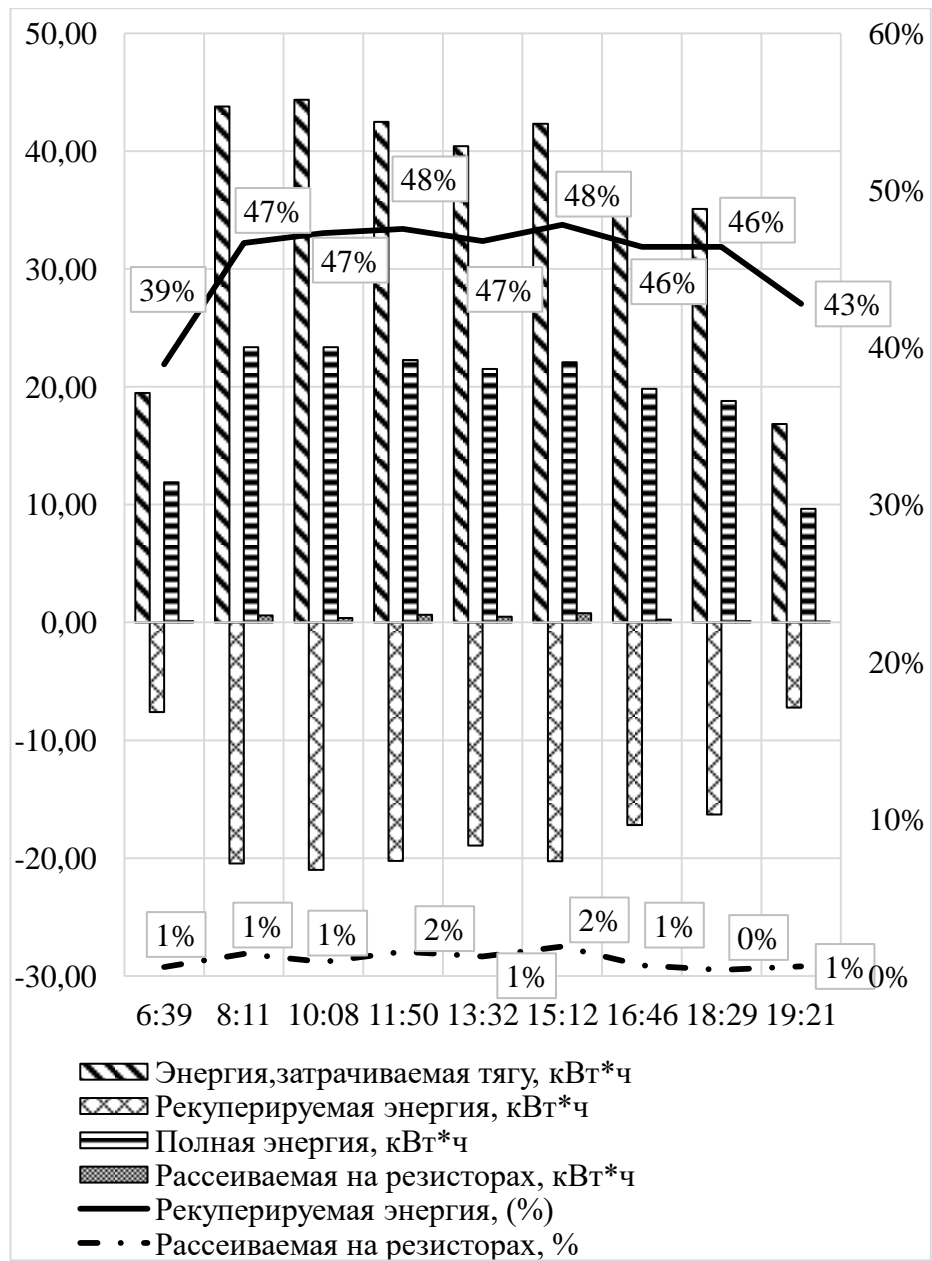


Рис. 3. График изменения энергии между остановками Fig. 3. Graph of energy changes between stops

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

В таблице 2 представлены сводные показатели за отдельные периоды измерений в трамвае указанной модели энергии на тягу, полезной и избыточной рекуперации.

Таблица 2

Итоговая таблица затрат энергии по участкам движения на маршруте

№ п/п	Время по архиву	Относительное время, с	Энергия					
			E_T , кВт*ч	$E_{рек}$, кВт*ч (%)	$E_{торм}$, кВт*ч (%)	$E_T - E_{рек}$, кВт*ч		
1	6:39	4 740	19.50	-7.59	39%	0.11	1%	11.91
2	8:11	10 260	43.80	-20.43	47%	0.62	1%	23.36
3	10:08	17 280	44.36	-20.98	47%	0.40	1%	23.39
4	11:50	23 400	42.50	-20.21	48%	0.66	2%	22.29
5	13:32	29 520	40.43	-18.91	47%	0.50	1%	21.52
6	15:12	35 520	42.34	-20.25	48%	0.79	2%	22.09
7	16:46	41 160	37.03	-17.19	46%	0.25	1%	19.85
8	18:29	47 340	35.11	-16.29	46%	0.13	0%	18.82
9	19:21	50 460	16.87	-7.22	43%	0.10	1%	9.65
Итого			321.95	-149.07	46%	3.57	1%	172.88

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

Суммарно по всем наблюдениям за вагонами модели 71-631-02.02 в зимний день с указанной температурой объём полезной рекуперации $E_{рек}$ находился в диапазоне 46-50% от потребления энергии на тягу E_T , а избыточная рекуперация $E_{торм}$ находилась в диапазоне 0,34-1,11% от тягового энергопотребления. Эти цифры долей видов рекуперации означают, что практически вся энергия рекуперации направляется в контактную сеть по межпоездным перетокам на потребляющую полезную нагрузку – тяговую и нетяговую. В т.ч. и на нетяговую нагрузку самого рекуперирующего вагона.

Трамвай 71-931М «Витязь-М»

Также проводились измерения на тяговом приводе трамвая модели 71-931М «Витязь-М» в тёплый сезон (+16/+15°C). На рассеивание на резисторах избыточной рекуперации в этих условиях уходит порядка 18,5% от тягового потребления, а полезные межпоездные перетоки составили 32,29% от тяги. Результаты измерений показали, что доля рекуперации суммарно полезной и избыточной от потребления на тягу в этот тёплый день составила порядка 51% (табл. 3), что практически равно среднему показателю вагонов модели 71-631-02.02 на других маршрутах и в другой сезон. При этом рассеиваемая на резисторе избыточная рекуперация $E_{торм}$ составила более трети от общего объёма рекуперации.

Таблица 3

Показатели рекуперации вагона модели 71-931М «Витязь-М»

$E_{рек}/E_T$	$E_{торм}/E_T$	$E_{рек}/(E_{рек}+E_{торм})$	$E_{торм}/(E_{рек}+E_{торм})$	Температура (день/вечер), °C
0.322908	0.184978	0.635789	0.3642111	+16/+15

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

Трамвай Stadler B85600M

Измерения тягового потребления и рекуперации всего парка вагонов модели Stadler B85600M проводились ежедневно весь 2022 г. Для приведения к одинаковому значению внешних условий с данными вышеуказанных измерений электрических параметров моделей 71-631-02.02 и 71-931М были выбраны дни со схожими показателями температуры воздуха. На основе полученных данных по всем маршрутам движения вагонов такой модели были сформированы усреднённые показатели по тяге и рекуперации - как среднее суммы работы всех таких вагонов на линии (41 вагоно-смена за день). При этом усреднённое по всем вагонам отношение рекуперации к тяге за зимний день с температурой +2/+2°C имело значение 30,015%. Значение отношения избыточной рекуперации $E_{торм}$ к затратам на тягу E_T , исходя из ранее измеренных показателей максимальной по году полезной рекуперации для таких вагонов, составило порядка 17,61 процентов. Значение полного объёма рекуперации ($E_{рек} + E_{торм}$) практически совпадает с данными по вагону типа 71-631 такого же класса (табл. 4).

Для сравнения с показателями работы вагона модели 71-931М были выбраны данные за тёплый день 13.09.2022 г. с температурой +16/+15 °C. Доля полезной рекуперации от тяги составила 22,43 %, а отношение избыточной рекуперации к тяге – 25,58%.

Суммарно полезная и избыточная рекуперация ($E_{рек} + E_{торм}$) составили для этого типа вагонов на имеющихся четырёх маршрутах движения в эти дни порядка 48% от тягового энергопотребления.

Сводные данные по трамваям

По измеренным показателям тяги и рекуперации трамвайных вагонов одного класса проводился, с учётом пробега, анализ соотношения потреблённой на тягу ЭПС энергии и видов энергии рекуперации. Энергия на тягу принималась за 100%. От этого объёма рассчитывались доли полезной и избыточной рекуперации. Температура в день измерений в утренние и вечерние часы определялась по данным портала gismeteo.ru. Результаты сопоставления полученных данных представлены в таблице 4.

Таблица 4

Сводные данные по полезной и избыточной рекуперации трамваев

Модель ПС	$E_{рек}/E_T$, %	$E_{торм}/E_T$, %	$(E_{рек} + E_{торм})/E_T$, %	Температура день/вечер, °C
71-631-02.02	45,9	2,31	48,21	+ 2/+2
Stadler B85600M **	30,02	17,61	47,63	+2/+2
Stadler B85600M **	22,43	25,58	48	+16/+15
71-931 М «Витязь-М»	33	18	51	+16/+15

**Для вагонов модели Stadler B85600M рассчитывались средние показатели тяги, полезной и избыточной рекуперации по всему парку, выходящему на линии в эти дни

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

Полный объём рекуперации (сумма полезной и избыточной) у трамваев с тремя моторными тележками составляет примерно половину от затрат на тягу. Разница в удельных на 1 км пробега показателях избыточной энергии рекуперации у поездов одного класса при одинаковых погодных условиях (например, зимой – 2-17 процентов от тягового энергопотребления) задаётся только вероятностью сбора в период рекуперативного торможения одних вагонов достаточной по мощности для приёма рекуперации сетевой нагрузки других вагонов (тяговой и нетяговой).

Троллейбус

Помимо трамваев измерения энергии рекуперации проводились также у троллейбусов типов ЗИУ-9 (модернизированного на инверторную тягу) и ПКТС-6281.00 «Адмирал». Полученные при измерениях данные сравнивались с аналогичными показателями других моделей троллейбусов (технические характеристики сравниваемых моделей см. в таблице 5). Указанные измерения также проводились в различные сезоны.

Таблица 5

Параметры сравниваемых троллейбусов			
Марка	Длина, м	Снаряжённая масса, т	Температура, °С
ПКТС-6281.00 «Адмирал»	12,375	11,47	+4/+2
Solaris Trollino 12S**	12	11,6	+11/+21
ЗИУ-9	11,888	10,05	от 0 до +6
МТБ-82**	10,365	9,25	н/д

**Величины данных показателей были взяты из литературы [9-12]

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

Троллейбус ПКТС-6281.00 «Адмирал»

Энергопотребление вагона регистрировалось в зимний период 29 января и первой половине 30 января 2024 г. при среднесуточной температуре окружающего воздуха в эти дни +4 и +2°С соответственно. Пробег за указанный период составил 251,16 км.

На рисунке 4 представлен типовой фрагмент графиков основных регистрируемых параметров исследуемого троллейбуса для одного межстаночного перегона: напряжение КС, токи тягового преобразователя (тяга и полезные перетоки рекуперации в контактную сеть), пробег, поступающие на тормозные резисторы токи избыточной рекуперации.

Сводные показатели за рассматриваемый период приведены в таблице 6.

Таблица 6

Значения потребления энергии и видов рекуперации троллейбуса ПКТС-6281.00 «Адмирал» в период измерений

	E_T	E_{CH}	$E_{дек}$	$E_{торм}$
Абсолютное, кВтч	399	128	-74	-40
Удельные значения на пробег в 1 км, кВтч/км	1.59	0.51	-0.30	-0.16
Доля от ($E_T + E_{CH}$) **	0.76	0.24	-0.14	-0.08

**($E_T + E_{CH}$) — полное энергопотребление ЭПС — сумма тягового и нетягового

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

Суммарное удельное потребление энергии из контактной сети на тягу и нетяговые нужды в межсезонье составляет ~2,1 кВтч/км, при тяговом энергопотреблении в 1,59 кВтч/км. За этот же период удельная выданная в КС полезная энергия рекуперации составляет -0,3 кВтч/км, а направленная на тормозные резисторы удельная энергия избыточной рекуперации -0,16 кВтч/км или 46,67% от полезной рекуперации. Полный объём рекуперации (сумма полезной и избыточной) составил 28,93% от потреблённой на тягу вагона энергии или 21,9% от полного энергопотребления. Близкие значения были получены польскими исследователями при анализе энергобаланса троллейбусов модели Solaris trollino 12S в г. Гдыне (Польша) в 2014 г., где доля полного объёма энергии рекуперации (полезной и избыточной) от полного потребления троллейбусами (измеренного на токосъёмнике вагона) составила тогда, в среднем, 24% [9].

Нетяговые нужды формируются работой отопителей салона и кабины водителя, освещения, компрессора, комплексом оборудования управления, информационной системой, зарядкой аккумуляторов собственных нужд и др. Доля нетягового энергопотребления троллейбуса «Адмирал» за время измерений в указанные осенние дни составила 24%. В непииковое время доля нетягового энергопотребления вырастает относительно периодов пикового движения вагонов. Доля межпоездных перетоков

полезной энергии рекуперации за всё время составила 14% от полного энергопотребления, а в часы пик доходила до 17,6%. Этот факт подтверждает, что при более интенсивном движении ЭПС увеличивается вероятность наличия в КС достаточной мощности нагрузки для приёма энергии рекуперации.

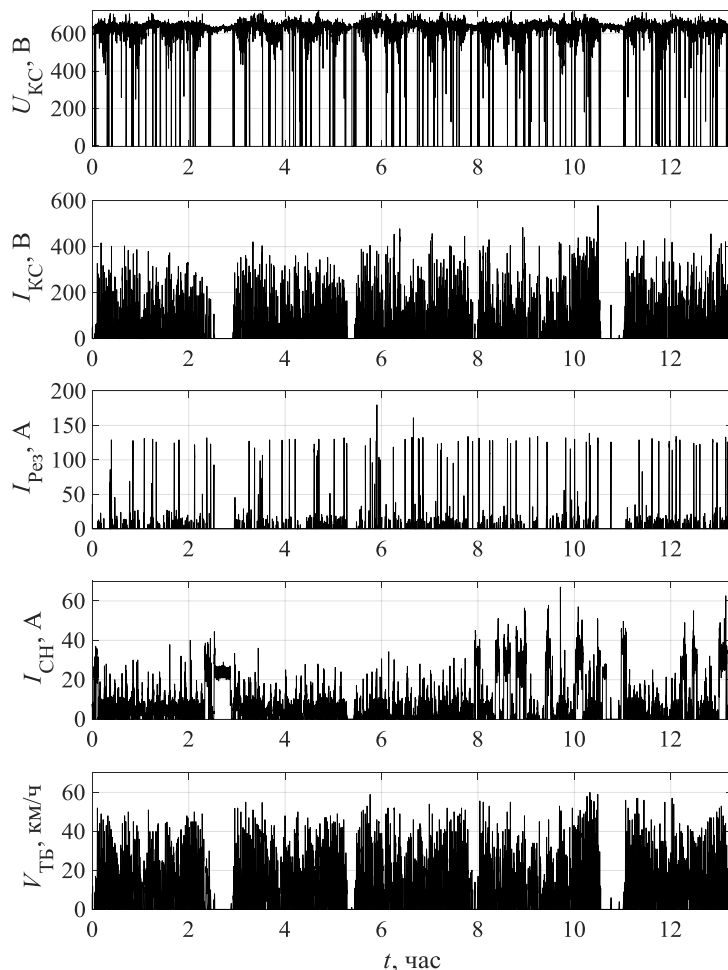


Рис. 4. Типовой график основных показателей при пробеге троллейбуса с двумя циклами «разгон-торможение». Ряд 1 – напряжение КС, Ряд 2 – токи тягового преобразователя (тяга + полезная рекуперация), Ряд 3 – ток тормозного резистора (избыточная рекуперация), А,), Ряд 4 – ток высоковольтных не тяговых потребителей, Ряд 5 – скорость, км/ч

Fig. 4. A typical graph of the main indicators for running a trolleybus with two acceleration-braking cycles. Row 1 is the voltage of the CS, Row 2 is the currents of the traction converter (thrust + useful recovery), Row 3 is the current of the braking resistor (excessive recovery), A,), Row 4 is the current of high-voltage non-traction consumers, Row 5 is the speed, km/h

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

Модель Solaris Trollino 12S

В ходе измерений польскими исследователями рекуперативных показателей троллейбуса Solaris Trollino 12S был сделан вывод, что на значение полезной составляющей энергии рекуперации во время фазы торможения наибольшее влияние оказывают факторы: общая масса транспортного средства, интенсивность фазы торможения и начальная скорость фазы торможения.

При прохождении элементарного городского цикла для троллейбуса Solaris Trollino 12S, восстанавливаемая при торможении рекуперация составила 12,9 – 20% от общей энергии потребления вагона [10].

Также в ходе указанных исследований было установлено, аналогично и нашим выводам, что уровень энергопотребления одинаков для конкретного маршрута, если условия эксплуатации поддерживаются одинаковыми и одинаков состав ЭПС [11].

Троллейбус МТБ-82

Ранее для одной из самых массовых марок троллейбусов МТБ-82 с реостатно-контакторной системой управления тягой был определён объём энергии рекуперации. Этот

тип троллейбуса имел ограниченную возможность рекуперативного торможения с возможностью выдачи рекуперации в КС при подключении тягового электродвигателя на последней ходовой позиции. Была определена доля полной энергии рекуперации до скорости 22 км/час, на которой поддерживаются минимальные обороты перед срывом рекуперации у тягового двигателя типа ДК-202: «...от скорости 50 км/час рекуперация энергии составляет 28,5%, а при торможении от скорости 40 км/час рекуперация энергии составляет 22,6% от энергии, затраченной на пуск троллейбуса в ход (с учётом потери энергии на нагрев пускового реостата)...» [12]. При этом для данного троллейбуса среднегодовой полный удельный расход энергии на тягу и нетяговые нужды на 1 км пути составлял 1,8 кВтч/км [12].

Модель ЗИУ-9

В октябре-ноябре 2012 г. в Санкт-Петербурге проводились измерения полезного объёма рекуперации (без учёта избыточной) на модернизированном на транзисторное управление тягой типовом троллейбусе модели ЗИУ-9. Показания определялись датчиками тока и напряжения тягового привода. Доля полезной энергии рекуперации от тягового энергопотребления достигла 20,9%, что превышает аналогичный показатель у троллейбуса ПКТС-6281.00 «Адмирал» в примерно таких же погодных условиях (18,87%). Однако, поскольку указанные измерения проводились на разных маршрутах движения, то сопоставление долей полезной рекуперации от тяги будет не совсем корректным, поскольку на маршрутах могли существенно отличаться дорожные условия (скорости начала торможения, наличие в КС полезной нагрузки).

Также в г. Новосибирске для троллейбусов ЗИУ-9, оснащённых тиристорной системой управления тягой, полный объём энергии рекуперации (полезной и избыточной) был определён в объёме до 32% от потребления на тягу [7].

В таблице 7 сведены показатели по полному потреблению энергии исследованными моделями троллейбусов, а также тяги, нетягового питания и полного объёма рекуперации.

Таблица 7

Результаты измерений энергетических показателей троллейбусов

Модель троллейбуса	Темп., °C	Q_T , кВтч/км	$E_T / (E_T + E_{CH})$, %	$E_{CH} / (E_T + E_{CH})$, %	$(E_{рек} + E_{торм}) / (E_T + E_{CH})$, %	$(E_{рек} + E_{торм}) / E_T$, %
ПКТС-6281.00 «Адмирал»	+4+2	2,1	76	24	22,88	28,93
Solaris Trollino 12S	+11+21	2,1	87,1	12,9	22**	25,26**
МТБ-82	н/д	1,8	93	7	28,5	30,65
ЗИУ-9 (модерн)	0+6	1,162	н/д	н/д	<32***	20,9**

**У троллейбусов Solaris Trollino 12S и ЗИУ-9 (СПб) измерялся только объём полезной рекуперации, избыточная рекуперация не учитывалась

***Отношение полного объёма энергии рекуперации к тяговому энергопотреблению ЗИУ-9 получено новосибирскими исследователями [7]

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

У троллейбусов одного класса по основным техническим характеристикам (Solaris Trollino 12S и ПКТС-6281.00 «Адмирал») при сравнимых условиях эксплуатации практически совпали значения показателя полного удельного энергопотребления вагонов (тяга и нетяговые нужды, кВтч/км). Поскольку измерения у троллейбуса «Адмирал» производились в более холодный период, то у него от полного энергопотребления доля тягового была ниже, а нетягового – выше, чем у зарубежного аналога для более тёплого сезона. При прочих равных условиях удельное полное энергопотребление у троллейбуса «Адмирал» будет ниже, чем у Solaris Trollino 12S.

Доля полного объёма рекуперированной энергии (полезной и избыточной) от тягового энергопотребления у трамвая выше в 1,5-2 раза, чем у троллейбуса, что может объясняться меньшей массой троллейбусов и их меньшей скоростью начала торможения, определяемой в значительной мере дорожной обстановкой. Последняя в меньшей степени влияет на движение трамваев.

В межсезонье доля нетягового энергопотребления двухосного троллейбуса может достигать четверти от полного энергопотребления (см. табл. 7), а в холодный период нетяговое энергопотребление может превышать тяговое [14]. У более энергооснащённых трёхсекционных трамваев по году доля нетягового энергопотребления может достигать

40%, при этом в холодные сезоны нетяговое энергопотребление может значительно превышать тяговое [15].

Выводы (Conclusions)

Общий объём рекуперации (полезной и избыточной) зависит, главным образом, от скорости начала торможения вагона и его массы, определяющих механическую энергию транспортных средств, которая преобразуется в работающих в режиме генерации тяговых двигателях в электрическую. При этом распределение рекуперации на полезную и избыточную части зависит, в основном, от наличия в КС достаточной по мощности для её приёма полезной нагрузки, складывающейся из потребления на тягу и нетяговые нужды вагонов. Также следует учитывать, что тяговое энергопотребление превышает значение рекуперации в одном цикле движения ПС, а у вагонов с большей массой затраты энергии на тягу превышают таковую у менее массивных транспортных средств.

В условиях городского движения полный объём электрической энергии рекуперации (полезной и избыточной) у трамваев может достигать половины от тягового энергопотребления, а у троллейбусов – четверти-трети. В исследовании зафиксирована разница в показателях доли электроэнергии рекуперации от тяговой у трамваев и троллейбусов, которая есть проявление зависимости их от объёмов преобразуемой механической энергии и от генеративных характеристик тяговых электромашин.

Подвижной состав различных производителей, но с близкими основными техническими характеристиками, при схожих условиях функционирования показывает сопоставимые показатели тягового и нетягового энергопотребления и полного объёма энергии рекуперации.

Лучшие показатели отношения полной энергии рекуперации (суммы полезной и избыточной) к полному потреблению (на тягу и собственные нужды) наблюдаются у троллейбусов с реостатно-контакторной системой управления тягой и возможностью выдачи рекуперации в КС типа МТБ-82. Этот факт (ср. таблицы 7 и 5) обусловлен меньшим значением у них снаряжённой массы тары вагона, слабой мощностью потребления собственных нужд и наличием потерь при преобразовании механической и электрической энергии только в тяговой электромашине (отсутствует тяговый преобразователь). Однако рекуперация механической энергии в электрическую при торможении в вагонах с РКСУ может происходить только до линейной скорости порядка 22 км/час, т.е. без тягового преобразователя имеется «недобор» рекуперации.

В холодные сезоны и на участках интенсивного движения ЭПС практически вся энергия рекуперации полезно утилизируется по контактной сети на повторное потребление сетевой тяговой и нетяговой нагрузкой. В таких условиях на участках интенсивного движения подвижного состава при низких наружных температурах применение буферных накопителей энергии является бесполезным. Этот вывод технически подтверждается на практике использования накопительных устройств, в особенности с учётом того, что потери энергии рекуперации при её транспортировке по медным проводам контактной сети в 4-5 раз меньше, чем потери этой же энергии при четырёхкратных преобразованиях в накопительных элементах и их преобразователях в одном цикле работы.

Получаемые в ходе непосредственного инструментального замера потребляемой и рекуперированной энергии на подвижном составе удельные значения этих показателей (в расчёте на 1 км пробега или на 1 тоннокилометр) могут использоваться в качестве фактической базы для построения симуляционных математических моделей расчёта систем тягового энергоснабжения в ГЭТ. При этом для корректного математического моделирования необходимо учитывать массо-габаритные характеристики подвижного состава, погодные условия, графики движения, пробег и некоторые другие факторы.

Литература

1. Capasso A., Ceraolo M., Lamedica R., Lutzemberger G., Ruvio A. Modelling and Simulation of Tramway Transportation Systems. In: Journal of Advanced Transportation. Vol. 2019. Article ID 4076865, 8 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4076865>.
2. Hubka L., Školník P. Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses. In: 2017 21st International Conference on Process Control (PC) / June 6–9, 2017, Štrbské Pleso, Slovakia.
3. Odijk M.A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. Transportation Research. Part B: Methodological. Vol. 30, № 6, 1996. Pp. 455–464.
4. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Energy Conversion and Management. In: Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. Vol. 75, November 2013, Pp. 374–388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>.

5. Adinolfi A., Lamedica R., Modesto C., Prudenzi A., Vimercati S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, № 4, 1998. Pp. 1536–1542.
6. Zheng Y., Ma Z., Liu N., Jin W. Study on Energy-Saving Optimization of Urban Rail Transit Train Timetable under Regenerative Braking. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2022. Article ID 5590736, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/5590736>.
7. Штанг А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация ... кандидата технических наук: НГТУ. Новосибирск. 2006. — 233 с.
8. Кацай А.В., Бизяев А.А., Козаревич В.А. Сравнение параметров работы маховичного накопителя в контактной сети трамвая в холодные и тёплые сезоны транспортной работы // Вестник МЭИ. Энергетика и электротехника. №2, 2023. С. 37-44.
9. Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation. Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology, Department of Power Electrical and Electronic Engineering. Brno. 2014. 91 p.
10. Siemionek E., Dziubiński M., Adamiec M., Kołodziej S. Analiza i symulacja zużycia energii przez trolejbus. In: Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 2017. Vol. 10. Pp. 1315-1318.
11. Siemionek E. Analysis of trolleybus energy consumption. In: Adv. Sci. Technol. Res. J. 2013; №7(18). Pp. 81-84. DOI: <https://doi.org/10.5604/20804075.1051261>.
12. Ребров С.А. Расход электроэнергии на движение троллейбусов. — Киев: книжная фабрика "Октябрь" Министерства культуры УССР, 1958. — 100 с.
13. Построение системы увеличенного автономного хода с ограничением потребляемого тока из контактной сети / В. А. Шаряков, О. Л. Шарякова, К. В. Шаряков, В. А. Лебедева // Бюллетень результатов научных исследований. – 2023. – № 4. – С. 146-157. – DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157. – EDN DUIXI.
14. Ярославцев М. В. Влияние потребления собственных нужд на возврат энергии в тяговую сеть троллейбуса при рекуперативном торможении // Наука. Технологии. Инновации : Сборник научных трудов в 9 частях, Новосибирск, 05–09 декабря 2016 года / под ред. Е.Г. Гуровой. Том Часть 5. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2016. – С. 255-256. – EDN XGPAFF.
15. Кацай А. В., Шевлюгин М. В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя // Электрические системы и комплексы. 2023. №1(58).С. 10-20.

Авторы публикации

Кацай Александр Владимирович – канд. филос. наук, генеральный директор ООО «Кинемак-Энерго», г. Москва, Россия. E-mail: proton764@mail.ru.

Шаряков Владимир Анатольевич – исполнительный директор ООО «Научно-производственное предприятие «ЭПРО» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС), г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v_a_shar@mail.ru.

References

1. Capasso A., Ceraolo M., Lamedica R., Lutzemberger G., Ruvio A. Modelling and Simulation of Tramway Transportation Systems. In: Journal of Advanced Transportation. Vol. 2019. Article ID 4076865, 8 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4076865>.
2. Hubka L., Školník P. Tram Simulation Model for Energy Balance Analyses. In: 2017 21st International Conference on Process Control (PC) / June 6–9, 2017, Štrbské Pleso, Slovakia.
3. Odijk M.A. A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables. Transportation Research. Part B: Methodological. Vol. 30, № 6, 1996. Pp. 455–464.
4. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Energy Conversion and Management. In: Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy. Vol. 75, November 2013, Pp. 374-388. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.039>.
5. Adinolfi A., Lamedica R., Modesto C., Prudenzi A., Vimercati S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 13, № 4, 1998. Pp. 1536–1542.
6. Zheng Y., Ma Z., Liu N., Jin W. Study on Energy-Saving Optimization of Urban Rail Transit Train Timetable under Regenerative Braking. Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2022. Article ID 5590736, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/5590736>.

7. Shtang A. A. Povyshenie effektivnosti elektrotransportnykh sistem na osnove ispol'zovaniya nakopitelei energii: spetsial'nost' 05.09.03 «Elektrotekhnicheskie kompleksy i sistemy»: dissertatsiya ... kandidata tekhnicheskikh nauk: NGTU. Novosibirsk. 2006. — 233 s.

8. Katsay A.V., Bizyaev A.A., Kozarevich V.A. Sravnenie parametrov raboty makhovichnogo nakopitelya v kontaktnoi seti tramvaya v kholodnye i teplye sezony transportnoi raboty. Vestnik MEI. Energetika i elektrotehnika. №2, 2023. S. 37-44.

9. Possibilities of energy demand reduction in trolleybus transportation. Faculty of Electrical Engineering and Communication Brno University of Technology, Department of Power Electrical and Electronic Engineering. Brno. 2014. 91 p.

10. Siemionek E., Dziubiński M., Adamiec M., Kołodziej S. Analiza i symulacja zużycia energii przez trolejbus. In: Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe. 2017. Vol. 10. Pp. 1315-1318.

11. Siemionek E. Analysis of trolleybus energy consumption. In: Adv. Sci. Technol. Res. J. 2013; №7(18). Pp. 81-84. DOI: <https://doi.org/10.5604/20804075.1051261>.

12. Rebrov S.A. Raskhod elektroenergii na dvizhenie trolleibusov. — Kiev: knizhnaya fabrika "Oktyabr" Ministerstva kul'tury USSR, 1958. — 100 s.

13. Sharyakov V. A., Sharyakova O. L., Sharyakov K. V., Lebedeva V. A. Postroenie sistemy uvelichenogo avtonomnogo khoda s ogranicheniem potrebyaemogo toka iz kontaktnoi seti. Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy. — 2023. — № 4. — S. 146-157. — DOI 10.20295/2223-9987-2023-4-146-157. — EDN DUIIXI.

14. Yaroslavtsev M. V. The influence of self-consumption on the return of energy to the traction network of a trolleybus during regenerative braking. Nauka. Technologies. Innovations : A collection of scientific papers in 9 parts, Novosibirsk, 05-09 December 2016 / edited by E.G. Gurova. Volume Part 5. — Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2016. — pp. 255-256. — EDN XGPAPF.

15. Katsay A.V., Shevlyugin M. V. Utilization of excess recovery in the contact network of electric vehicles when charging a stationary storage device. Electrical systems and complexes. 2023. No.1(58).pp. 10-20.

Authors of the publication

Alexander V. Katsay – Kinemak-Energo LLC, Moscow, Russia. E-mail: proton764@mail.ru.

Vladimir A. Sharyakov – NPP EPRO, St. Petersburg, Russia. E-mail: v_a_shar@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **04.09.2024 г.**

Отредактировано **13.09.2024 г.**

Принято **10.10.2024 г.**



ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Петрова Р.М., Абдуллин Л.И.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
1998renata@mail.ru

Резюме: В данной работе представлена методика расчета тепловых режимов кабельных линий (КЛ) напряжением 10 кВ для различных видов изоляции и условий эксплуатации, а также проведен анализ с использованием функций аппроксимации полученных результатов. Разработаны регрессионные модели зависимостей расчетного срока службы (T_{cl}) изоляции КЛ от коэффициента загрузки ($k_{зг}$) в различных условиях эксплуатации КЛ со следующими типами изоляции: бумажно-пропитанная (БПИ), изоляция из поливинилхлоридного пластиката (ПВХ) и изоляция из полиэтилена (ПЭ). Результаты исследования могут быть использованы для уточнения параметров КЛ при выборе их сечений. Применение разработанной методики для оценки температурных параметров и регулирования режимов эксплуатации КЛ позволит снизить число аварийных ситуаций, связанных с тепловыми пробоями. **ЦЕЛЬ.** Провести исследование, анализ и расчеты температурных параметров КЛ 10 кВ для различных $k_{зг}$ и способов прокладки в климатических условиях Республики Татарстан. **МЕТОДЫ.** Используются методы расчета тепловых параметров КЛ 10 кВ в различных режимах и их срока службы, методы статистической обработки данных в программном комплексе Excel и методы аппроксимации функций. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате исследований получены температурные параметры КЛ 10 кВ с различными типами изоляции для различных условий эксплуатации, построены регрессионные модели зависимостей расчетного T_{cl} изоляции от $k_{зг}$, позволяющие оценивать тепловые характеристики КЛ. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований и расчетов могут быть рекомендованы для оценки и выбора параметров эксплуатационных режимов КЛ 10 кВ на этапах эксплуатации и проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: тепловые режимы; кабельные линии; функция аппроксимации; коэффициент загрузки; срок службы.

Для цитирования: Цицонь И.И., Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Петрова Р.М., Абдуллин Л.И. Оценка параметров тепловых режимов кабельных линий напряжением 10 кВ при различных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 55-68. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68.

EVALUATION OF HEAT MODE PARAMETERS OF 10 kV CABLE LINES IN DIFFERENT OPERATION CONDITIONS

Tsitson I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Petrova R.M., Abdullin L.I.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
1998renata@mail.ru

Abstract: This paper presents a methodology for calculating thermal modes of 10 kV cable lines (CL) for different types of insulation and operating conditions, and analyzes using approximation functions of the obtained results. Regression models of dependences of estimated service life (T_{sl}) of CL insulation on loading factor (k_{zg}) in different operating conditions of CL with the following types of insulation: paper-impregnated insulation (PI), insulation made of polyvinyl chloride plasticate (PVC) and insulation made of polyethylene (PE) have been developed. The results of the study can be used to clarify the parameters of CLs when selecting their cross sections. Application

of the developed methodology for estimation of temperature parameters and regulation of CL operation modes will allow to reduce the number of emergency situations connected with thermal breakdowns. **OBJECTIVE.** To carry out research, analysis and calculations of temperature parameters of 10 kV CLs for different k_{zg} and methods of laying in climatic conditions of the Republic of Tatarstan. **METHODS.** Methods of calculation of thermal parameters of 10 kV CLs in different modes and their service life, methods of statistical data processing in the Excel program complex and methods of function approximation are used. **RESULTS.** As a result of researches the temperature parameters of 10 kV CLs with different types of insulation for different operating conditions have been obtained, regression models of dependences of the calculated T_{sl} of insulation on k_{zg} have been constructed, allowing to estimate the thermal characteristics of CLs. **CONCLUSION.** The results of the conducted researches and calculations can be recommended for estimation and selection of parameters of operating modes of 10 kV CL at the stages of operation and design of power supply systems.

Keywords: thermal modes; cable lines; approximation function; load factor; service life.

For citation: Tsitson I.I., Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Petrova R.M., Abdullin L.I. Evaluation of heat mode parameters of 10 kV cable lines in different operation conditions. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 55-68. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-55-68.

Введение (Introduction)

В настоящее время в нашей стране наблюдается развитие практически всех отраслей экономики. Вводятся в строй новые объекты энергетики и промышленности, административные и жилые здания. При этом одновременно развиваются системы электроснабжения, усложняется их структура.

Как известно, КЛ являются основными элементами электрооборудования для передачи электроэнергии. При этом, в условиях эксплуатации, в ряде случаев расчетный $T_{сл}$ оказывается существенно ниже заявленного в паспорте [8]. Одной из причин этого является тепловой пробой изоляции, который возникает вследствие аварийного режима работы КЛ [13]. В предлагаемой работе предлагается методика расчета температурных параметров КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации для различных типов изоляции кабелей.

Целью исследования является исследование и оценка температурных параметров КЛ 10 кВ при различных способах их прокладки и различных $k_{зг}$ для климатических условий Республики Татарстан.

Научной и практической значимостью исследования является повышение эффективности эксплуатации КЛ-10 кВ с помощью применения регрессионных моделей для оценки и контроля параметров тепловых режимов. Разработанные модели могут быть рекомендованы для уточнения характеристик КЛ при выборе их сечения с учетом тепловых режимов эксплуатации.

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

Так, авторами Грачевой Е.И. и Муравьевым Г.Г. в [2] исследованы тепловые режимы работы и параметры КЛ. В работе определены зависимости влияния технических характеристик и $k_{зг}$ кабеля на температуру и потери мощности, которые возникают вследствие нагрева жил.

Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. в [3] исследовали эквивалентные сопротивления схем цеховых сетей с учетом влияния фактора нагрева проводников.

Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. в [4] исследовали различные методы определения потерь электроэнергии по графикам нагрузок за расчетный промежуток времени, а также оценили погрешности расчетов и выявили причины их появления.

В [5] Грачевой Е.И. разработаны регрессионные модели для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии.

Грачевой Е.И., Наумовым О.В., Горловым А.Н. в [6] исследована зависимость сопротивления проводника от его температуры, а также определена зависимость эквивалентного сопротивления цеховых сетей от основных влияющих факторов.

Грачевой Е.И. и Горловым А.Н. в [7] принят метод графического интегрирования в качестве эталонного при определении погрешностей некоторых методов расчета потерь электроэнергии. Анализ различных методов расчета потерь электроэнергии показал, что

целесообразность выбора метода должна быть обусловлена соответствием методических и информационных погрешностей.

Коржов А.В., Сидоров А.И. в [8] исследовали методы и модели оценки состояния изоляции КЛ 6(10) кВ.

Липидус А.А., Соловьева С.Н., Перфильев А.П. в [9] представили методику расчета температурных параметров кабелей. В исследовании учтены факторы температуры окружающей среды и токораспределения в параллельных ветвях.

Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. в [10] исследовали тепловое поле кабеля с учетом тепловых потерь в экранах. В результате исследований смоделировано температурное поле с учетом температуры окружающей среды и коэффициента загрузки кабелей. При этом выделены кабели, которые находятся в худших условиях охлаждения. А в [11] Труфановой Н.М., Казаковым А.В. и Кухарчуком И.Б. исследованы зависимости и разработаны параметрические модели зависимости температуры КЛ в канале от загрузки кабелей с учетом температуры внешней среды. В работе представлена двухэтапная методика анализа тепловых процессов в изоляции и жилах КЛ в зависимости от различных способов прокладки: на воздухе, в земле, в земле в трубе с учетом температуры окружающей среды.

Бирюлиным В.И., Куделиной Д.В., Горловым А.Н. в [12] исследован процесс нагрева изоляции КЛ и выделены основные факторы, влияющие на процесс нагрева. Предложен метод, позволяющий учитывать при расчете температуры кабеля тепловое воздействие от других КЛ, проложенных рядом в одной траншее с учетом потерь тепла, вызванных протеканием блуждающих токов в металлической оболочке брони.

Зализным Д.И., Прохоренко С.Н. в [13] разработана математическая модель тепловых процессов одножильного кабеля. На основе расчетов разработана тепловая схема замещения кабеля, которая учитывает температуру внутренней и внешней окружающей среды. Внутренняя окружающая среда представлена в качестве полого цилиндра, границы которого совпадают с поверхностью кабеля, а внешняя окружающая среда характеризуется температурой воздуха за пределами внутренней области. Адекватность полученной модели подтверждается экспериментальными данными.

Schmidt H.P. в [14] разработал модели тепловых и электрических характеристик промышленных КЛ. В работе показана модель, описывающая влияние температуры окружающей среды на тепловой режим работы КЛ, построена схема замещения в соответствии с результатами расчетов.

Ученым из Саудовской Аравии, Mamdooh A-S., в [15] исследовано влияние параметров теплового контура на подземный кабель с помощью программы Anfis. Автор определил основные факторы, влияющие на тепловой режим КЛ, такие как температура окружающей среды, удельное сопротивление грунта и величина токов, протекающих через проводник. Также разработаны модели распределения тепла внутри КЛ с учетом теплового сопротивления почвы, температуры окружающей среды, глубины прокладки и расстояния между КЛ.

Millar R. J. в [16] предлагает порядок мониторинга и расчета параметров переходных процессов в КЛ в режиме реального времени.

Голландскими учеными R. Jongen; E. Gulsky; J. Smith в [17] исследованы температурные режимы КЛ.

Baazzim M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. в [18] проведена оценка силы тока (токонесущей способности) подземной силовой кабельной системы аналитическими и численными методами для различных условий, таких как глубина залегания кабеля, расстояние между фазами, удельное тепловое сопротивление грунта, температура окружающей среды, скорость ветра. Используемый аналитический или традиционный метод основан на методе термического анализа, разработанном Neher-McGrath.

Как показывает практика, исследования, связанные с анализом тепловых режимов КЛ 10 кВ, являются актуальными.

Отличие представленной работы от других исследований, проводимых советскими, российскими и зарубежными учеными, заключается в получении расчетных данных для КЛ-10 кВ с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией и разработке регрессионных моделей, с помощью которых можно рассчитать реальный $T_{сл}$ КЛ при прокладке в земле в трубе, который зависит от $k_{зг}$ и температуры окружающей среды.

Так, например, согласно главе 1.3 ПУЭ [1] допустимая кратковременная перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ представлена на рисунке 1.

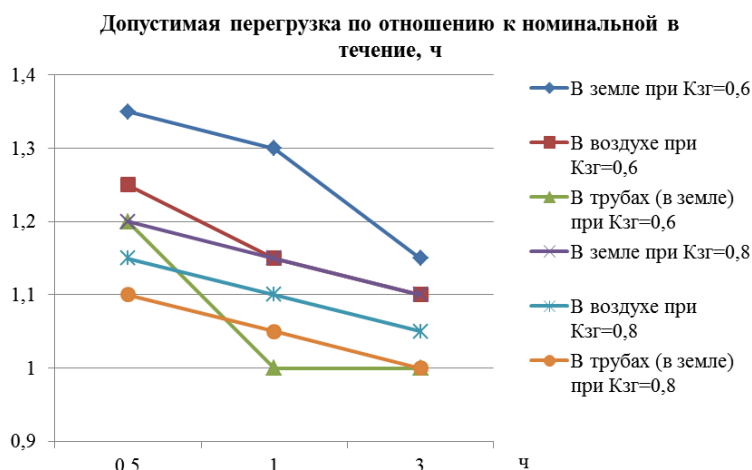


Рис. 1. Допустимая кратковременная перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ, несущих нагрузки меньше номинальных, может допускаться кратковременная перегрузка, указанная на рисунке 1. На рисунке 1 видно, что при $K_{зг} = 0,6$ допускается длительная перегрузка (до 1,35), в отличие от $K_{зг} = 0,8$ (до 1,2).

На период ликвидации послеаварийного режима для кабелей с ПЭ изоляцией допускается перегрузка до 10% свыше значений, приведенных на рисунке 1, а для кабелей с ПВХ изоляцией до 15% номинальной на время максимумов нагрузки продолжительностью не более 6 часов в сутки в течение 5 суток, при условии, что нагрузка в остальные периоды времени суток не превышает номинальной.

Допустимая на период ликвидации послеаварийного режима перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ приведена на рисунке 2.

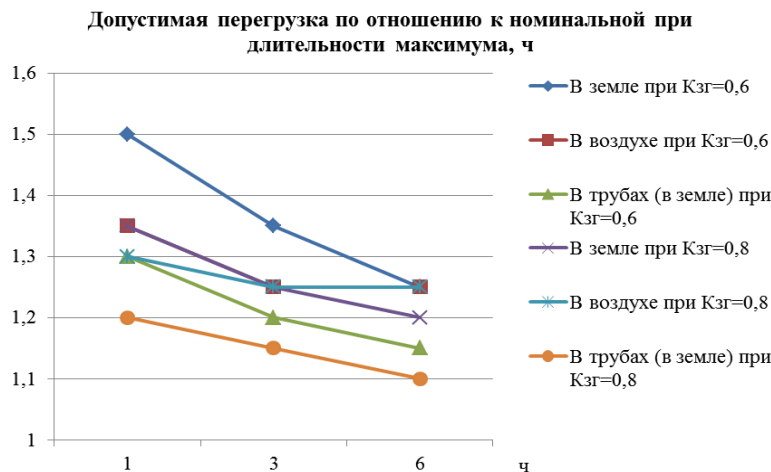


Рис. 2. Допустимая на период ликвидации послеаварийного режима перегрузка для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На период ликвидации послеаварийного режима для кабелей напряжением до 10 кВ с БПИ изоляцией допускаются перегрузки в течение 5 суток в пределах, указанных на рисунке 2.

Для кабельных линий с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией, находящихся в эксплуатации более 15 лет, допустимая перегрузка должна быть понижена на 10%.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методика расчета температурных параметров КЛ 10 кВ

Для проведения расчетов параметров тепловых режимов КЛ при различных условиях эксплуатации используется методика по определению тепловых сопротивлений на каждом из участков кабеля от токопроводящей жилы к окружающей среде в зависимости от способа

прокладки – в трубе, в земле, в земле в трубе. Для проведения исследования рассматриваются трехжильные КЛ 10 кВ с расчетным током $I_p = 120$ А и параметрами, указанными в таблице 1. Среднемесячная летняя температура по Республике Татарстан составляет 20°C согласно климатическим и метеорологическим данным.

Для проведения расчетов приняты следующие средние значения $k_{зг}$ в зависимости от материала токопроводящих жил КЛ 10 кВ:

- для алюминиевых жил $k_{зг} = 0,88$,
- для медных жил $k_{зг} = 0,7$.

Значения $k_{зг}$ приняты на основании данных ГОСТ по силовым кабелям, а именно ГОСТ 16442-80, ГОСТ 18410-73 и ГОСТ Р 55025-2012.

В таблице 1 представлены данные вида изоляции, материала жил и марки кабелей.

Таблица 1
Table 1

Марка, вид изоляции и материал жил КЛ <i>Brand, type of insulation and material of the cores</i>			
Марка КЛ	Изоляция	Материал жилы	Наличие брони
ВВГ 3x70-10	ПВХ изоляция	Медь	Отсутствует
АВВГ 3x70-10		Алюминий	
ААШв 3x70-10	БПИ	Алюминий	Отсутствует
ППГ 3x70-10	Изоляция из полиэтилена	Медь	Отсутствует
АППГ 3x70-10		Алюминий	

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

На рисунке 3 представлена типовая тепловая схема замещения трехжильной КЛ с обозначением термических сопротивлений при переходе от жилы кабеля к окружающей среде.

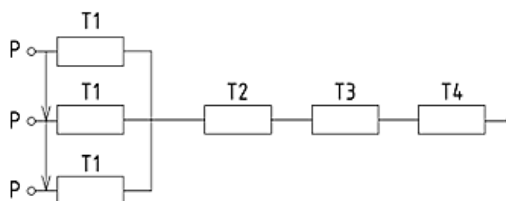


Рис. 3. Типовая тепловая схема замещения *Fig. 3. Typical thermal equivalent circuit of a three-core cable 10kV*

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

Описание элементов схемы замещения (рис. 3):

- P – потери активной мощности 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.

В качестве примера представим расчет температурных параметров КЛ 10 кВ марки ААШв-3х-70 с БПИ изоляцией, длиной 1000 м.

Расчет включает определение тепловых сопротивлений представленной на рисунке 3 типовой тепловой схемы замещения.

$$T_1 = \frac{\rho_r}{2\pi} 3F_2 \ln\left[\frac{d_a}{2r_1}\right] \quad (1)$$

где:

- r_1 – радиус окружности, описанной вокруг жил КЛ, мм;
- d_a – наружный диаметр оболочки КЛ, мм;
- ρ_r – удельное тепловое сопротивление материала оболочки КЛ, К·м/Вт;
- F_2 – геометрический коэффициент, определяемый по формуле (2)

$$F_2 = \frac{3t}{2\pi(d_x + t) - t} \quad (2)$$

где:

d_x – диаметр круглой жилы с такой же площадью поперечного сечения и степенью уплотнения, что и фасонная жила, мм;
 t – толщина изоляции между жилами КЛ, мм;
 $T_2=0$, так как отсутствует броня.

При наличии брони T_2 определяется по формуле (3)

$$T_2 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_2}{d_a}\right] \quad (3)$$

где:

t_2 – толщина подушки под броней КЛ, мм.

$$T_3 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2t_3}{d_a}\right] \quad (4)$$

где:

t_3 – толщина наружного защитного покрова КЛ, мм.

Для определения T_4 используются выражения в зависимости от способа прокладки КЛ.

При прокладке КЛ в воздухе – по формуле (5)

$$T_4 = \frac{1}{\pi d_a 10^{-3} \left(\frac{Z}{d_a^g} + E\right) \sqrt{\Delta t_n}} \quad (5)$$

где:

Δt_n – разность температур поверхности КЛ и окружающей среды, К;

Z, E, g – константы, определяющиеся конфигурацией геометрического расположения КЛ при прокладке в воздухе.

При прокладке в траншее – по формуле (6)

$$T_4 = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left[4 \frac{L}{d_a}\right] \quad (6)$$

где:

ρ_r – удельное тепловое сопротивление грунта, К·м/Вт;

L – глубина прокладки КЛ, мм.

При прокладке КЛ в трубе (канале) – по уравнению (7)

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \quad (7)$$

где:

T_4' – тепловое сопротивление между КЛ и каналом (трубой), в которых проложена КЛ, К·м/Вт;

T_4'' – тепловое сопротивление стенки канала (трубы), К·м/Вт;

T_4''' – внешнее тепловое сопротивление канала (трубы), К·м/Вт.

$$T_4' = \frac{U}{1 + 0,1(V + Y)D_a} \quad (8)$$

где:

U, V, Y – константы, зависящие от типа канала (трубы),

$$T_4'' = \frac{\rho_r}{2\pi} \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (9)$$

где:

D_0 – наружный диаметр канала (трубы), мм;

D_d – внутренний диаметр канала (трубы), мм;

T_4''' определяем аналогично по формуле (6).

Для трехжильной КЛ температура жил выражается в °С и определяется по формуле (10)

$$t_{ж} = P_{ж} T_1 + 3P_{ж} (T_2 + T_3 + T_4) + t_{окр.} \quad (10)$$

где:

$t_{окр.1}$ – температура окружающей среды, °С.

Потери активной мощности в жилах КЛ определяем по формуле (11)

$$P_{ж} = 3I_1^2 \frac{\rho_l}{S} \quad (11)$$

где:

l – длина КЛ, м;

S – площадь поперечного сечения жил КЛ, мм²;

ρ – удельное электрическое сопротивление токопроводящей жилы КЛ, Ом×мм²/м.

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, $k_{зг} = 0,7$ – медных жил

The results of calculations of temperature parameters of cable 10 kV for various laying methods,

with $k_{зг} = 0.88$ for aluminum cores, $k_{зг} = 0.7$ 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
ВБШв 3х70-10	Земля	0,076	0,028	0,05	0,84	49,6 °С
	Земля+труба	0,076	0,028	0,05	1,03	55,6 °С
АВБШв 3х70-10	Земля	0,076	0,028	0,05	0,84	68,8 °С
	Земля+труба	0,076	0,028	0,05	1,03	78,8 °С
ААШв 3х70-10	Земля	0,05	0	0,064	0,88	65,6 °С
	Земля+труба	0,05	0	0,064	1,03	77,5 °С
	Воздух	0,05	0	0,064	0,8	69,7 °С
ВВГ 3х70-10	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	47,3 °С
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	54,5 °С
АВВГ 3х70-10	Воздух	0,048	0	0,054	0,8	65,2 °С
	Земля+труба	0,048	0	0,054	1,03	77,1 °С
ППГ 3х70-10	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	46,2 °С
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	55,5 °С
АППГ 3х70-10	Воздух	0,03	0	0,036	0,79	63,2 °С
	Земля+труба	0,03	0	0,036	1,08	78,5 °С

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

Полученные результаты подтверждают, что основными факторами, влияющими на нагрев жил являются величина протекающего тока ($k_{зг}$) и температура окружающей среды. Способ прокладки и тип изоляции в меньшей мере влияют на нагрев.

Проведем оценку скорости старения изоляции, используя полученные результаты. Для расчета скорости старения изоляции используем закон Аррениуса. Уравнение зависимости скорости термической реакции от температуры КЛ по закону Аррениуса определяется соотношением (12)

$$t_{p1} e^{\frac{-W_a}{kT_1}} = t_{p2} e^{\frac{-W_a}{kT_2}}, \quad (12)$$

где:

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

W_a – энергия активации в расчете на одну молекулу;

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

T_1 и T_2 – значения абсолютных температур исследуемых КЛ соответственно.

Нормативный $T_{сл}$ для КЛ составляет 30 лет или 262800 часов по паспортным данным, поэтому определение расчетного срока службы изоляции для КЛ 10 кВ определяется относительно данного значения.

Составление функций аппроксимации

Построим график зависимости $T_{сл}$ для КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ и аппроксимируем полученную функцию. В качестве уравнений регрессии рассмотрим линейную зависимость, полиномиальную и экспоненциальную после чего рассчитаем среднюю ошибку аппроксимации и найдем наиболее достоверную функцию, которая описывает данную зависимость.

Исследуем линейную зависимость и проведем расчеты параметров функции (рис. 4).

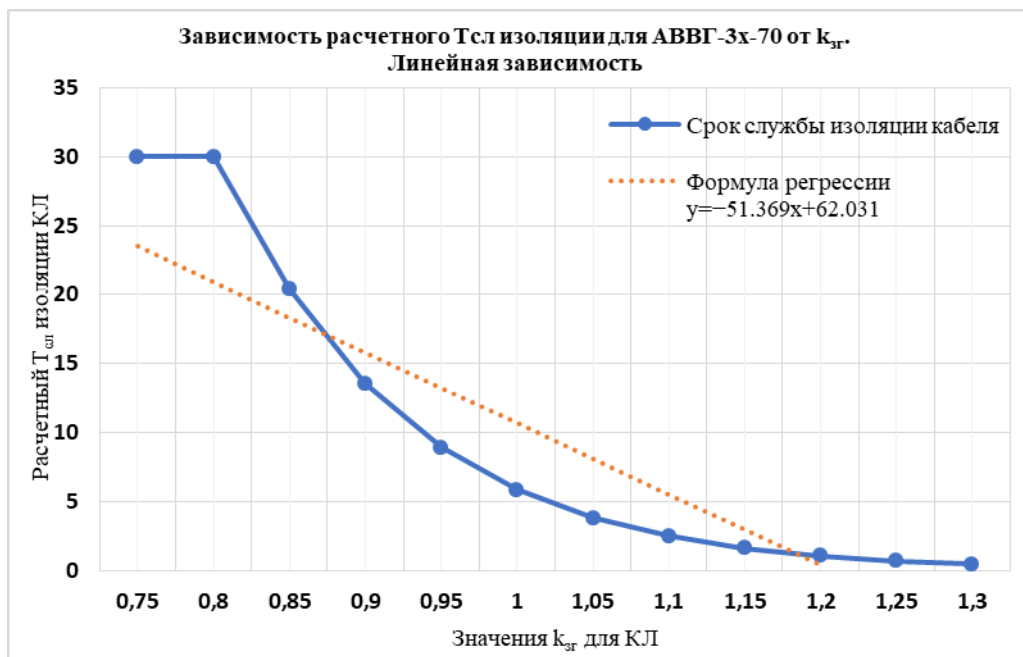


Рис. 4. График зависимости расчетного $T_{сл}$ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ (линейная зависимость)

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

Определим уравнение линейной регрессии, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации.

Уравнение линейной регрессии в общем виде

$$y = ax + b; \tag{13}$$

где:

a, b – коэффициенты регрессии.

Коэффициент регрессии a

$$a = \frac{\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}; \tag{14}$$

где:

x_i – расчетное значение $k_{зг}$;

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

Коэффициент регрессии b

$$b = \frac{\sum x_i \sum x_i y_i - \sum x_i^2 \sum y_i}{(\sum x_i)^2 - n \sum x_i^2}; \tag{15}$$

Коэффициент линейной парной корреляции r_{xy}

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}}; \tag{16}$$

где:

n – число наблюдений.

Коэффициент детерминации

$$R^2 = r_{xy}^2; \tag{17}$$

где:

r_{xy} – коэффициент линейной парной корреляции.

Значение средней ошибки аппроксимации

$$A = \frac{1}{n} \sum \frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i} \times 100\%; \tag{18}$$

где:

n – число наблюдений;

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

\bar{y}_i – теоретическое значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

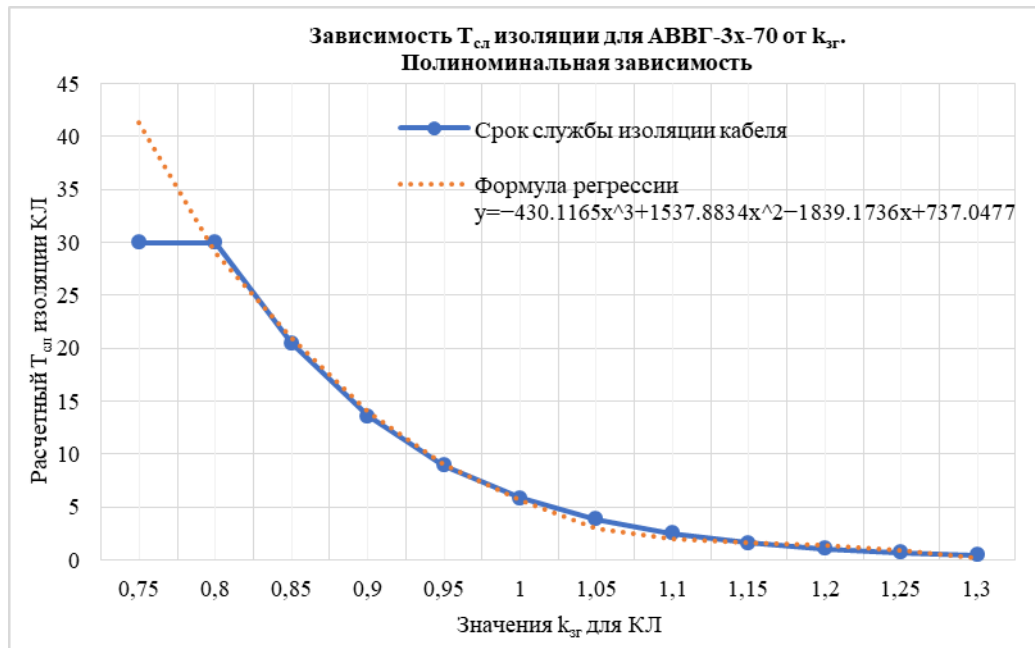


Рис. 5. График зависимости расчетного $T_{сл}$ КЛ АВВГ-3х-70 10 кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ КЛ (полиномиальная зависимость) *Fig. 5. Graph of the dependence of the calculated T_{sl} of the AVVG-3x-70 10 kV cable line when laid in the ground in a pipe on the k_{zg} cable line (polynomial dependence)*

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

Определим уравнение регрессии полиномиальной (кубической) зависимости (рис. 5), коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации.

Уравнение регрессии в общем виде

$$y^- = ax^3 + bx^2 + cx + d; \quad (19)$$

где:

a, b, c – коэффициенты регрессии.

Система уравнений для нахождения коэффициентов a, b и c:

$$\begin{aligned} a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i + nd &= \sum y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 + d \sum x_i &= \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^5 + b \sum x_i^4 + c \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 &= \sum x_i^2 y_i, \\ a \sum x_i^6 + b \sum x_i^5 + c \sum x_i^4 + d \sum x_i^3 &= \sum x_i^3 y_i; \end{aligned} \quad (20)$$

Коэффициент детерминации

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - y^-)^2}{\sum (y_i - \bar{y}^-)^2}}, \quad (21)$$

где:

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

y^- – теоретическое значение $T_{сл}$ изоляции КЛ;

\bar{y}^- – среднее расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

Значение средней ошибки аппроксимации находим по формуле 19.

Результаты расчетов показаны в таблице 3.

Определим уравнение регрессии для экспоненциальной зависимости (рис. 6).

Определим уравнение регрессии экспоненциальной функции, коэффициент детерминации и среднюю ошибку аппроксимации:

Уравнение регрессии экспоненциальной функции в общем виде

$$y^- = e^{a+bx}; \quad (22)$$

где:

a, b – коэффициенты регрессии.

Коэффициент регрессии a

$$a = \frac{1}{n} \sum \ln y_i - \frac{b}{n} \sum x_i; \quad (23)$$

где:

n – число наблюдений.

Коэффициент регрессии b

$$b = \frac{n \sum x_i \ln y_i - \sum x_i \times \sum \ln y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (24)$$

где:

x_i – расчетное значение $k_{зг}$;

y_i – расчетное значение $T_{сл}$ изоляции КЛ.

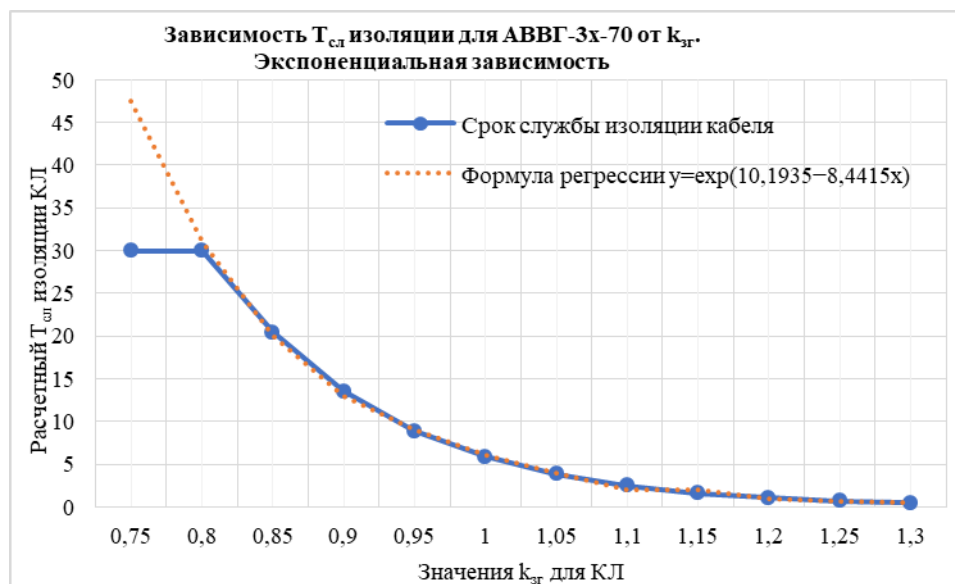


Рис. 6. График зависимости расчетного $T_{сл}$ КЛ АВВГ-3х-70 10кВ при прокладке в земле в трубе от $k_{зг}$ КЛ (экспоненциальная зависимость) *Fig. 6. Graph of the dependence of the calculated T_{sl} of the AVVG-3x-70 10 kV cable line when laid in the ground in a pipe on the k_{zg} cable line (exponential dependence)*

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

Проведем аналогичные расчеты и определим уравнения аппроксимации для КЛ 10 кВ с ПЭ и БПИ изоляцией. Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Результаты вычислений коэффициентов функций аппроксимации
Results of calculations of coefficients of approximation functions

Тип изоляции КЛ 10кВ	Уравнение аппроксимации	Вид аппроксимирующей функции	Коэффициент детерминации	Средняя ошибка аппроксимации, %
ПВХ	$y = -430,1165x^3 + 1537,8834x^2 - 1839,1736x + 737,0477$	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
БПИ	$y = \exp(9,4081 - 8,3726x)$	Экспоненциальная	0,9795	4,6
ПЭ	$y = \exp(9,7698 - 8,1386x)$	Экспоненциальная	0,9284	7,6

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

Как показали исследования, наиболее достоверной регрессионной моделью, описывающей зависимость $T_{сл}$ КЛ 10 кВ от $k_{зг}$ является экспоненциальная функция, так как значение средней ошибки аппроксимации для данной зависимости составляет наименьшее значение, а коэффициент детерминации близок к единице. Таким образом, зависимость $T_{сл}$ изоляции КЛ 10 кВ с ПВХ изоляцией от $k_{зг}$ наиболее достоверно можно описать уравнением

$$t = \exp(10,1935 - 8,4415k); \quad (25)$$

где:

t – расчетный $T_{сл}$ изоляции КЛ при паспортном $T_{сл}$ в 30 лет;

k – $k_{зг}$ для КЛ.

В результате проведенных исследований построены регрессионные модели зависимости расчетного $T_{сл}$ изоляции от $k_{зг}$ для КЛ 10 кВ, проложенных в земле в трубе с ПЭ, БПИ и ПВХ изоляцией. Установлено, что наиболее достоверной функцией является экспоненциальная зависимость. С помощью полученных в результате исследования уравнений возможно определять реальный $T_{сл}$ для КЛ 10 кВ с ПЭ, ПВХ и БПИ изоляцией при прокладке в земле в трубе, зная величину $k_{зг}$. Это позволяет определять сечение КЛ на этапе проектирования и прогнозировать расчетный $T_{сл}$ для КЛ, которые находятся в эксплуатации.

Обсуждение результатов (Results and discussions)

В результате проведенных исследований рассчитаны температурные параметры КЛ 10 кВ при различных способах прокладки и для различных типов изоляции. Определены функции аппроксимации зависимости расчетного срока службы изоляции КЛ от их загрузки и выбраны наиболее точные из них при помощи расчета средней ошибки аппроксимации и анализа результатов. По экспоненциальным уравнениям можно определить реальный $T_{сл}$ КЛ 10 кВ с ПЭ, ПВХ или БПИ изоляцией при прокладке в земле в трубе. Данная зависимость имеет наибольший коэффициент детерминации, равный 0,9984 и среднюю ошибку аппроксимации в 1,5%, что позволит рекомендовать полученные модели для уточнения сечений КЛ-10 кВ на этапе проектирования, а также прогнозировать расчетный $T_{сл}$ для КЛ, которые находятся в эксплуатации.

Установлено, что КЛ, проложенные в земле в трубе, испытывают наибольший нагрев, так как затрудняется теплообмен с окружающей средой.

Выводы (Conclusions)

1. Рассчитаны температурные параметры КЛ 10 кВ при различных условиях эксплуатации и с различными типами изоляции, с учетом климатических условий Республики Татарстан.

2. Проведен анализ полученных температурных параметров КЛ 10 кВ, в результате которого установлено, что при прокладке в земле в трубе, КЛ испытывают наибольшую тепловую нагрузку из-за затрудненного теплообмена, вследствие чего их реальный $T_{сл}$ снижается.

3. Разработаны регрессионные модели зависимости расчетного $T_{сл}$ от $k_{зг}$ КЛ 10 кВ с различными типами изоляции. Уравнения аппроксимации позволяют рассчитать реальный $T_{сл}$ для кабелей при их прокладке в земле в трубе с ПЭ, БПИ и ПВХ изоляцией, в зависимости от величины $k_{зг}$. При этом, с помощью полученных данных, возможно регулировать режимы работы КЛ и снижать число потенциальных аварийных ситуаций, вызванных тепловым пробоем вследствие длительной перегрузки.

Литература

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ. 7-е изд. – Раздел 1, глава 1.3 (Утв. Приказом Минэнерго России от 20.05.2003 № 187).
2. 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.
3. 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.
4. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
5. Грачева Е.И. Разработка регрессионных моделей для анализа и прогнозирования потерь электроэнергии в низковольтных сетях / Е.И. Грачева, Т.А. Серпионова // Вестник КГЭУ. 2015. № 2(26). С. 45-51.
6. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н. Проблемы исследования эквивалентного сопротивления электрических цеховых сетей низкого напряжения // Вестник КГЭУ. 2019. №3 (43).
7. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Оценка потерь электроэнергии во внутривоздушных электрических сетях // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 4 (13). С. 38-50.
8. Коржов, А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6(10) кВ городских электрических сетей: моногр. /А.В. Коржов, А.И. Сидоров. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. С. 252.

9. Лapidус А.А., Соловьева С.Н., Перфильев А.П. Расчет температуры нагрева кабелей электродвигателей собственных нужд с учетом токораспределения в параллельных ветвях // ИЗВЕСТИЯ НТЦ ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. 2023. С. 114-126.

10. Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. Расчет теплового поля кабельного канала с учетом потерь в экранах кабеля // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника информационные технологии, системы управления. 2018. № 28. С. 179-193.

11. Труфанова Н.М., Казакова А.В., Кухарчук И.Б. Подходы к представлению зависимости температур кабельных линий в канале от их загрузки в виде параметрической модели // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника информационные технологии, системы управления. 2021. №40. С. 61-75.

12. 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.

13. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля/Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко// Изв. высш. учеб. заведений и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. 2012. № 5. С. 25-34.

14. Schmidt, H-P. Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables / H-P Schmidt // Modelling and simulation. June, 2008. P. 523-532.

15. Mamdooh, S. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Thermal Field Evaluation of Underground Cable System / S. Mamdooh // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. № 6. P. 1642-1650.

16. Millar, R. J. Real-Time Transient Temperature Computation of Power Cables Including Moisture Migration Modelling / R. J. Millar, M. Lehtonen // PSCC, Session 39. Liege. 2005. P. 4.

17. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghghi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling // Scientia Iranica D. 2012. № 19(3). P. 707-720.

18. Baazzim, M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. Comparison of Finite-Element and IEC Methods for Cable Thermal Analysis under Various Operating Environments // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 484-489.

Авторы публикации

Цицонь Иван Иванович – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. honey.roditel@mail.ru

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Петрова Рената Маратовна – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru

Абдуллин Линар Ильфатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета. abdullin.linar@mail.ru

References

1. Rules for Electrical Installations (PUE. 7th ed. – Section 1, Chapter 1.3 (approved by Order of the Ministry of Energy of Russia № 187 of 20.05.2003).

2. Gracheva, E.I.; Muravyev, G.G. Investigation of the temperature modes and parameters of the cable lines of the electrical equipment of the electrical stations (in Russian) // Science. TECHNOLOGIES. INNOVATIONS. 2020. Vol. 4. Pp. 151-154.

3. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Shakurova Z.M., Tabachnikova T.V. Equivalent resistance of industrial electrical networks - as one of the main characteristics in the calculations of electricity losses // Instrumentation and AUTOMATIZED ELECTRIC TRIC DIRECTION in the fuel and energy complex and housing and communal services. 2022. Pp. 540-544.

4. Gracheva, E.I.; Shakurova, Z.M.; Abdullazyanov, R.E. Comparative analysis of the most widespread deterministic methods of the electric power losses determination in the shop floor networks (in Russian) // Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniye. Problems of power engineering. 2019. № 5. Pp.87-96.

5. Gracheva, E.I. Development of regression models for the analysis and forecasting of power losses in low-voltage networks / E.I. Gracheva, T.A. Serpionova // Vestnik of KSEU. 2015. № 2(26). Pp. 45-51.

6. Gracheva, E.I.; Naumov, O.V.; Gorlov, A.N. Problems of research of the equivalent resistance of the electrical shop networks of low voltage // Vestnik of KSEU. 2019. №3 (43).

7. Gracheva, E.I.; Gorlov, A.N.; Shakurova, Z.M. Estimation of electric power losses in the in-plant electric networks // Vestnik of PITTU named after academician M. Osimi. 2019. № 4 (13). Pp. 38-50.

8. Korzhov A.V., Korzhov A.V., Sidorov A.I. Methods and models of the insulation state and electrical safety assessment of the 6(10) kV cable lines of the city electric networks: monograph. – Chelyabinsk: Publishing center of SUSU, 2009. P. 252.

9. Lapidus, A.A.; Solovyova, S.N.; Perfiliev, A.P. Calculation of the heating temperature of the cables of the auxiliary electric motors taking into account the current distribution in the parallel branches (in Russian) // Izvestiya STC UNITED ENERGY SYSTEM.2023. Pp.114-126.

10. Trufanova, N.M.; Kukharchuk, I.B.; Feofilova, N.V. Calculation of the thermal field of the cable channel taking into account the losses in the cable screens (in Russian) // Vestnik of Perm National Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2018. № 28. Pp. 179-193.

11. Trufanova, N.M.; Kazakova, A.V.; Kukharchuk, I.B. Approaches to the representation of the cable lines temperature dependence in the channel from their loading in the form of a parametric model (in Russian) // Bulletin of Perm National Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, control systems. 2021. №40. Pp. 61-75.

12. Biriulin, V.I.; Kudelina, D.V.; Gorlov, A.N. Calculation of the cable insulation heating temperature taking into account the influence of the side-by-side laid cables (in Russian) // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. 2019. T. 11. № 2 (42). Pp. 56-64.

13. Zalizny, D. I. Mathematical model of thermal processes of a single-core power cable // I. I. Zalizny, S. N. Prokhorenko // Izvestia vysshekh. ucheb. uchebnykh uchebnykh i energeticheskoye ob-nye CIS. Energetics. 2012. № 5. Pp. 25-34.

14. Schmidt, H-P. Efficient Simulation of Thermal and Electrical Behaviour of Industrial Cables / H-P Schmidt // Modelling and simulation. June, 2008. Pp. 523-532.

15. Mamdooh, S. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Thermal Field Evaluation of Underground Cable System / S. Mamdooh // Journal of Energy and Power Engineering. 2012. № 6. Pp. 1642-1650.

16. Millar, R. J. Real-Time Transient Temperature Computation of Power Cables Including Moisture Migration Modelling / R. J. Millar, M. Lehtonen // PSCC, Session 39. Liege. 2005. P. 4.

17. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghihi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling // Scientia Iranica D. 2012. № 19(3). Pp. 707-720.

18. Baazzim, M.S., Al-Saud M.S., El-Kady M.A. Comparison of Finite-Element and IEC Methods for Cable Thermal Analysis under Various Operating Environments // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2014. Vol. 8. № 3. Pp. 484-489.

Authors of the publication

Ivan I. Tsitson – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. honey.roditel@mail.ru

Edward Yu. Abdullazyanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>. grachieva.i@bk.ru

Renata M. Petrova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0009-0004-2508-8771>. 1998renata@mail.ru

Linar I. Abdullin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
abdullin.linar@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **09.09.2024 г.**

Отредактировано **16.10.2024 г.**

Принято **18.10.2024 г.**



РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

Басенко В.Р., Цветков А.Н., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р., Рахмаев Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vasiliybas123@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. Переход на электрический вид транспорта становится все более и более актуальным, ввиду развития технологий в области электрических двигателей и накопителей энергии. Одной из задач, поставленных перед специалистами в области электрического транспорта, сегодня является переход водных видов транспорта с двигателей внутреннего сгорания на полностью электрический привод. В данной статье приведен расчет системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов. ЦЕЛЬ. Целью является разработка системы электрического привода для маломерных судов, которая позволит применить электрический двигатель и накопители электроэнергии на водном транспорте. МЕТОДЫ. В основе разработки системы электрического привода лежит метод модельно-ориентированного проектирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В результате получена блок-схема установки для маломерного судна. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Создание систем электрического привода модульной конструкции имеет низкую проработанность в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой электротранспортной инфраструктуры, создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер для промышленности и энергетики.

Ключевые слова: электротранспорт; электрический привод; электрический двигатель; накопители энергии.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00099, <https://rscf.ru/project/24-29-00099/>

Для цитирования: Басенко В.Р., Цветков А.Н., Петров Т.И., Ибрагимова А.Р., Рахмаев Р.Н. Разработка системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 69-80. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-69-80.

DEVELOPMENT OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF MODULAR DESIGN FOR SMALL VESSELS

Basenko V.R., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Ibragimova A.R., Rahmaev R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vasiliybas123@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. The transition to an electric mode of transport is becoming more and more relevant due to the development of technologies in the field of electric motors and energy storage devices. One of the tasks set for specialists in the field of electric transport today is the transition of water transport from internal combustion engines to a fully electric drive. This article provides a calculation of an electric drive system of a modular design for small vessels.

THE PURPOSE. The goal is to develop an electric drive system for small vessels, which will allow the use of an electric motor and energy storage devices in water transport. *METHODS.* The design of the electric drive system is based on the model-based design method. *RESULTS.* As a result, a block diagram of the installation for a small vessel was obtained. *CONCLUSION.* The creation of electric drive systems of modular design is poorly developed in the domestic mechanical engineering due to the lack of a developed electric transport infrastructure; the creation of domestic developments in this area is of a strategic nature for industry and energy.

Keywords: electric transport; electric drive; electric motor, energy storage devices.

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00099, <https://rscf.ru/en/project/24-29-00099/>

For citation: Basenko V.R., Tsvetkov A.N., Petrov T.I., Ibragimova A.R., Rahmaev R.N. Development of an electric drive system of modular design for small vessels. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 69-80. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-69-80.

Введение (Introduction)

Цель исследования заключается в анализе существующих систем электрического привода и построение модульной системы для электрического привода маломерных судов. Электротранспорт является одним из основных трендов в современном мире, однако в России есть серьезные преграды для развития данной области, в частности, слаборазвитая инфраструктура заряда электротранспорта. Но использование двигателей внутреннего сгорания на различных видах транспорта сегодня вносят значительный вклад в снижение экологической безопасности транспортных систем. Все более актуальным сегодня становится применение электропривода для различных видов транспорта, что снижает использование углеводородов и повышает экологичность различных видов транспорта, в том числе и водного. Возникает возможность разработки систем электропривода ввиду многочисленных исследований в области накопителей энергии. Эволюция систем хранения энергии привела к разработке литий-ионных аккумуляторов. В настоящее время литий-ионные аккумуляторы стали доминирующей технологией, особенно на рынке электромобилей благодаря высокой удельной энергии и мощности, длительному жизненному циклу и отсутствию эффекта памяти [2]. Как правило, литий-ионные аккумуляторы соединяются последовательно и/или параллельно для создания системы накопления энергии с желаемым напряжением и емкостью.

Разработка системы электропривода для нового вида транспорта позволит исследовать применение современных электрических двигателей для новых эксплуатационных условий. Здесь также актуальным будет применение методов комплексной топологической оптимизации для разработки и электрических двигателей и в целом систем электропривода [7]. Анализ работ современных исследователей [3-5] показывает наличие проблемы в области проведения комплексной топологической оптимизации (КТО) систем электропривода, и электрических двигателей в частности, ведь проводя данную процедуру необходимо учитывать электромагнитные, прочностные, тепловые процессы при изменении конструкции двигателя. Также данные процессы коррелируются с конструкцией электротранспорта, в котором применяется тот или иной двигатель. Существующие методы КТО основаны сегодня на преобразовании конструкции двигателя путем распределения материалов. В частности, если необходимо оптимизировать электромагнитные характеристики двигателя, [1, 6-7].

Одно из главных направлений усовершенствования электрических двигателей – поиск оптимальных решений для создания комплексной модульной системы электропривода.

Литературный обзор (Literature Review)

Научной значимостью данного исследования является разработка системы электрического привода, в основе которой лежит метод модельно-ориентированного проектирования. Данный метод позволяет создать блочную систему электропривода с возможностью замены компонентов системы при изменении задач, стоящих при проектировании системы электропривода для судна. Основная цель данной статьи – представить модель системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов.

Экологические и экономические перспективы дают новый стимул для разработки экологически чистых, эффективных и устойчивых транспортных средств для различных видов транспорта. Транспорт с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) является основным источником загрязнения окружающей среды, влияющий, в том числе на изменение климата и процессы глобального потепления. За последние 10 лет количество автомобилей на нашей планете удвоилось примерно до миллиарда [1]. Статистика по другим видам транспорта имеет аналогичные показатели роста. Из-за возникновения экологических проблем транспортные технологии продолжают добиваться значительного прогресса во всех этих областях, а также благодаря инновациям в эффективности преобразования топлива в бензиновых двигателях, более чистым и тихим дизельным двигателям и более широкому использованию альтернативных видов топлива [2]. В этих условиях механические детали в транспортной промышленности заменяются на иные виды узлов, которые бы могли приводиться в действия с помощью только электрических двигателей. Механический привод напрямую подсоединяется к двигателю. По этой причине, независимо от циркуляции охлаждающей жидкости, всегда работает обычный механический водяной насос. Напротив, электрический водяной насос не подключен напрямую и может работать на разных скоростях. Замена механического водяного насоса электрическим водяным насосом может снизить потребление энергии. Для этого становится все более важным встроенный электрический водяной насос.

Однако ключевыми вопросами являются стоимость и надежность электрооборудования для электрического транспорта. Проблемы включают в себя суровые природные условия, где температура под капотом может достигать 150 °С. Также стоимость остается важнейшей проблемой, стоящей перед разработчиками электрооборудования для электрического транспорта [3]. Концепция электрического привода для маломерных судов уже рассмотрена в работах [3, 4]. В основном в данных статьях описывалась общая концепция разработки систем электрического привода для водного электротранспорта. Также представлена конструкция электрического двигателя для различных видов транспорта в работах [5, 6]. Эдварда С. Лавлейса и др. В данных работах рассмотрено влияние перехода на инверторное оборудование для оптимизации электрического привода, в основе которого лежат синхронные машины с постоянными магнитами. Авторами Суронг Хуангом и др. в работе [6] предложен подход определения размеров оборудования и уравнений расчета плотности мощности в области электрических накопителей.

Развитие технологий постепенно приводило к тому, что электрические двигатели становятся все эффективнее и дешевле, а аккумуляторы легче и мощнее. Уровень инженерной и технической мысли применительно к экологичным видам транспорта, как сухопутным, так и водным. Сегодня в области водного транспорта наиболее актуальным направлением является применение электропривода с помощью возобновляемых источников энергии, в частности солнечных батарей [4]. В таких системах, в качестве дополнительного движителя предусмотрено использование паруса, закрепляющегося на специально приспособленной для него складывающейся мачте.

Автономные солнечные энергосистемы позволяют отказаться от генераторов. Один из основных компонентов системы - солнечный модуль. Благодаря своей конструкции он может быть установлен на крышу или использоваться как навес, сохраняя геометрию и эстетичный вид лодки. Такие системы рассмотрены в работах авторов томского политехнического университета Бумагина О.В. и Однокопылова Г.И. «Судно с электроприводом от солнечной батареи», а также в работах иностранных авторов Alipour M., Esen E., Kizilel R и др. [1, 3, 6-7].

Но у таких систем есть недостаток – зависимость от солнечной инсоляции. Ввиду развития зарядной инфраструктуры, в частности с появлением технологий зарядных мобильных станций [6-7] теперь есть техническая возможность создавать системы электропривода с возможностью заряда аккумулятора на береговых зарядных станциях.

Основными элементами разрабатываемой модульной системы является электрический двигатель, аккумуляторные батареи и система управления батареями BMS. Вид применяемого электрического двигателя рассматривается из асинхронного и синхронного типа [9-10]. Для каждой лодки в зависимости от размеров и веса выбирают электромотор с определенной тягой, которая позволит вращать винт, судну передвигаться, сопротивляясь силе воды и ветра. К примеру, лодка весит 1 тонну, для нее выбирают электромотор с тяговым усилием 45 фунтов. Существует связь между тягой и мощностью в силе вращения винта лодки. Единица измерения мощности Вт (ватт) или лошадиная сила. Электродвигатель потребляет электрический ток, количество потребления зависит от нагрузок и емкости аккумулятора. Работает двигатель при рабочем напряжении в пределах 12-24 вольт. Регулируют скоростями с помощью переключения передач. Некоторые моторы обладают цифровым вариатором [11-12]. У лодочных моторов бывает разное место крепления носовое или кормовое. Для кормовых имеются резьбовые зажимы, крепят на транце. Чтобы установить на носу, нужна специальная монтажная платформа. Применение аккумулятора будет зависеть от требуемого запаса хода. Их построение будет основываться из опыта работ по созданию мобильной системы заряда электротранспорта [13-15].

Практической значимостью является расчет механических и электрических параметров системы электропривода для водного судна, которую можно применить для судна со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность – 15 кВт Фактические обороты выходного вала – 970 об/мин; КПД – 88.0%; Номинальный ток – 32А (при 380В); Пусковой ток – 224 А; номинальный крутящий момент – 129Н/м.

Результаты разработки системы электрического привода модульной конструкции

План разработки системы электрического привода модульной конструкции для маломерных судов речного и морского назначения заключается в разработке системы с автономным питанием и ограничением массогабаритных показателей с блоками заряда и контроля состояния батарей мощностью до 15 кВт с запасом хода до 10 часов.

Силовая электрическая установка предназначена для установки на маломерные суда морского и речного назначения. Установка монтируется на место дизельного ходового двигателя в трюме судна. Зарядка аккумуляторов осуществляется от береговой зарядной станции. Аккумуляторные батареи имеют систему контроля и защиты BMS. Управление силовой установкой осуществляется от рычага управления ходом.

Разработана блок-схема системы электрического привода модульной конструкции, представленная на рисунке 1.

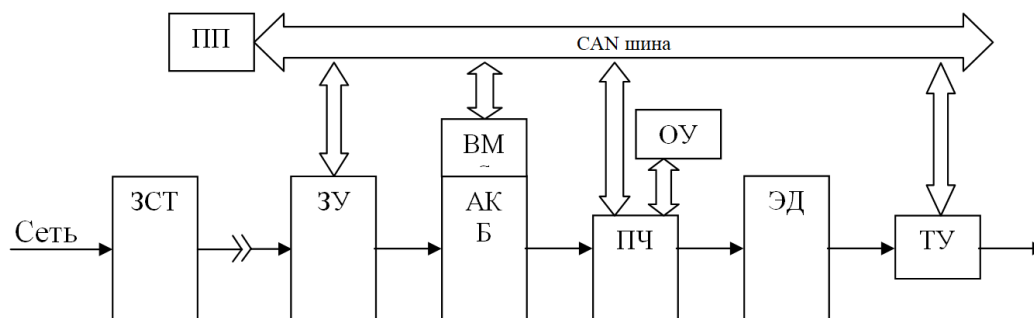


Рис. 1. Разработанная блок схема установки электрического привода *Fig. 1. Developed block diagram for installing an electric drive*

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

Данная блок схема представляет следующий алгоритм работы установки электрического привода:

- к сети подключается станция для зарядки батарей (ЗСТ), которая расположена на берегу;
- сеть и ЗСТ связываются с помощью устройства преобразования напряжения в напряжение зарядки батарей с устройством согласования Type2;
- аккумуляторные батареи (АКБ) управляются системой контроля BMS;
- в системе предусмотрен силовой частотный преобразователь для работы электродвигателя (ЭД) с наличием обратной связи по положению ротора;
- предусмотрено тормозное устройство (ТУ) и устройство управления ходом (ОУ), которые будут связаны с панелью приборов системы управления силовой электрической установкой (ПП).

Силовая электрическая установка заряжается от сети переменного тока 380/220 В с частотой 50-60 Гц. Зарядная станция обеспечивает преобразование электроэнергии в напряжение и форму стандарта зарядки типа Type2, может содержать устройство управления оплатой за отпущенную энергию.

Станция располагается на берегу или причале в непосредственной близости от места швартовки судна на электрической тяге.

Зарядное устройство для преобразования напряжения питания в напряжение зарядки батарей с устройством согласования типа Type2 и кабелем зарядки. Устройство расположено на борту судна.

Аккумуляторные батареи расположены в непосредственной близости от приводного электродвигателя в моторном отсеке судна предположительно по бортам. Батареи имеют суммарное напряжение 72 В и емкость 280 Ач.

Контроль за состоянием батарей, режимом заряда и режимом разряда осуществляет система BMS. Силовой преобразователь частоты предназначен для питания электродвигателя и задания скорости его вращения, преобразователь имеет обратную связь с электродвигателем по положению ротора. Управление преобразователем осуществляется по командам рычага управления ходом.

Электродвигатель представляет собой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со встроенным энкодером мощностью 15 кВт.

Тормозное устройство представляет собой механическое устройство блокировки вращения вала гребного винта с электрическим управлением.

Панель приборов представляет собой устройство отображения состояния аккумуляторных батарей, отображения процесса заряда и разряда, отображения расчетного остаточного хода и оборотов гребного винта. Встроенный контроллер выполняет функцию системы управления силовой электрической установкой и связи между основными модулями. Состав основного электрооборудования системы электропривода маломерного судна представлен на рисунке 2.

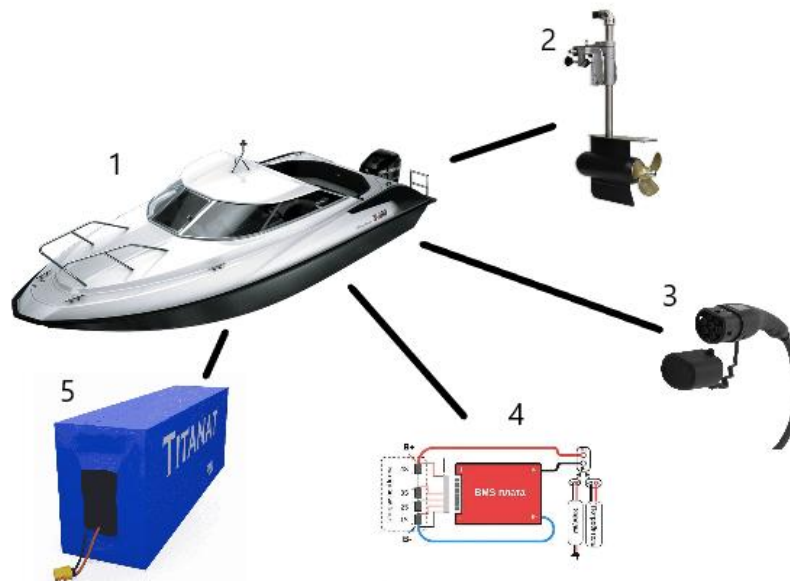


Рис. 2. Состав системы электропривода маломерного судна *Fig. 2. Composition of the electric drive system of a small vessel*

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

В состав системы, представленный на рисунке 2 входят: 1 – маломерное судно; 2 – электрический двигатель для судна типа Minn Kota; 3 – кабель зарядки типа Type2; 4 – плата BMS; 5 – аккумулятор 72V 280Ah.

Расчет параметров системы электрического привода

На водное судно в процессе движения действуют различные силы. Каждая из сил действует сразу на различные части корпуса или парусов, и действует по-разному. Но если просуммировать все эти составляющие, мы получим суммарную силу — вектор, который имеет результирующее направление и значение. Причем вектор этот будет прикладываться в определенную точку — место, где воздействие этой суммарной силы будет эквивалентно всем воздействиям ее составляющих в различных частях судна.

Для расчета механических параметров системы электропривода справедливы следующие выражения:

$$F_t = \mu \cdot m \cdot g + \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2}{2}, \quad (1)$$

$$P = F \cdot v, \quad (2)$$

$$P_{дв} = \left(\mu \cdot m \cdot g + \frac{C_x \cdot S \cdot \rho \cdot v^2}{2} \right) \cdot v, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент сопротивления воздуха;

S – лобовая площадь авто (m^2);

ρ – плотность воздуха (1,29 кг/м³ при нормальных условиях);

v – скорость авто, м/с.

Электродвигатели могут развивать ту же тягу, что и двигатели внутреннего сгорания обладая при этом значительно меньшей мощностью на валу. Это происходит благодаря различной форме кривых крутящего момента электрического и бензинового двигателей.

Технические характеристики разрабатываемой системы электропривода представлены в таблице 1.

Как правило, мощные электродвигатели рассчитаны на напряжение 24 - 72 Вольт. 24 вольтовый электрический двигатель мощностью 2,2 кВт развивает на винте тягу 139,8 lbs и сопоставим по этому показателю с подвесным бензиновым мотором мощностью 6,5 л.с. Двигатель мощностью 15 кВт эквивалентен бензиновому мотору 35 л.с.

Тяга 35 л.с. эквивалентна тяге трёх моторов Minn Kota Endura 55 с небольшим запасом. Этот двигатель потребляет 45 Ампер в час на максимальной скорости, суммарное потребление тока 135 Ампер в час. В таком режиме на 5 часов работы потребуется аккумулятор емкостью 675 А*ч.

Технические характеристики системы электропривода
Electric drive system specifications

Технический параметр	Значение
Мощность электродвигателя	15 кВт
Тяга на винте	940 lbs
Номинальный ток	32 А
Пусковой ток	224
Крутящий момент	129 Н*м
КПД	88 %
Напряжение аккумулятора	72 В
Емкость аккумулятора	675 А*ч
Технология и материал аккумулятора	EVE LiFePO4
Время работы	3,5-5 ч

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

В среднем, если сопоставить ёмкость аккумуляторов с расстоянием пробега, то можно выяснить, что современные виды электротранспорта потребляют примерно 120-150 ватт часов на 1 км пути. Если привод самодельного электромобиля имеет высокий КПД – используется безколлекторный электродвигатель на постоянных магнитах и эффективный контроллер, то расход энергии в различных режимах, будет примерно сопоставимым с разбегом в 10 %. Исходя из этого, можно рассчитать необходимую ёмкость аккумуляторной батареи для обеспечения того, или иного пробега.

На данный момент актуально провести сравнение с похожими системами для электромобилей, где АКБ с напряжением 96 вольт и ёмкостью 200 ампер часов, имеет мощность 19.2 киловатт часа ($96 \times 200 = 19200$ ватт часов). Этого количества энергии в рабочем режиме движения должно хватить примерно на 130-160 км. Чтобы получить эту цифру нужно 19200 ватт часов разделить на 120 ватт часов: получим максимальное значение пробега на одной зарядке. Затем 19200 делим на 150 ватт часов и получаем минимальное расстояние пробега.

Указанные цифры справедливы для электромобилей со снаряжённой массой, находящейся в пределах примерно от 1000 до 5000 кг. Если вес меньше или больше, то расход энергии и, соответственно, расстояние пробега, будет другим. Данные цифры выведены на основании изучения реальных эксплуатационных характеристик электрического транспорта.

Заключение (Conclusions)

В данной рассмотрена система электрического привода модульной конструкции для маломерных судов. Разработка системы электропривода для нового вида транспорта позволит исследовать применение современных электрических двигателей для новых эксплуатационных условий. Из проведенного анализа существующих систем, можно сделать вывод, что сегодня уже разработанной технологией является системы на основе солнечных батарей. Но недостатком данных является зависимость от солнечной инсоляции, что существенно ограничивает функционал и время использования электропривода. Ввиду развития зарядной инфраструктуры в России появилась возможность создания систем электропривода с аккумулятором, который будет заряжаться от береговой зарядной станции.

Разработана блок схемы системы электрического привода модульной конструкции, которая может быть применена для маломерных судов различного назначения и класса мощности. Полученные расчётные характеристики для системы электропривода являются приблизительными, так как они уточнятся после натурных испытаний и проведения снятия характеристик с работающего водного транспорта с установленным электроприводом.

Приводной частью планируется использовать современные синхронные двигатели

с постоянными магнитами. СДПМ – современные, энергоэффективные электрические машины. Основные области их применения: микроприводы, приводы средней мощности, однако, уже есть разработки электродвигателей на постоянных магнитах более 1 МВт. СДПМ – перспективная замена коллекторных двигателей постоянного тока в приводах оборудования, работающего динамическом режиме, а также механизмов, требовательных к точности регулирования скорости, момента или положения вала. Синхронные двигатели на постоянных магнитах также в отдельных случаях предпочтительней асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Создание систем электрического привода модульной конструкции имеет низкую проработанность в отечественном машиностроении ввиду отсутствия развитой электротранспортной инфраструктуры, поэтому создание отечественных разработок в данной области носит стратегический характер для промышленности и энергетики.

Литература

1. Alipour M., Esen E., Kizilel R. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.
2. Safin, A. R. Thermal model of a linear electric machine / A. R. Safin, I. V. Ivshin, T. I. Petrov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года*. Vol. 643. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014.
3. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V. [et al.] Adaptive control system of the pumping unit // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 5 Special Issue 3. – P. 289-291. – DOI 10.35940/ijeat.E1064.0785S319. – EDN NJDAWF.
4. Çeven, S. Implementation of hardware-in-the-loop based platform for real-time battery state of charge estimation on li-ion batteries of electric vehicles using multilayer perceptron / S. Çeven, R. Bayır // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 195-205. – DOI 10.18201/ijisae.2020466313. – EDN CYXKTT.
5. Patil M. S., Seo J.-H., Panchal S., Jee S. [et al.]. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119728>.
6. Muñoz P. M., Humana R. M., Falaguerra T., Correa G. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>.
7. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М. и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2018. – № 4(40). – С. 77-85. – EDN WKEPUG.
8. Разработка макета мобильной установки заряда электротранспорта и стенда для проведения испытаний / А. Р. Сафин, А. Н. Цветков, Т. И. Петров [и др.] // *Естественные и технические науки*. – 2023. – № 7(182). – С. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.
9. Khanchandani K.V., Силовая электроника / K.V. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – С. 908-959.
10. Гуляев И.В. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2015. – № 5. – С. 187-191.

11. Гуляев И.В. Работа асинхронизированного вентильного двигателя с потреблением чисто активной мощности со стороны якоря/ Тутаев Г.М., Юшков И.С., Волков А.В. // Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭП-2014. 2014. С. 241-244.

12. Ван Л. Прямое управление моментом для СДПМ / Л. Ван, Ю. Гао // Труды IEEE International Электрические машины и приводы конференция IEMDC. – 2007.– С. 403-406.

13. Гуляев И.В. Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 70-73.

14. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit . / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK.

15. Петров Т.И., Сафин А.Р. Разработка и реализация стенда для подтверждения эффективности топологической оптимизации ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13, № 2(50). – С. 100-108. – EDN YRAJUO.

16. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей / А. Р. Сафин, И. В. Ившин, А. Н. Цветков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.

17. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения / Т. И. Петров, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

18. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

19. Сафин, А. Р. Оптимизация модели синхронного двигателя с постоянными магнитами для снижения времени расчета вращающего момента / А. Р. Сафин, Т. И. Петров // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. – 2021. – № 3(20). – С. 31-37. – EDN TVKBRC.

20. Сафин А.Р., Петров Т.И., Копылов А.М. и др. Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, № 2(46). – С. 45-53. – EDN EUUONN.

21. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

22. 3D модель силового трансформатора для исследования его технического состояния по вибрационным параметрам / В. Р. Басенко, М. Ф. Низамиев, И. В. Ившин, О. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Авторы публикации

Басенко Василий Романович – преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, e-mail: vasilybas123@mail.ru.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail: tsvetkov9@mail.ru.*

Петров Тимур Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail: tobac15@mail.ru.*

Ибрагимова Айгуль Равиловна – аспирант кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail: ibragimovaaigulrpn@yandex.ru.*

Рахмаев Руслан Наилевич – аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Казанского государственного энергетического университета, *e-mail: rahmairuslan@yandex.ru.*

1. Alipour M., Esen E., Kizilel R. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.

2. Safin, A. R. Thermal model of a linear electric machine / A. R. Safin, I. V. Ivshin, T. I. Petrov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, May 23–24, 2019 year*. Vol. 643. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012014.

3. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V. [et al.] Adaptive control system of the pumping unit // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2019. – Vol. 8, No. 5 Special Issue 3. – P. 289-291. – DOI 10.35940/ijeat.E1064.0785S319. – EDN NJDAWF.

4. Çeven, S. Implementation of hardware-in-the-loop based platform for real-time battery state of charge estimation on li-ion batteries of electric vehicles using multilayer perceptron / S. Çeven, R. Bayır // *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. – 2020. – Vol. 8, No. 4. – P. 195-205. – DOI 10.18201/ijisae.2020466313. – EDN CYXKTT.

5. Patil M. S., Seo J.-H., Panchal S., Jee S. [et al.]. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119728>.

6. Munoz P. M., Humana R. M., Falaguerra T., Corey G. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>

7. Safin A.R., Khusnutdinov R.R., Kopylov A.M. et al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm // *Bulletin of the Kazan State Energy University*. – 2018. – № 4(40). – Pp. 77-85. – EDN WKEPUG.

8. Development of a layout for a mobile electric vehicle charging unit and a test stand / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, T. I. Petrov [et al.] // *Natural and technical Sciences*. – 2023. – № 7(182). – Pp. 138-145. – DOI 10.25633/ETN.2023.07.09. – EDN NZWEGG.

9. Khanchandani K.B., Power electronics / K.V. Khanchandani // ISBN: 978-0-07-058389-7 – pp. 908-959.

10. Gulyaev I.V. The operation of an asynchronized brushless motor with the consumption of purely a10. Gulyaev I.V. Vector control of a synchronous motor with permanent magnets / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov, etc. // *Scientific and technical Bulletin of the Volga region*. - 2015. – No. 5. – pp. 187-191.

11. Gulyaev I.V. Operation of an asynchronous valve motor with consumption of purely active power from the armature/ Tutayev G.M., Yushkov I.S., Volkov A.V. // *Actual problems of electronic instrumentation proceedings of the XII International conference: APEP-2014*. 2014.

pp. 241-244.

12. Wang L. Direct torque control for SDPM / L. Wang, Yu. Gao // Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives conference IEMDC. – 2007.– pp. 403-406.

13. Gulyaev I.V. Electric drive based on an asynchronous valve motor / I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov et al. // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. - 2015. – No. 1. – pp. 70-73.

14. Development of an algorithm for the operation of a control station for a mobile electric vehicle charge unit. / A. R. Safin, A. N. Tsvetkov, E. I. Gracheva, T. I. Petrov // Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2022. – No. 4(25). – P. 37-44. – EDN FLAYJK. 15. Petrov T.I., Safin A.R. Development and implementation of a stand to confirm the effectiveness of topological optimization of the rotor of synchronous motors with permanent magnets // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. - 2021. – Vol. 13, No. 2(50). – pp. 100-108. – EDN YRAJUO.

16. The development of technology of mobile charging stations for electric vehicles / A. R. Safin, I. V. Ivshin, A. N. Tsvetkov [et al.] // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. - 2021. – Vol. 23, No. 5. – pp. 100-114. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. – EDN YIGCHH.

17. Modeling the operation of the equipment of a mobile charging installation for charging electric vehicles in order to confirm compliance with groups of climatic and mechanical design / T. I. Petrov, A. R. Safin, E. I. Gracheva [et al.] // Vestnik MGТУ. Proceedings of the Murmansk State Technical University. - 2022. – Vol. 25, No. 4. – pp. 365-377. – DOI 10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377. – EDN JILKEG.

18. Firago B. I., Vasil'ev D. S. (2016) Vector Systems Control of Electrical Drives. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 159 (in Russian).

19. Safin, A. R. Optimization of a synchronous motor model with permanent magnets to reduce the calculation time of torque / A. R. Safin, T. I. Petrov // Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi. – 2021. – № 3(20). – Pp. 31-37. – EDN TBKBRC.

20. Safin A.R., Petrov T.I., Kopylov A.M. et al. The method of designing and topological optimization of rotors of synchronous motors with permanent magnets // Bulletin of the Kazan State Power Engineering University. - 2020. – vol. 12, No. 2(46). – pp. 45-53. – EDN EUUONN.

21. Laser Control and Measuring Complex for Non-contact Vibration Control of the Power Transformer Technical Condition / V. Basenko, O. Vladimirov, I. Ivshin [et al.] // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 190. – P. 157-167. – DOI 10.1007/978-3-030-86047-9_17. – EDN EIGGGZ.

22. 3D model of a power transformer for the study of its technical condition according to vibration parameters / V. R. Basenko, M. F. Nizamiev, I. V. Ivshin, O. V. Vladimirov // Izvestia of higher educational institutions. Energy problems. - 2022. – Vol. 24, No. 3. – pp. 130-143. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-130-143. – EDN TTLTLL.

Authors of the publication

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* vasilybas123@mail.ru.

Alexei N. Tsvetkov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* tsvetkov9@mail.ru.

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* tobac15@mail.ru

Aigul R. Ibragimova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:* ibragimovaigulrpn@yandex.ru.

Ruslan N. Rahmaev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia, *e-mail:*
rahmairuslan@yandex.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **05.05.2024 г.**

Отредактировано **25.09.2024 г.**

Принято **10.10.2024 г.**



ВЫБОР АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЙНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И., Кочеткова Е.Ю., Миневиц Т.Г.

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия
lsahno2010@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕЙ проектирования трансформатора является оптимизация его конструкции, поскольку она позволяет создать конкурентоспособный трансформатор. Одной из целевых функций в алгоритмах оптимизации высоковольтных испытательных трансформаторов является отношение индуктивного сопротивления рассеяния трансформатора, приведенного к вторичной стороне, к емкостному сопротивлению нагрузки. Так как целевые функции в процедуре оптимизации надо находить многократно, для расчета индуктивности рассеяния целесообразно использовать приближенные аналитические методы расчета. ЦЕЛЬЮ статьи является анализ погрешности традиционного аналитического метода расчета индуктивности рассеяния трансформатора, разработанного для силовых трансформаторов с прямоугольным осевым сечением обмоток, и разработка уточненного аналитического метода, в котором учтена основная конструктивная особенность высоковольтных испытательных трансформаторов – трапециевидальная форма сечения вторичной обмотки. В уточненном методе учтено изменение количества витков в радиальном направлении при сохранении основных допущений традиционного метода. МЕТОДЫ. Исследование погрешности проводится путем сравнения результатов расчета с использованием указанных методов с результатами численного расчета, которые приняты за точные. РЕЗУЛЬТАТЫ. Показано, что погрешность расчета с использованием предложенного в статье метода существенно уменьшена по сравнению с погрешностью метода, разработанного для силовых трансформаторов с прямоугольным сечением обмоток. Определены диапазоны изменения относительных геометрических параметров базового трансформатора, в которых погрешность этого метода расчета не превышает 10 %. В качестве базового трансформатора выбран трансформатор ТГИ 50/100, номинальная мощность которого составляет 5 кВА. Разработанный в статье аналитический метод рекомендуется для использования в алгоритмах оптимизации высоковольтных испытательных трансформаторов.

Ключевые слова: высоковольтный испытательный трансформатор; индуктивность рассеяния; численные методы; методы оптимизации; магнитостатическое поле; плоскостное поле

Для цитирования: Сахно Л.И., Парамонов Е.Д., Сахно О.И., Кочеткова Е.Ю., Миневиц Т.Г. Выбор аналитического метода расчета индуктивности рассеяния при оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 81-93. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93.

SELECTING ANALYTICAL METHOD OF LEAKAGE INDUCTANCE CALCULATION FOR OPTIMIZING HIGH-VOLTAGE TEST TRANSFORMER DESIGN

Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I., Kochetkova E.Y., Minevich T.G.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
lsahno2010@yandex.ru

Abstract: AN ACTUAL PROBLEM in transformer design is to optimize its design, since it allows you to create a competitive transformer. One of the objective functions in optimization algorithms for high-voltage test transformers is the ratio of the leakage inductive reactance of the transformer, reduced to the secondary side, to the load capacitance. Since the objective functions in the optimization procedure must be found many times, it is advisable to use approximate analytical calculation methods to calculate the leakage inductance. THE PURPOSE of the article is to analyze the error of the traditional analytical method for calculating the leakage inductance of power transformers with a rectangular axial cross-sections of the windings, and to develop a refined analytical method that takes into account the main design feature of high-voltage test transformers, which consists in the trapezoidal shape of the secondary winding cross-section. The refined method takes into account the change in the number of turns in the radial direction while maintaining the basic assumptions of the traditional method. METHODS. The error is studied by comparing the calculation results using these methods with the results of a numerical calculation of leakage inductance based on a 3D magnetostatic field, which are accepted as accurate. RESULTS. It is shown that the calculation error using the method proposed in the article is significantly reduced compared to the error of the method developed for power transformers with rectangular winding cross-sections. The ranges of changes in the relative geometric parameters of the base transformer have been determined, in which the error of this calculation method does not exceed 10%. The TGI 50/100 transformer, whose rated power is 5 kVA, was chosen as the base transformer. The developed analytical method is recommended for high-voltage test transformers optimization algorithms.

Keywords: high voltage test transformer; leakage inductance; numerical methods; optimization methods; magnetostatic field; plane-parallel field.

For citation: Sakhno L.I., Paramonov E.D., Sakhno O.I., Kochetkova E.Y., Minevich T.G. Selecting analytical method of leakage inductance calculation for optimizing high-voltage test transformer design. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 81-93. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-81-93.

Введение (Introduction)

Одним из видов высоковольтного испытательного оборудования являются однофазные испытательные трансформаторы промышленной частоты. Весьма важным требованием, предъявляемым к этим трансформаторам, является минимизация их массы и габаритов, так как они входят в состав передвижных испытательных установок. Эффективным способом создания высоковольтных испытательных трансформаторов с минимальными массой и габаритами и высокими технико-экономическими показателями является использование алгоритма многокритериальной оптимизации [1]. Согласно этому алгоритму необходимо выбрать несколько конфликтующих между собой критериев оптимизации, которые определяют целевую функцию. Такими критериями для высоковольтных испытательных трансформаторов являются масса, потери, отношение емкости между первым и вторым слоем вторичной обмотки к емкости между предпоследним и последним слоями вторичной обмотки, синусоидальность формы вторичного напряжения. Каждый критерий определяется конструктивными переменными, которые зависят от форм сечений обмоток и магнитопровода, отношений высоты обмоток к ширине, острого угла α трапеции, которая ограничивает радиальное сечение вторичной обмотки (рис. 2). Поиск оптимального решения необходимо выполнять при следующих ограничениях: максимальная напряженность электростатического поля должна быть меньше величины пробивного напряжения изоляции, а также должно быть обеспечено отсутствие резонанса в контуре высокого напряжения, состоящем из индуктивности рассеяния трансформатора, емкости трансформатора и емкости объекта испытаний. Последнее условие чрезвычайно важно проверять в процессе оптимизации, так как обмотка высокого напряжения имеет большое число витков и вследствие этого большую индуктивность рассеяния. Поэтому для каждой конструкции трансформатора, которые в генетическом алгоритме называются особями, необходимо рассчитывать индуктивность рассеяния и проверять возможность возникновения резонанса. Совокупность особей образует поколение, в котором производится отбор лучших решений для следующих поколений. Перечисленные выше критерии и условия ограничения поиска оптимального решения достаточно точно можно рассчитать с использованием 3D-моделей электростатических и магнитостатических полей трансформатора. Однако такой расчет

требует больших затрат времени, так как количество конструкций трансформаторов (особей), составляет несколько тысяч, а количество поколений – несколько десятков. В связи с этим целесообразно использовать приближенные аналитические методы расчета при использовании генетического алгоритма оптимизации. Существуют аналитические методы расчета этих параметров, разработанные для силовых трансформаторов. Однако погрешности применения этих методов к высоковольтным испытательным трансформаторам недостаточно исследованы.

Данная статья посвящена анализу погрешности аналитического расчета индуктивности рассеяния таких трансформаторов. Цель исследования заключается в анализе погрешности традиционного аналитического метода расчета индуктивности рассеяния трансформатора, разработанного для силовых трансформаторов с прямоугольным осевым сечением обмоток, и разработке уточненного аналитического метода, в котором учтена основная конструктивная особенность высоковольтных испытательных трансформаторов – трапециевидальная форма сечения вторичной обмотки. Научная значимость исследования состоит в разработке аналитического метода расчета индуктивности рассеяния трансформатора с трапециевидальной формой поперечного сечения вторичной обмотки, которая входит в одну из целевых функций алгоритма оптимизации и сокращает время поиска оптимальной конструкции трансформатора по сравнению с использованием численных методов для расчета этого параметра в процедуре оптимизации.

В статье рассматривается классический аналитический метод расчета, разработанный для силовых трансформаторов с прямоугольным осевым сечением обмоток, и предлагается уточненный аналитический метод, в котором учтена трапециевидальная форма сечения вторичной обмотки. Кроме того, рассмотрены численные методы МКЭ в двумерной постановке. В статье определены диапазоны изменения относительных геометрических параметров трансформатора, в котором погрешность выбранного для использования при оптимизации аналитического метода расчета не превышает 10 %. В качестве базового трансформатора выбран трансформатор ТГИ 50/100, номинальная мощность которого составляет 5 кВА, разработанный в ООО «НПП Марс-Энерго»¹. Конструкция этого трансформатора получена с использованием генетического алгоритма оптимизации, для работы которого использовался разработанный метод расчета индуктивности рассеяния. При изменении геометрических параметров базового трансформатора площадь поперечного сечения обмоток не меняется, так как при этом условии остаются постоянными плотности тока в обмотках, которые определяют их температуру. В качестве точных значений индуктивности рассеяния для исследуемых трансформаторов приняты значения, полученные в результате численного расчета. Преимущество такого подхода к анализу точности состоит в возможности анализа в широком диапазоне изменения параметров трансформатора, который требуется для использования процедуры оптимизации конструкции. Точность разработанного метода экспериментально подтверждена для базового трансформатора в опыте короткого замыкания. Практическая значимость исследования заключается в обеспечении процедуры многокритериальной оптимизации аналитическим методом расчета индуктивности рассеяния трансформатора и создании на базе этой процедуры конкурентоспособных высоковольтных испытательных трансформаторов.

Литературный обзор (Literature Review)

Разработке аналитических методов расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов посвящено довольно значительное количество работ, часть из которых приведена в библиографическом списке к данной статье. Несмотря на широкое применение численных методов расчета магнитных полей рассеяния трансформаторов, разработка аналитических методов расчета индуктивностей рассеяния остается актуальной, что следует из приведенного списка публикаций. Интерес к аналитическим методам расчета в значительной степени связан с использованием процедур оптимизации конструкций трансформаторов, так как аналитические методы обеспечивают существенную экономию времени при выполнении этих процедур. Анализ публикаций показал, что для получения аналитического решения в работах делаются допущения, которые, как правило, справедливы для конкретного типа трансформатора, а полученные аналитические решения обеспечивают требуемую точность в определенных диапазонах изменения конструктивных параметров трансформатора. Наиболее часто для расчета индуктивности рассеяния силовых трансформаторов магнитное поле рассеяния принимается одномерным, имеющим только осевую составляющую. На основе этой идеализации получено выражение для силового

¹ <http://mars-energo.ru>

трансформатора с броневым магнитопроводом, центральный стержень которого имеет цилиндрическую форму, а поперечные сечения обмоток прямоугольную. Выражение для индуктивности рассеяния такого трансформатора входит практически во все книги по расчету трансформаторов, например, в [2-3]. Разнообразие конструкций трансформаторов, а также широкий диапазон изменения их номинальных частот приводит к большому разнообразию подходов к аналитическому расчету индуктивности рассеяния. Прежде всего следует отметить работы, которые основаны на допущении об одномерном характере поля рассеяния, принятом в [2-3]. В [4] такая идеализация используется для расчета индуктивности рассеяния планарного трансформатора. В таких трансформаторах ширина обмоток превышает высоту, поэтому выражение для индуктивности рассеяния, приведенное в [2, 3], адаптируется для планарных трансформаторов путем замены осевого поля на радиальное, которое является преобладающим в трансформаторах данного типа. Структура выражения для индуктивности рассеяния в [4] совпадает с выражением, данным в [2, 3]. В [5] допущение об одномерном магнитном поле рассеяния позволило получить индуктивности рассеяния силового трансформатора при межвитковых коротких замыканиях. В [6] используется допущение об одномерном магнитном поле рассеяния для аналитического расчета индуктивности рассеяния трансформаторов с зигзагообразными обмотками.

В ряде работ [7-9] для расчета индуктивностей рассеяния используется метод изображений в магнитном поле. Этот метод позволяет более точно по сравнению с [2-6] учесть геометрию магнитопровода, причем магнитное поле рассеяния при таком подходе становится двумерным. В [7] выражение для индуктивности рассеяния силового трансформатора получено для равновысоких первичной и вторичной обмоток с прямоугольным поперечным сечением. Это выражение основано на аналитическом расчете двумерного магнитного поля рассеяния относительно напряженности магнитного поля, которое создано обмотками трансформатора и их отражениями относительно магнитопровода. В [8] метод изображений используется для расчета индуктивности рассеяния силового трансформатора с обмотками, имеющими прямоугольное поперечное сечение, высота которых может быть разной. В этой работе получены формулы для магнитного векторного потенциала и энергии магнитного поля. Индуктивность рассеяния получена из известной формулы для энергии магнитного поля, в которую входит индуктивность. В [9] представлены формулы для расчета индуктивности рассеяния тороидальных трансформаторов. Благодаря осевой симметрии тороидального трансформатора получено аналитическое выражение для энергии магнитного поля рассеяния. В [10] получено выражение для индуктивности рассеяния силового трансформатора с обмотками прямоугольной формы на основе формул ПЕЕС, вывод которых подробно изложен в [11].

В [12] даны выражения для индуктивностей рассеяния небольших трансформаторов с использованием методов среднегеометрических расстояний, а также методов, основанных на аналитическом решении уравнений Максвелла в двумерной осесимметричной постановке. Для получения аналитических решений в трансформаторах с горизонтальным воздушным зазором в стержне сердечника в [13] записаны уравнения магнитной цепи. Воздушный зазор приводит к увеличению индуктивности рассеяния и уменьшению индуктивности намагничивания. Эти индуктивности становятся соизмеримыми и рассмотрение магнитной цепи становится оправданным. Этот метод дает возможность учесть асимметрию магнитного поля относительно воздушного зазора.

Практически во всех перечисленных публикациях анализ погрешности выражений для расчета индуктивностей рассеяния решается путем сопоставления с результатами численного расчета МКЭ с использованием 2D или 3D-моделей. Для реализации численного расчета используются различные пакеты программ [14, 15].

Особенностью высоковольтных испытательных трансформаторов, рассматриваемых в данной статье, является трапециевидальная форма поперечного сечения вторичной обмотки. В рассмотренных выше работах обмотки имеют прямоугольную форму сечения, поскольку это наиболее часто встречающаяся конструкция. Аналитический метод расчета индуктивности рассеяния трансформатора с трапециевидальной формой вторичной обмотки, который необходим при решении задачи оптимизации конструкции высоковольтного испытательного трансформатора, не разработан. Анализ публикаций [2-6] показал, что простая идеализация магнитного поля рассеяния трансформатора – замена реального поля одномерным дает весьма хорошие результаты для практического использования. Поэтому эта идеализация была принята за основу в данной статье. Для анализа погрешности разработанного в статье метода расчета так же, как и в перечисленных публикациях,

целесообразно использовать численный расчет. В [16] дана методика численного расчета высоковольтного испытательного трансформатора. Результаты этого исследования будут использованы в данной статье для анализа погрешности.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объекты исследования. Базовая конструкция трансформатора показана на рисунке 1. Обмотки этого трансформатора, намотанные на цилиндрические каркасы, являются цилиндрическими многослойными. Осевое сечение вторичной обмотки имеет трапециевидную форму (рис. 2б), а первичной – прямоугольное. Первичная обмотка имеет две секции по 148 витков в каждой. Параллельное соединение секций обеспечивает вторичное напряжение 100 кВ, а последовательное -50 кВ. Эта обмотка выполнена из медного провода ПСД-1,4х2,8. Вторичная обмотка имеет 63000 витков и выполнена из круглого провода ПЭТВ-2-0,14. Изоляция ЭЛИЗТЕРМ-155- ПЛ-0,08х124х400 между слоями первичной обмотки 1 слой, между слоями вторичной обмотки 2 слоя. Габаритные размеры трансформаторов показаны на рисунке 1. Этот трансформатор помещен в корпус, заполненный элегазом. Длительность работы трансформатора при номинальном токе 0,12 А составляет 1 мин. При дальнейшем исследовании изменяются отношения оснований трапеции трапециевидального сечения вторичной обмотки h_1/h_2 и отношение высоты вторичной обмотки h_2 к ее ширине a_2 в диапазоне $\frac{h_2}{a_2}$ (рис. 2б).

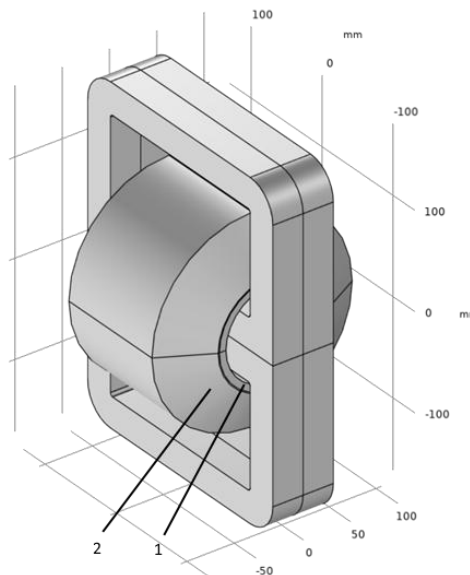


Рис. 1. Конструкции исследуемых трансформаторов: 1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка

Fig. 1. Designs of closing transformers: 1 – primary winding, 2 – secondary winding

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

Методы исследования. Для расчета индуктивности рассеяния трансформаторов используются аналитические [6-11] и численные [12-15] методы.

Аналитический метод. Рассмотрим аналитический метод расчета индуктивностей рассеяния, разработанный для силовых трансформаторов с прямоугольным осевым поперечным сечением обмоток [6]. Основным допущением этого метода является рассмотрение магнитостатического поля как плоскопараллельного. Принято, что линии магнитной индукции параллельны оси стержня магнитопровода и напряженность поля вне контура, окружающего первичную и вторичную обмотки, равна нулю. Обозначения размеров обмоток показаны на рисунке 2а. Энергия магнитного поля в каждой из трех областей окна трансформатора: в пределах первичной обмотки W_1 , в промежутке между обмотками W_{12} и в пределах вторичной обмотки W_3 :

$$W_1 = \mu_0 I_1^2 w_1^2 \pi D \cdot a_1 / 6h; W_2 = \mu_0 I_1^2 w_1^2 \pi D a_{12} / 2h; W_3 = \mu_0 I_1^2 w_1^2 \pi D a_2 / (6h), \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость, $D = c + b + \frac{a_1 + a_{12} + a_2}{2}$ – средний диаметр трансформатора, a_1, a_2 – ширины обмоток, a_{12} – расстояние между обмотками.

Индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке равна:

$$L_{12} = 2W_M / I_1^2, \quad (2)$$

где $W_M = W_1 + W_2 + W_3$ – энергия магнитного поля рассеяния трансформатора.

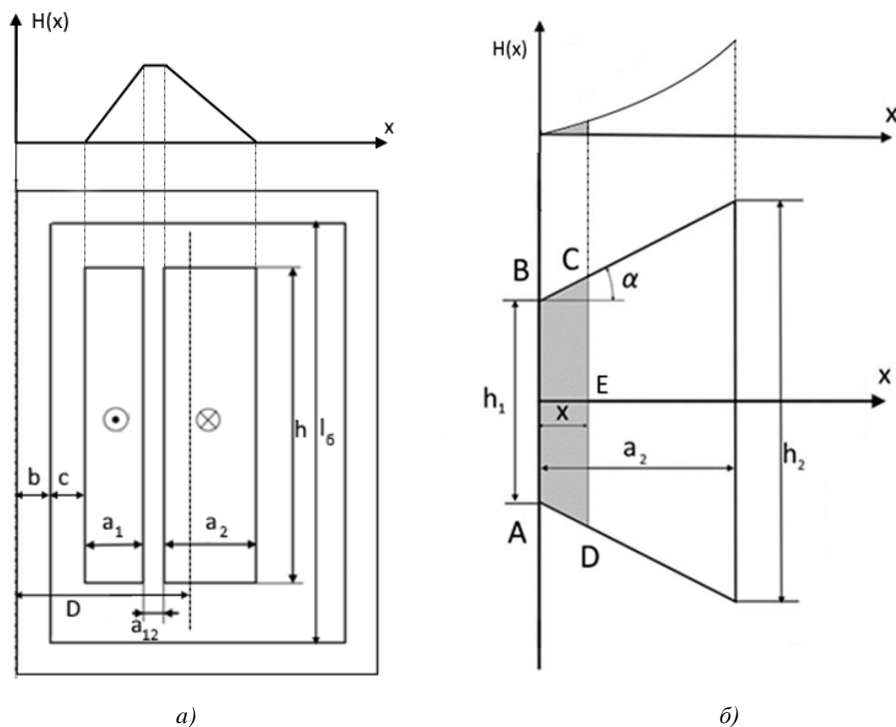


Рис. 2. Радиальное сечение обмоток прямоугольного сечения (а) и трапецидального сечения (б) Fig. 2. Radial section of windings of rectangular section (a) and trapezoidal section (b)

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

Индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке, определяется по формуле:

$$L_{12} = \mu_0 \pi D w_1^2 \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) / l_\sigma. \quad (3)$$

где l_σ – эмпирическая величина, которая несколько превышает высоту обмоток h и на рисунке 2а совпадает с высотой окна [6].

При использовании (3) для трапецидальной обмотки возникает вопрос о замене поперечного сечение трапецидальной вторичной обмотки эквивалентным прямоугольным. В статье рассматриваются два варианта подхода к учету трапецидальной формы вторичной обмотки. Первый подход, который традиционно используется при расчете высоковольтных испытательных трансформаторов, – использование (3) при замене трапецидального сечения вторичной обмотки прямоугольным. При этом сохраняется ее размер, равный большей стороне трапецидального сечения h_2 (рис. 2б), а ширина a'_2 эквивалентной прямоугольной обмотки находится из условия равенства сечений прямоугольной S_{II} и трапецидальной S_T обмоток:

$$a'_2 = a_2 \frac{S_T}{S_{II}} = a_2 \frac{(h_1 + h_2)}{2h_2}. \quad (4)$$

Во втором подходе учитывается изменение количества витков вторичной обмотки в радиальном направлении. Магнитоэстатическое поле принимается плоскопараллельным, линии этого поля считаются прямыми, параллельными оси трансформатора. При этом энергия магнитного поля в пределах первичной обмотки W_1 и в промежутке между обмотками W_{12} остается без изменения по сравнению с предыдущим подходом. Поэтому

необходимо найти выражение только для W_3 , в котором следует учесть изменение количества витков в радиальном направлении.

За пределами вторичной обмотки напряженность магнитного поля равна нулю и суммарная магнитодвижущая сила обмоток в режиме противовключения равна нулю, поэтому зависимость напряженности магнитного поля от координаты x , например в точке E , на рисунке 2б определяется из закона полного тока:

$$H_{(x)} = I_2 w_2' / l_{\sigma}, \quad (5)$$

где w_2' – количество витков в пределах заштрихованной трапеции на рисунке 2б.

Количество витков w_2' определяется отношением площади трапеции $ABCD$ $s_{ABCD} = x(h_1 + xtg\alpha)$ на рисунке 2б к площади поперечного сечения вторичной обмотки $s_2 = \frac{(h_1 + h_2)a_2}{2}$:

$$w_2' = w_2 \frac{s_{ABCD}}{s_2} = w_2 \frac{2x(h_1 + xtg\alpha)}{(h_1 + h_2)a_2}, \quad (6)$$

где $tg\alpha = \frac{h_2 - h_1}{2a_2}$.

С учетом (5) получаем:

$$H_{(x)} = \frac{I_2 w_2}{l} \cdot \frac{2x(h_1 + xtg\alpha)}{(h_1 + h_2)a_2}. \quad (7)$$

Плотность энергии магнитного поля в пределах вторичной обмотки:

$$W_{3(x)}' = \frac{\mu_0 H_{(x)}^2}{2} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \left(\frac{I_2 w_2}{l} \cdot \frac{2x(h_1 + xtg\alpha)}{(h_1 + h_2)a_2} \right)^2. \quad (8)$$

Энергия магнитного поля:

$$W_3 = \int_0^{a_2} W_{3(x)}' dv = \frac{2\mu_0 I_2^2 w_2^2 \pi D}{l(h_1 + h_2)^2} \left(\frac{h_1^2 a_2}{3} + \frac{h_1 a_2^2 tg\alpha}{2} + \frac{a_2^3 tg^2 \alpha}{5} \right). \quad (9)$$

Индуктивность рассеяния трансформатора с трапецидальной вторичной обмоткой, приведенная к первичной обмотке, определяется формулой:

$$L_{12} = \mu_0 \pi D w_1^2 \left(a_{12} + \frac{a_1}{3} + \frac{4}{(h_1 + h_2)^2} \left(\frac{h_1^2 a_2}{3} + \frac{h_1 a_2^2 tg\alpha}{2} + \frac{a_2^3 tg^2 \alpha}{5} \right) \right) / l \quad (10)$$

Анализ погрешности расчета индуктивности рассеяния по (10) и (3) будет дан далее на основе численного расчета.

Численный метод. Для расчета магнитного поля трансформатора используется метод конечных элементов [12-15]. Рассчитывается магнитостатическое поле в режиме противовключения, когда магнитодвижущие силы обмоток равны и противоположно направлены:

$$I_1 w_1 = -I_2 w_2, \quad (11)$$

где I_1, I_2, w_1, w_2 – токи и витки первичной и вторичной обмоток соответственно.

Будем считать, что ток каждой обмотки равномерно распределен по ее сечению, тогда для плотностей токов имеем:

$$J_1 = I_1 w_1 / s_1. \quad (12)$$

$$J_2 = I_2 w_2 / s_2. \quad (13)$$

По результатам расчета поля находится энергия магнитного поля W_M во всей расчетной области модели и индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке, по (2).

Магнитостатическое поле рассчитывается внутри окна, показанного на рисунке 3, где OO' – ось симметрии трансформатора.

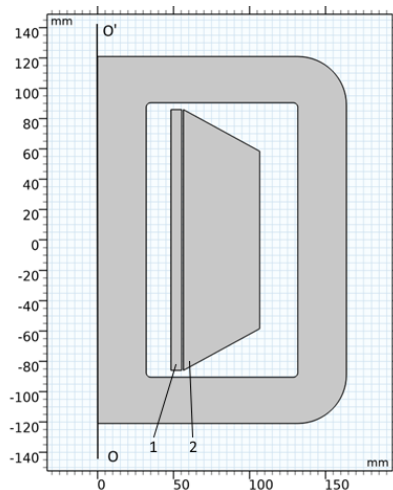


Рис. 3. 2D-модель базового трансформатора: Fig. 3. 2D model of the basic transformer: 1 – первичная обмотка, 2 – вторичная обмотка 1 – primary winding, 2 – secondary winding

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

При расчете поля используется уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала \vec{A} ($\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$). Для плоскопараллельного поля векторный потенциал и плотность тока имеют одну составляющую A_z и J_z , которые обозначим как A и J . Тогда уравнение Пуассона для плоскопараллельного поля в кусочно-однородной среде запишем в виде [12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial(A)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial(A)}{\partial y} \right) = -J. \quad (14)$$

Энергия магнитного поля и индуктивность рассеяния относятся к единице длины модели.

Поскольку целью работы является выбор аналитического метода расчета индуктивности рассеяния для оптимизации трансформатора, весьма важно оценить точность и время численного расчета индуктивности. Они существенно зависят от размера сетки. Для анализа этих параметров размер сетки в пределах пространства, занятого обмотками, изменялся в пределах от 10 мм до 1 мм. Расчеты показали, что при изменении размера сетки с 2 мм до 1 мм, значение энергии магнитного поля изменяется только в пятой значащей цифре. Поэтому точными считаются значения, полученные при шаге сетки 1 мм. Время численного расчета исследуемых трансформаторов составляет несколько десятков секунд.

Результаты расчета. Расчеты индуктивности рассеяния выполнены для трансформаторов, диапазон изменения относительных размеров которых охватывает большинство возможных вариантов при оптимизационных расчетах $1 < h_2/a_2 < 14$, $0 < h_1/h_2 < 1$. Размеры исследуемых трансформаторов получены путем изменения размеров базового трансформатора. Главным размером трансформатора, который определяет относительные размеры исследуемого трансформатора, является высота первичной обмотки h_1 , равная основанию трапецидального сечения вторичной обмотки h_2 (рис. 2). Например, если этот размер уменьшается в два раза, а площадь сечения обмоток сохраняется неизменной, то в два раза увеличиваются ширины обмоток a_1 и a_2 . При этом соответственно меняются средний диаметр D и размеры окна магнитопровода. Расстояния от обмоток до магнитопровода сохраняются. Размеры обмоток и расстояние между обмотками базового трансформатора следующие: $h_1 = 116$ мм, $h_2 = 172,5$ мм, $a_1 = 7,04$ мм, $a_2 = 50,2$ мм, $a_{12} = 1,14$ мм. Относительные размеры базового трансформатора равны $h_1/h_2 = 0,674$, $h_2/a_2 = 3,4$.

Для анализа эффективности предложенной в статье методики учета трапецидальной формы сечения вторичной обмотки выполнено сравнение результатов расчета по (3) и (10) с численным расчетом плоскопараллельного поля базового трансформатора и его модификаций. Погрешность расчета:

$$\Delta\% = \frac{L_{12} - L_{12}^{Точн}}{L_{12}^{Точн}} \cdot 100\% , \quad (15)$$

где L_{12} – индуктивность рассеяния, рассчитанная по (3) или (10), $L_{12}^{Точн}$ – индуктивность рассеяния, рассчитанная численным методом.

Для базового трансформатора погрешность расчета индуктивности рассеяния по (10), полученная из опыта короткого замыкания, не превышает 5%, что подтверждают правомерность принятых допущений.

Результаты численного расчета приняты за точные. На рисунке 4 представлены зависимости погрешности расчета индуктивностей рассеяния трансформаторов по (10), а на рисунке 5 по (3).

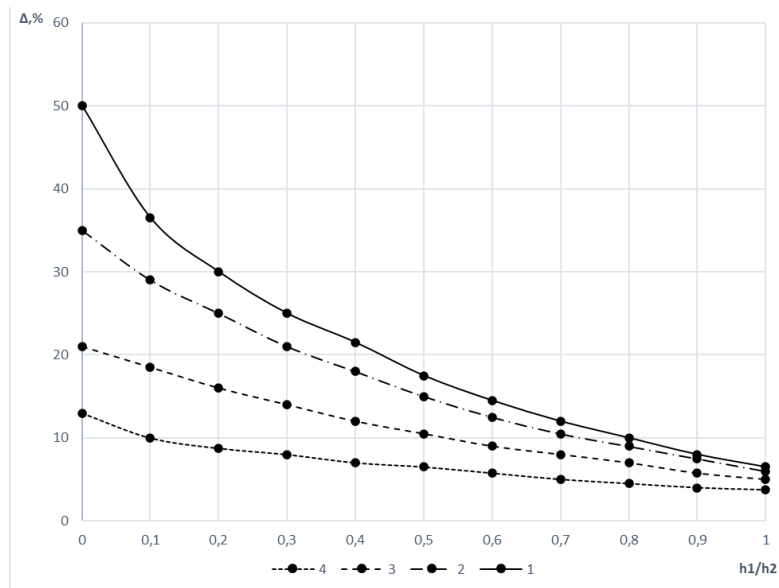


Рис. 4. Погрешность расчета индуктивности рассеяния с трапецидальной вторичной обмоткой по (10) (1 - $h_2/a_2 = 4,3$; 2 - $h_2/a_2 = 3,4$; 3 - $h_2/a_2 = 2$; 4 - $h_2/a_2 = 1,16$)

Fig. 4. Error in calculating the scattering inductance with a trapezoidal secondary winding according to (10) (1 - $h_2/a_2 = 4,3$; 2 - $h_2/a_2 = 3,4$; 3 - $h_2/a_2 = 2$; 4 - $h_2/a_2 = 1,16$)

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

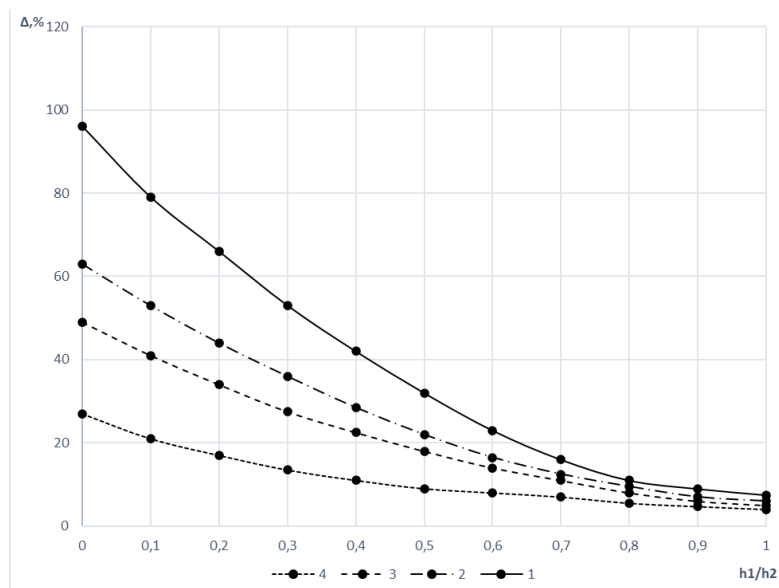


Рис. 5. Погрешность расчета индуктивности рассеяния трансформатора с трапецидальной вторичной обмоткой по (3) (1- $h_2/a_2 = 4,3$; 2 - $h_2/a_2 = 3,4$; 3- $h_2/a_2 = 2$; 4 - $h_2/a_2 = 1,16$)

Fig. 5. Error in calculating the scattering inductance of a transformer with a trapezoidal secondary winding according to (3) (1- $h_2/a_2 = 4,3$; 2 - $h_2/a_2 = 3,4$; 3- $h_2/a_2 = 2$; 4 - $h_2/a_2 = 1,16$)

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

Из сравнения зависимостей на этих рисунках следует, что погрешность расчета по (3) при всех значениях h_1/h_2 (кроме $\frac{h_1}{h_2} = 1$, так как это случай прямоугольного сечения обмотки) больше, чем по (10), причем разница между этими погрешностями увеличивается при уменьшении параметра h_1/h_2 . Расчеты показали, что при $h_1/h_2 > 0,8$ погрешности отличаются незначительно при всех h_2/a_2 , а при $h_1/h_2 < 0,8$ погрешность расчета по (3) может превышать погрешность расчета по (10) почти в два раза в зависимости от значения параметра h_2/a_2 . Это сравнение позволяет сделать вывод об эффективности предложенной в статье методики учета трапециевидальной формы сечения вторичной обмотки. Необходимо отметить, что при уменьшении параметра h_1/h_2 и увеличением h_2/a_2 погрешность расчета по (10), учитывающей трапециевидальную форму сечения вторичной обмотки, увеличивается. Это связано с увеличением количества линий поля, которые отклоняются от прямых, параллельных оси трансформатора, то есть с нарушением основного допущения, принятого при получении (10). Для подтверждения на рисунке 6 показаны картины магнитного поля при разных значениях параметра h_1/h_2 и $h_2/a_2 = 0,674$.

Определим диапазоны изменения параметров, когда расчеты по (10) не превышает 10%. Это условие соблюдается при $h_1/h_2 > 0,8$ для любого из рассмотренных параметров h_2/a_2 . При $h_2/a_2 < 2$ погрешность меньше 10% наблюдается при $h_1/h_2 > 0,5$, а при $h_2/a_2 < 1$ данный диапазон расширяется до $h_1/h_2 > 0,1$.

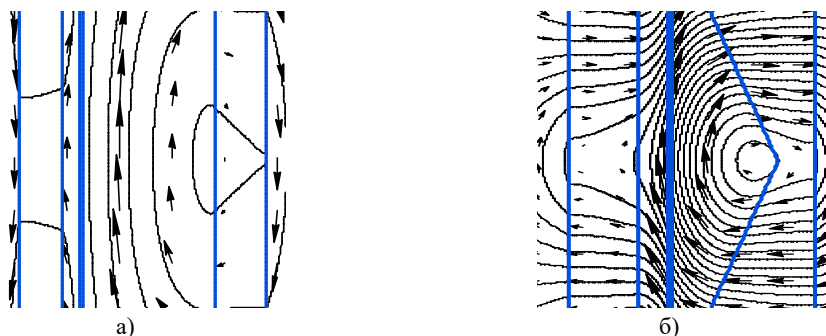


Рис. 6. Картины поля для базового трансформатора при разных соотношениях оснований трапециевидального сечения вторичной обмотки $h_1/h_2 = 0,674$ трапециевидального сечения: а) $h_1/h_2 = 0,674$; б) $h_1/h_2 = 0$

Fig. 6. Field patterns for the base transformer at different ratios of the bases of the trapezoidal section of the secondary winding $h_1/h_2 = 0,674$ of the trapezoidal section: а) $h_1/h_2 = 0,674$; б) $h_1/h_2 = 0$

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

При замене трапециевидальной катушки прямоугольной погрешность расчета индуктивности рассеяния также увеличивается при уменьшении параметра h_1/h_2 , так как линии поля не только отклоняются от прямых линий, но и не учитывается изменение количества витков вторичной обмотки в радиальном направлении. Поэтому погрешность при таком подходе увеличивается, что видно из сравнения графиков на рисунках 4 и 5. Определим диапазоны изменения параметров, когда расчеты по (3) не превышает 10%. Это условие соблюдается при $h_1/h_2 > 0,9$ для любого из рассмотренных параметров h_2/a_2 . При $h_2/a_2 < 2$ погрешность меньше 10% наблюдается при $h_1/h_2 > 0,7$, а при $h_2/a_2 < 1$ данный диапазон расширяется до $h_1/h_2 > 0,5$.

Заключение (Conclusions)

1. В статье предложен метод расчета индуктивности рассеяния трансформатора, в котором учтена трапециевидальная форма сечения вторичной обмотки. Показано, что погрешность расчета существенно уменьшается по сравнению с погрешностью метода, разработанного для силовых трансформаторов с прямоугольным сечением обмоток.

2. Определены диапазоны изменения относительных параметров трансформатора, в котором погрешность разработанного метода не превышает 10% и его целесообразно использовать для многовариантных оптимизационных расчетов.

3. Время численного расчета индуктивности рассеяния трансформатора составляет несколько десятков секунд. Такой расчет следует выполнять при оптимизации трансформатора, когда погрешность аналитического расчета велика, то есть при $a_2/h_2 > 3$ и одновременно при больших отклонениях формы сечения обмоток от прямоугольной $h_1/h_2 < 0,4$.

Литература

1. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
2. Г.Н. Петров. Электрические машины. Часть первая. Введение. Трансформаторы. М: Энергия. 1974, 240 с.
3. Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Аналитическая теория трансформаторов М: Национальный исследовательский университет МЭИ. 2019. С. 112
4. Ouyang, W. G. Hurley and M. A. E. Andersen, "Improved Analysis and Modeling of Leakage Inductance for Planar Transformers," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 2225-2231, Dec. 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2871968.
5. L. M. R. Oliveira and A. J. M. Cardoso, "Leakage Inductances Calculation for Power Transformers Interturn Fault Studies," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1213-1220, June 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2371877.
6. Dawood K., Isik F., Kömürgöz Kırış G. Comparison of Analytical Method and Different Finite Element Models for the Calculation of Leakage Inductance in Zigzag Transformers, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA*, cilt.28, sa.1, pp.16-22, 2022.
7. A. Sharma and J. W. Kimball, "Evaluation of Transformer Leakage Inductance Using Magnetic Image Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 11, pp. 1-12, Nov. 2021, Art no. 8401912, doi: 10.1109/TMAG.2021.3111479.
8. M. Lambert, F. Sirois, M. Martinez-Duro and J. Mahseredjian, "Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 507-515, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2225451.
9. Hernandez, F. de Leon and P. Gomez, "Design Formulas for the Leakage Inductance of Toroidal Distribution Transformers," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2197-2204, Oct. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2157536.
10. M. Lambert, F. Sirois, M. Martinez-Duro and J. Mahseredjian, "Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 507-515, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2225451.
11. R. Torchio, "A Volume PEEC Formulation Based on the Cell Method for Electromagnetic Problems From Low to High Frequency," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 12, pp. 7452-7465, Dec. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2927789
12. Жуйков А.В., Кубаткин М.А., Ларин В.С., Матвеев Д.А., Никулов И.И., Хренов С.И. К определению индуктивностей рассеяния обмоток трансформаторов // *Электротехника*. 2019. №8. с. 46-53.
13. M. D'Antonio, S. Chakraborty and A. Khaligh, "Planar Transformer With Asymmetric Integrated Leakage Inductance Using Horizontal Air Gap," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 14014-14028, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3089606.
14. Бутырин, Павел А., Семен Д. Дубицкий, и Николай В. Коровкин. "Численное моделирование электромагнитных полей: мультифизические задачи, инструментарий и обучение." *Электричество* 6 (2019): с.51-58.
15. COMSOL Multiphysics User's Guide, p.563.
16. E. D. Paramonov, I. Sakhno Liudmila, I. Sakhno Olga and E. Y. Kochetkova, "Analysis of Methods for Calculating Leakage Inductance of a High-Voltage Test Transformer," *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 680-684, doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468519.

Авторы публикации

Сахно Людмила Ивановна – д-р техн. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-5449> lsahno2010@yandex.ru

Парамонов Евгений Дмитриевич – аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, paramon.j.e.k@gmail.com

Сакно Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Высшая математика» Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8879-986x> olga.sakhnoj@yandex.ru

Кочеткова Елена Юрьевна – канд. техн. наук, доцент Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, k_eu@mail.ru

Миневич Татьяна Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, tm_21@rambler.ru

References

1. K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017
2. G.N. Petrov. *Elektricheskie mashiny. Chast' pervaya. Vvedenie*. Transformatory. M: Energiya. 1974, 240 s.
3. Butyrin P.A., Alpatov M.E. *Analiticheskaya teoriya transformatorov* M: Nacional'nyj issledovatel'skij universitet MEI. 2019. С. 112
4. Ouyang, W. G. Hurley and M. A. E. Andersen, "Improved Analysis and Modeling of Leakage Inductance for Planar Transformers," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 2225-2231, Dec. 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2871968.
5. L. M. R. Oliveira and A. J. M. Cardoso, "Leakage Inductances Calculation for Power Transformers Interturn Fault Studies," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1213-1220, June 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2371877.
6. Dawood K., Isik F., K m rg z Kırış G. Comparison of Analytical Method and Different Finite Element Models for the Calculation of Leakage Inductance in Zigzag Transformers, *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTEHNIKA*, cilt.28, sa.1, pp.16-22, 2022.
7. A. Sharma and J. W. Kimball, "Evaluation of Transformer Leakage Inductance Using Magnetic Image Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 11, pp. 1-12, Nov. 2021, Art no. 8401912, doi: 10.1109/TMAG.2021.3111479.
8. M. Lambert, F. Sirois, M. Martinez-Duro and J. Mahseredjian, "Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 507-515, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2225451.
9. Hernandez, F. de Leon and P. Gomez, "Design Formulas for the Leakage Inductance of Toroidal Distribution Transformers," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2197-2204, Oct. 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2011.2157536.
10. M. Lambert, F. Sirois, M. Martinez-Duro and J. Mahseredjian, "Analytical Calculation of Leakage Inductance for Low-Frequency Transformer Modeling," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 507-515, Jan. 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2225451.
11. R. Torchio, "A Volume PEEC Formulation Based on the Cell Method for Electromagnetic Problems From Low to High Frequency," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 12, pp. 7452-7465, Dec. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2927789
12. Zhujkov A.V., Kubatkin M.A., Larin V.S., Matveev D.A., Nikulov I.I., Hrenov S.I. K opredeleniyu induktivnostej rasseyaniya obmotok transformatorov // *Elektrotehnika*. 2019. №8. с. 46-53.
13. M. D'Antonio, S. Chakraborty and A. Khaligh, "Planar Transformer With Asymmetric Integrated Leakage Inductance Using Horizontal Air Gap," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 12, pp. 14014-14028, Dec. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3089606.
14. Butyrin, Pavel A., Semen D. Dubickij, i Nikolaj V. Korovkin. \"Chislennoe modelirovanie elektromagnitnyh polej: mul'tifizicheskie zadachi, instrumentarij i obuchenie.\" *Elektrichestvo* 6 (2019): s.51-58.
15. COMSOL Multiphysics User's Guide, p.563.
16. E. D. Paramonov, I. Sakhno Liudmila, I. Sakhno Olga and E. Y. Kochetkova, "Analysis of Methods for Calculating Leakage Inductance of a High-Voltage Test Transformer," *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 680-684, doi: 10.1109/EICon61730.2024.10468519.

Authors of the publication

Liudmila I. Sakhno – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7204-5449>, lsahno2010@yandex.ru

Evgenii D. Paramonov – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, paramon.j.e.k@gmail.com

Olga I. Sakhno – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8879-986x>, olga.sakhnoj@yandex.ru

Elena Y. Kochetkova – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, k_ey@mail.ru

Tatyana G. Minevich – Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University St. Petersburg, Russia, tm_21@rambler.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **06.08.2024 г.**

Отредактировано **30.10.2024 г.**

Принято **15.11.2024 г.**



ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЗАРЯДНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

Солюянов Ю.И.¹, Федотов А.И.², Ахметшин А.Р.², Федотов Е.А.², Халтурин В.А.³

¹ООО «Ассоциация РЭМ», г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³АО «ТАТЭМ», г. Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, ahmetshin.ar@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в совершенствовании нормативной базы, регламентирующей порядок определения расчетной нагрузки общественных зданий при интеграции в электроустановки указанных зданий зарядной инфраструктуры для электромобилей. ЦЕЛЬ. Определение графика потребления электроэнергии, коэффициента одновременности и несовпадения максимумов зарядной инфраструктуры для электромобилей с последующей разработкой предложений по актуализации СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» в части методики определения расчетной нагрузки общественных зданий при интеграции в электроустановки указанных зданий зарядной инфраструктуры для электромобилей. МЕТОДЫ. При выполнении поставленной цели были использованы экспериментальные, математические и статистические методы. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработана методика определения коэффициентов одновременности и несовпадения максимумов зарядных станций электромобилей, и получены их численные значения в зависимости от типа, мощности и сочетания одновременно работающих коннекторов зарядных станций. Разработаны предложения по внесению изменений к СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» в части методики определения расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки общественных зданий. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработка методики расчета электрических нагрузок одновременно с разработкой коэффициентов спроса, одновременности и коэффициента несовпадения максимумов зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в общественные здания, будет способствовать оптимизации затрат на технологическое присоединение к электрическим сетям.

Ключевые слова: зарядная станция; электромобиль; электрические нагрузки; коэффициент одновременности; коэффициент несовпадения максимумов; коэффициент спроса; график нагрузки.

Благодарности: Работа выполнена по договору № 32413301943 – 2/2024 от 03.04.2024 г. с федеральным автономным учреждением «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по исследованию энергопотребления и определению расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки общественных и многофункциональных зданий.

Для цитирования: Солюянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., Федотов Е.А., Халтурин В.А. Определение расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для электромобилей, интегрированной в электрические установки жилых и общественных зданий // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 94-107. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-94-107.

DETERMINATION OF ESTIMATED ELECTRICAL LOADS OF CHARGING INFRASTRUCTURE FOR ELECTRIC VEHICLES INTEGRATED INTO ELECTRICAL INSTALLATIONS OF RESIDENTIAL AND PUBLIC BUILDINGS

Soluyanov Yu.I.¹, Fedotov A.I.², Akhmetshin A.R.², Fedotov E.A.², Khalturin V.A.³

¹LLC "Association REM", Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³JSC "TATEM", Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4424-7761>, ahmetshin.ar@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The research aims to improve the regulatory framework governing the procedure for determining the estimated load of public buildings when integrating charging infrastructure for electric vehicles into the electrical installations of these buildings. *THE PURPOSE.* Determination of the schedule of electricity consumption, the coefficient of simultaneity and non-coincidence of maximums of the charging infrastructure for electric vehicles, with subsequent development of proposals for updating SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and installation rules" in terms of the methodology for determining the estimated load of public buildings when integrating charging infrastructure for electric vehicles into the electrical installations of the said buildings. *METHODS.* In achieving this goal, experimental, mathematical and statistical methods were used. *RESULTS.* A methodology for determining the coefficients of simultaneity and non-coincidence of maximums of electric vehicle charging stations has been developed, and their numerical values have been obtained depending on the type, power, and combination of simultaneously operating charging station connectors. Proposals have been developed for amending SP 256.1325800.2016 "Electrical installations of residential and public buildings. Design and installation rules" in terms of the methodology for determining the estimated electrical loads of the charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of public buildings. *CONCLUSION.* The development of a methodology for calculating electrical loads simultaneously with the development of demand factors, simultaneity and the coefficient of mismatch of maximums of charging infrastructure for electric vehicles integrated into public buildings will contribute to the optimization of costs for technological connection to electrical networks.

Keywords: charging station; electric vehicle; electrical loads; simultaneity factor; peak-to-peak mismatch factor; demand factor; load schedule.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was prepared, was carried out under contract No. 32413301943 - 2/2024 dated 03.04.2024 with the federal autonomous institution "Federal Center for Normation, Standardization and Technical Assessment of Conformity in Construction" as part of research and development work on the study of energy consumption and determination of the calculated electrical loads of the charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of public and multifunctional buildings.

For citation: Soluyanov Yu.I., Fedotov A.I., Akhmetshin A.R., Fedotov E.A., Khalturin V.A. Determination of estimated electrical loads of charging infrastructure for electric vehicles integrated into electrical installations of residential and public buildings. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 94-107. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-94-107.

Введение (Introduction)

Электротранспорт используется во многих странах мира. В ближайшие годы его развитие будет только усиливаться [1-3]. Благодаря новым стратегиям крупнейших автопроизводителей и решениям правительств по ужесточению выбросов вредных веществ автомобилями (АМ) и поддержке транспорта на альтернативных видах топлива (в рамках различных мер стимулирования) рынок электромобилей (ЭМ) и топливных элементов динамично развивается и имеет потенциал дальнейшего роста [4-7]. Главными преимуществами ЭМ являются отсутствие выхлопных газов, низкие эксплуатационные расходы, высокая эффективность двигателя, рекуперативное использование энергии при торможении [8-14]. Основными причинами развития и

популяризации мирового рынка ЭМ стали развитие технического прогресса, электроники, химической промышленности, растущий интерес к альтернативным источникам энергии, а также масштабная борьба с загрязнением окружающей среды и глобальным потеплением [15-20]. Развитие новых технологий привело к устойчивому росту продаж ЭМ. Эксперты прогнозируют, что к 2030 году продажи ЭМ вырастут до 27 миллионов единиц.

Развитие зарядной инфраструктуры для ЭМ в мире идет быстрыми темпами, и это обусловлено несколькими ключевыми факторами: растущая популярность ЭМ; государственные инициативы [15].

Распоряжением Правительства Российской Федерации (РФ) от 23 августа 2021 г. № 2290-р принята «Концепция развития производства и использования электрического АМ транспорта в РФ до 2030 года» (Концепция), в соответствии с которой определены целевые индикаторы производства электрического АМ транспорта и развития электрической зарядной инфраструктуры в РФ до 2030 года [14].

Несмотря на ряд мер по развитию инфраструктуры зарядных станций (ЗС) для ЭМ в РФ, их дальнейшее распространение сталкивается с определенными трудностями.

Одной из проблем, которая влияет на распределение ЗС для ЭМ, является риск увеличения нагрузки на электрические сети [21-23]. И в этом контексте проводимая научная работа становится актуальной, так как, как показывает практика, существует проблема несоответствия расчетных электрических нагрузок при проектировании и их фактических значений при эксплуатации объектов [22-24]. Необходимость проведения научно-исследовательской работы (НИР) связана с выявлением пробелов в отечественной нормативной базе, отсутствием в нормативных документах методик определения расчетных нагрузок ЗС для ЭМ, интегрированных в инфраструктуру общественных зданий [24, 25], таких как здания дошкольных образовательных учреждений (ДОУ), среднеобразовательных школ (СОШ), многопрофильных лечебно-профилактических учреждений (МЛПУ) и физкультурно-оздоровительных комплексов (ФОК). Областью применения результатов является актуализированный СП 256.1325800.2016 «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» (СП), нормативные требования которого будут использоваться проектными и строительными организациями, выполняющими расчеты по выбору ЗС и электрических сетей, обеспечивающих электроснабжение общественных зданий.

Литературный обзор (Literature Review)

В статье [1] подробно рассматривается история развития электропитания для транспортных средств в России с акцентом на состояние их производства в наши дни. Основные целевые показатели развития сети ЗС на территории России, а также анализ текущей доли отечественной продукции на внутреннем рынке приведены в работе [9].

ЗС играют ключевую роль в развитии электротранспорта в странах с уже развитой дорожной инфраструктурой [17]. Сопоставление уже накопленного опыта развития электротранспорта, представленного в зарубежной научной литературе, с современными мерами государственной поддержки с обобщением обязательных показателей развития электротранспорта приведены в работе [15].

В 2022 году в рамках Концепции реализованы проекты по созданию зарядной инфраструктуры в Москве и Санкт-Петербурге, Краснодарском и Красноярском краях, Республике Крым и городе Севастополе, Ленинградской, Московской, Нижегородской, Сахалинской областях, Республике Татарстан и других регионах. В 2023 году начато строительство ЗС во Владимирской, Воронежской, Калининградской, Липецкой, Ростовской, Тульской областях, в Приморском и Ставропольском краях, Чувашской Республике [14].

По мере увеличения проникновения ЭМ ожидается, что ЗС окажут значительное влияние на распределительные электрические сети (РЭС) [3]. В статье [3] в качестве примера показано, что станция для ЭМ может затмить спрос на электроэнергию общественного здания, увеличивая ежемесячный пиковый спрос на электроэнергию на стоянке более чем на 250%.

В статье [13] представлено целостное понимание проблем, подходов к смягчению последствий, связанных с развертыванием сети ЗС. Кроме того, освещаются стратегии оптимизации, такие как планирование местоположения, интеграция сети, планирование времени зарядки и планирование цены, которые предполагают максимальное использование ЗС и минимизацию связанных с этим затрат, а также методы их моделирования.

Для оценки влияния домашних ЗС на отклонение напряжения была разработана стохастическая квазидинамическая модель электрической сети на языке программирования Python. Данная модель позволяет моделировать суточные профили электропотребления и напряжения при различном количестве и точках подключения домашних ЗС с учетом случайного характера поведения владельцев ЭМ [10].

Результаты моделирования спроса ЗС, расположенной на парковке жилого комплекса, показывают, что предлагаемый алгоритм оптимального времени начала зарядки не только удовлетворяет спрос владельцев ЭМ на зарядку, но также значительно снижает пиковые нагрузки и провалы графика нагрузки, смягчая влияние зарядки ЭМ на РЭС [19].

Следовательно, кривые спроса служат основой для стратегического планирования РЭС с учетом будущего развития инфраструктуры ЗС [4].

В статье [2] предложен подход к анализу спроса на электроэнергию, необходимую для ЗС. Основой подхода являются социологические данные о владельцах ЭМ и графике использования ими ЭМ. Цель исследований – получить обоснованную оценку нагрузки на электрическую сеть, создаваемую ЭМ. Подход применен к условиям г. Ланьчжоу (Китай).

На основании результатов имитационного моделирования выполнена оценка потребности ввода новых ЗС в городе Кемерово на период до 2028 года. Приведена оценка дополнительной электрической нагрузки на городскую электрическую сеть со стороны ЗС [12].

Проблема размещения ЗС неизбежна и может быть дорогостоящей, если она будет сделана неправильно. Однако большая часть роста ЭМ в ближайшие десятилетия будет происходить в городских районах, где дальность поездки не является самой большой проблемой [6]. Эффективное размещение ЗС имеет важное значение для быстрого развития ЭМ, поскольку это необходимо для обеспечения удобства владельцев ЭМ и обеспечения эффективности дорожной сети. [8].

ЗС должны быть не только в достаточном количестве распространенными, чтобы владелец ЭМ в любом месте мог легко получить доступ к ЗС в пределах своего диапазона движения, но и широко распространенными, чтобы ЭМ могли курсировать по всему городу для подзарядки, эта задача является недетерминированной и полиномиально сложной [16].

Необходимо обеспечить равномерное распределение ЗС, чтобы уменьшить опасения владельцев ЭМ и обеспечить всем жителям равный доступ к зарядной инфраструктуре [18], для чего была разработана методика определения оптимальных мест для ЗС ЭМ на примере г. Гливице в Польше.

В настоящее время также ведутся работы по расширению применения электротранспорта за пределы больших городов и населенных пунктов посредством использования подстанций малой мощности 110/0,4 кВ как элемента электроснабжения зарядной инфраструктуры [11].

В статье [5] обсуждаются преимущества и недостатки мобильных ЗС, которые могут сыграть заметную роль в ускорении распространения ЭМ в России, предоставляя услуги зарядки без ограничений по месту.

Реализация возможных интеллектуальных сценариев управления, включая динамическую балансировку нагрузки между портами ЗС, осуществляется посредством коммуникационного протокола OCPP версии 1.6 с поддержкой функционала Smart Charging, позволяющего снизить нагрузку на распределительную сеть [7]. С увеличением числа ЭМ в домах возникает необходимость в эффективной и безопасной зарядке, что делает данную технологию особенно актуальной. Эта технология помогает управлять нагрузкой на электросеть и обеспечивает оптимальные условия для зарядки.

Основные преимущества интеллектуальных сценариев управления:

1. Балансировка мощности, при наличии нескольких ЭМ с разными требованиями к мощности заряда, информация о состоянии ЗС передается в контроллер балансировки мощности. Контроллер оптимизирует распределение мощности между ЗС, чтобы обеспечить эффективный цикл заряда.

2. Перераспределение мощности, если на одной из ЗС нет потребителей, мощность перераспределяется на другие станции, где она необходима. Это позволяет максимизировать использование имеющейся мощности и минимизировать риски перегрузок.

3. Снижение рисков перегрузок, технология позволяет избежать перегрузок в сети, что особенно важно в условиях высокой нагрузки.

4. Экономия на инфраструктуре, использование технологии снижает необходимость в строительстве новых подстанций и увеличении мощностей существующих, что сокращает экономические издержки.

Материалы и методы (Materials and methods)

В целях реализации Концепции в 2024 году внесены изменения в СП, позволяющие производить расчет мощности зарядной инфраструктуры, интегрированной в жилые здания. В частности, введены коэффициенты спроса, коэффициент несовпадения максимумов ЗС.

Согласно проекту Федерального закона о внесении изменений в статью 29.2 Градостроительного кодекса РФ, внесенному в 2024 году, региональные градостроительные нормативы должны устанавливать предельные значения расчетных показателей минимально допустимого количества машиномест, оборудованных ЗС для ЭМ, в размере не менее 5 % от общего количества машиномест.

В свою очередь, дополнительные затраты на технологическое присоединение ЗС в жилом секторе не оправданы, в связи с тем, что суточный график электрической нагрузки МКД изменяется с течением времени и имеет четко выраженный спад потребления электроэнергии в ночное время (рис. 1).

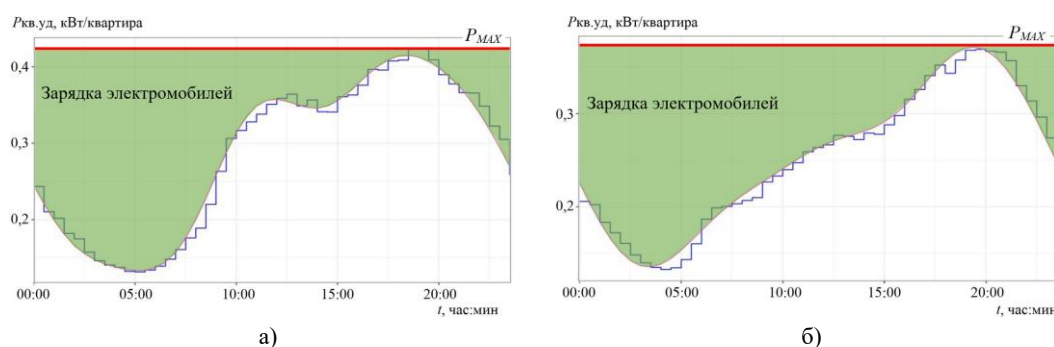


Рис. 1. Типичный график нагрузки МКД в выходные (а) и рабочие (б) дни

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

Зеленым цветом на рисунке 1 показаны временные зоны и объемы электроэнергии, которые можно использовать для зарядки ЭМ без превышения максимума (P_{MAX}) МКД. Следует отметить, что наибольшее количество свободной мощности и времени приходится на ночное время, что совпадает со временем зарядки ЭМ в МКД.

В качестве примера рассмотрены МКД г. Москвы, состоящие из 1 276 (вариант № 1) и 703 (вариант № 2) квартир [23]. Количество парковочных мест, оборудованных ЗС, составляет 5% от общего количества парковочных мест. Общее количество парковочных мест определяется из расчета 1 место на две квартиры. Для варианта № 1, количество парковочных мест, оборудованных ЗС, составило 32, для варианта № 2 – 18. В расчете рассматриваются медленные ЗС мощностью 11 кВт. Расчеты требуемой мощности ЗС для двух вариантов выполнены при следующих условиях: с учетом коэффициента спроса ($k_{с.з}$) (вариант № 1 – 193 кВт; вариант № 2 – 126 кВт); с учетом коэффициентов спроса ($k_{с.з}$) и несовпадения максимумов ($k_{нм.з}$) (вариант № 1 – 48 кВт; вариант № 2 – 31 кВт).

Требуемая мощность ЗС полностью компенсируется ночным провалом в соответствии с графиком нагрузки рассмотренных МКД г. Москвы (рис. 2) и не требует дополнительных затрат на технологическое присоединение. Так как пиковая нагрузка МКД в вечернее время составляет всего 32% от общей мощности трансформаторной подстанции (ТП) [22, 23], то это позволяет сделать вывод, что в резерве еще остается около 67% мощности.

Учитывая, что вопрос развития зарядной инфраструктуры является крайне актуальной задачей в настоящее время ведется НИР по исследованию энергопотребления и определению расчетных электрических нагрузок зарядной инфраструктуры для ЭМ, интегрированной в электрические установки общественных и многофункциональных зданий, по заданию федерального автономного учреждения «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» при Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации.

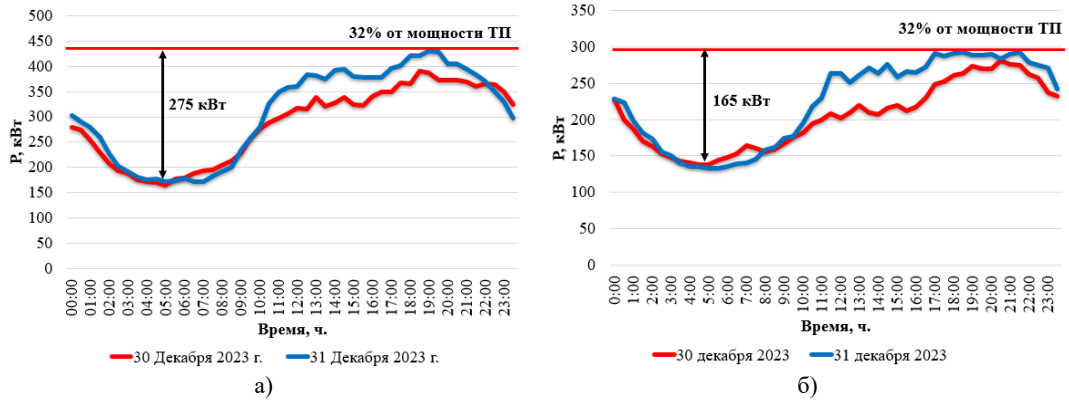


Рис. 2. Графики нагрузок МКД, состоящих из 1 276 квартир – вариант № 1 (а) и 703 квартир – вариант № 2 (б) *Fig. 2. Load schedules for an apartment building consisting of 1,276 apartments – option No. 1 (a) and 703 apartments – option No. 2 (b)*

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

В рамках выполнения НИР сформирована большая база данных по зарядным сессиям ЭМ на ЗС по всей стране. Это позволяет разработать нормативные значения и статистическими методами их обосновать.

В качестве примера на рисунке 3 представлена зарядная сессия ЭМ, предоставленная ООО «ЭЛЕКТРИФЛАЙ» – одним из операторов ЗС, по которой можно наблюдать за изменением электроэнергии нарастающим итогом, кВт·ч (рис. 3а), мощности, кВт (рис. 3б), состоянию заряда (SoC), % (рис. 3в), дискретность графиков составляет 1 мин. SoC определяется как отношение оставшегося заряда в батарее к максимальному заряду, который может обеспечить батарея.

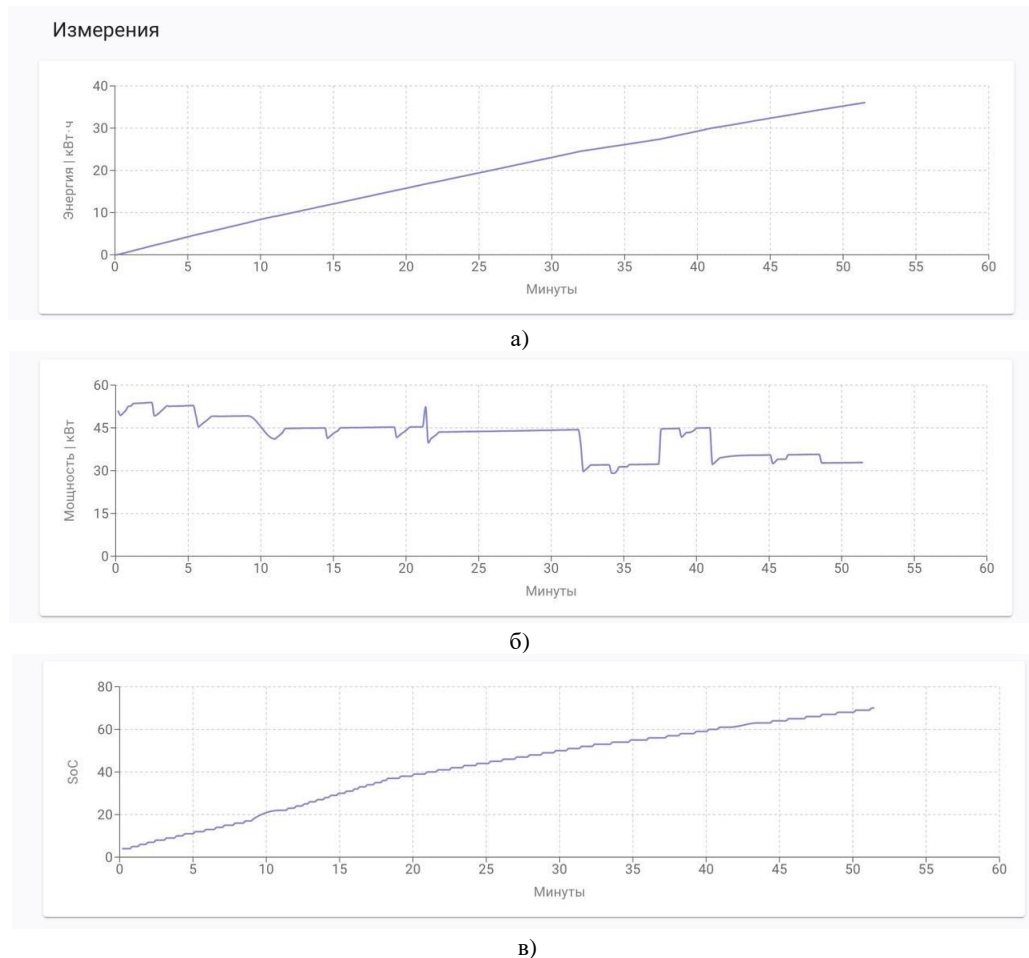
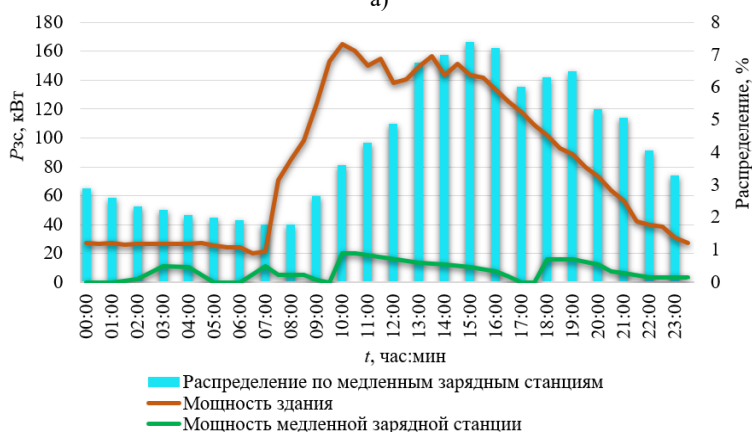


Рис. 3. Зарядная сессия ЭМ, графики: электроэнергия нарастающим итогом (а), мощность (б), состояния заряда (SoC) (в) *Fig. 3. Charging session of electric vehicles, graphs: cumulative electric energy (a), power (b), SoC (c)*

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

Данные о зарядных сессиях ЭМ позволили сформировать график распределения зарядных сессий по времени суток и, наложив его на график электрической нагрузки ДОУ, СОШ, МЛПУ и ФОК, получить соответствующие нормативные значения, на основании которых подготовить предложения по внесению изменений к СП.

В качестве примера на рисунке 4 представлены графики совмещения графика распределения зарядных сессий по времени суток и графика электрической нагрузки ДОУ (рис. 4а), СОШ (рис. 4б), МЛПУ (рис. 4в) и ФОК (рис. 4г).



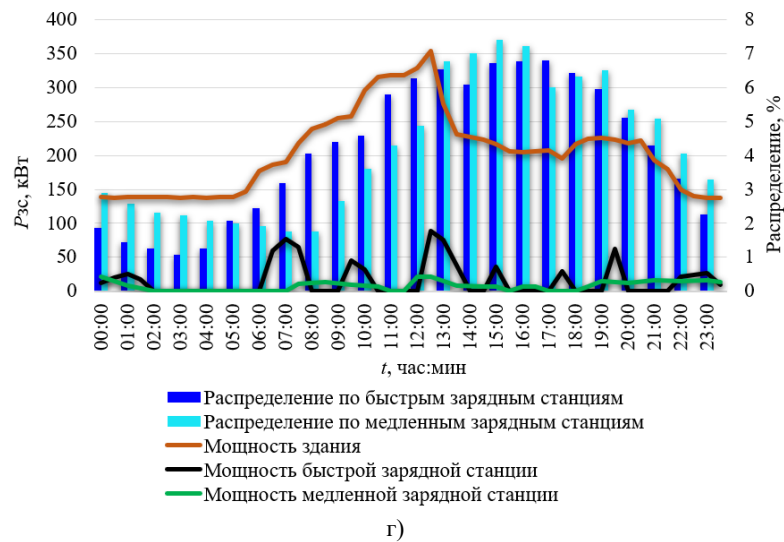


Рис. 4. Графики совмещения графика распределения зарядных сессий по времени суток и графика электрической нагрузки ДООУ (а), СОШ (б), МЛПУ (в) и ФОК (г)

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

Как видно из графиков на рисунке 4, зарядные сессии чаще всего происходят в дневное время и в отличие от МКД совпадают с пиковой нагрузкой рассматриваемых общественных зданий. С увеличением количества ЗС, подключенных к подстанциям, питающим эти объекты, целесообразно использовать коэффициенты спроса, учитывающие перекрытие сеансов зарядки при работе нескольких ЗС. Используя графики распределения зарядных сессий по времени суток и графика электрической нагрузки общественных зданий, можно разработать коэффициенты спроса, одновременности и несовпадения максимумов для любого количества ЗС, интегрированных в рассматриваемые объекты. Сравнение графиков нагрузки общественных зданий и ЗС на рисунке 4 демонстрирует, что чем больше уровень нагрузки общественного здания, тем менее значимо влияние ЗС. К примеру, работа медленной ЗС в ДООУ будет значительно влиять на общий график нагрузки (рис. 4а), напротив работа медленной ЗС в ФОК (рис. 4г) практически не оказывает влияния на общий график.

Результаты (Results)

На основании анализа отечественных и зарубежных нормативно-технических документов и результатов выполненной НИР предлагается учесть в проекте изменений к СП следующее:

Дополнить пункт 7.4.3 абзацем третьим в следующей редакции:

«Автостоянки для сотрудников и посетителей в составе медицинских организаций, организаций социального обслуживания населения, органов управления и обслуживания населения следует оборудовать ЗС для ЭМ. Количество машиномест, оборудованных ЗС, следует принимать: для автостоянок сотрудников из расчета 1 машиноместо на каждые 50 сотрудников организации, но не менее 2; для автостоянок посетителей из расчета 1 машиноместо на каждые 100 полных и неполных посещений в смену».

Дополнить подраздел 7.4 пунктом 7.4.6 в следующей редакции:

«7.4.6 Расчетная нагрузка общественных зданий с ЗС для ЭМ, интегрированными в электроустановки зданий, приведенная к вводу $P_{\text{общ}}$, кВт, определяется по формуле:

$$P_{\text{общ}} = P_p + K_{\text{нм.зс}} \cdot \sum_m n_m^{\text{зс}} \cdot K_m^{\text{с.зс}} \cdot P_m^{\text{зс}} \quad (13,а)$$

где P_p – расчетная электрическая нагрузка питающих вводов в здание в рабочем режиме, определенная согласно п. 7.2 СП, кВт; $K_{\text{нм.зс}}$ – коэффициент несовпадения максимумов нагрузки ЗС с максимумом нагрузки здания; $P_m^{\text{зс}}$ – расчетная нагрузка ЗС m -ой группы, кВт; $n_m^{\text{зс}}$ – количество однотипных ЗС в m -ой группе; $K_m^{\text{с.зс}}$ – коэффициенты спроса ЗС m -ой группы.

При наличии автоматизации, регулирующей отпуск свободной мощности на нужды

зарядной инфраструктуры, следует руководствоваться положениями п. 7.4.5 СП.

Дополнить подраздел 7.4 пунктом 7.4.7 в следующей редакции:

«7.4.7 Расчетную нагрузку ЗС P_m^{3c} , кВт, следует определять по формуле:

$$P_m^{3c} = K_m^{0.3c} \cdot (P_{ном1} + P_{ном2}) \quad (13,6)$$

где $K_m^{0.3c}$ – коэффициент одновременности зарядных сессий m -ой ЗС принимается равным значениям в соответствии с СП; $P_{ном1}$, $P_{ном2}$ – номинальные мощности двух наиболее мощных коннекторов ЗС, кВт.

Разработка методики расчета одновременно с разработкой коэффициентов одновременности, спроса и коэффициента несовпадения максимумов зарядной инфраструктуры, интегрированной в жилые и общественные здания, позволит существенно снизить затраты на технологическое присоединение к электрическим сетям.

Обсуждение (Discussions)

Анализ нагрузок ДОУ, СОШ, МЛПУ, ФОК [22-25] показал, что в рабочих режимах нагрузка вышеуказанных учреждений существенно ниже проектных значений, поскольку проектная нагрузка определялась с учетом аварийных режимов, что приводит к значительным резервам мощностей на питающих ТП. Аварийная нагрузка зависит от площади и высоты здания и достигает 30-40% от его расчетной рабочей мощности. В величину заявляемой мощности технологического присоединения включается суммарное значение рабочей и аварийной нагрузки без понижающих коэффициентов.

Реальные замеры максимальной фактической нагрузки и заявленной мощности технологического присоединения демонстрируют, что существует резерв мощности (который также обусловлен несовершенством нормативной базы [24]), что наглядно видно на примере ДОУ (рис. 5).

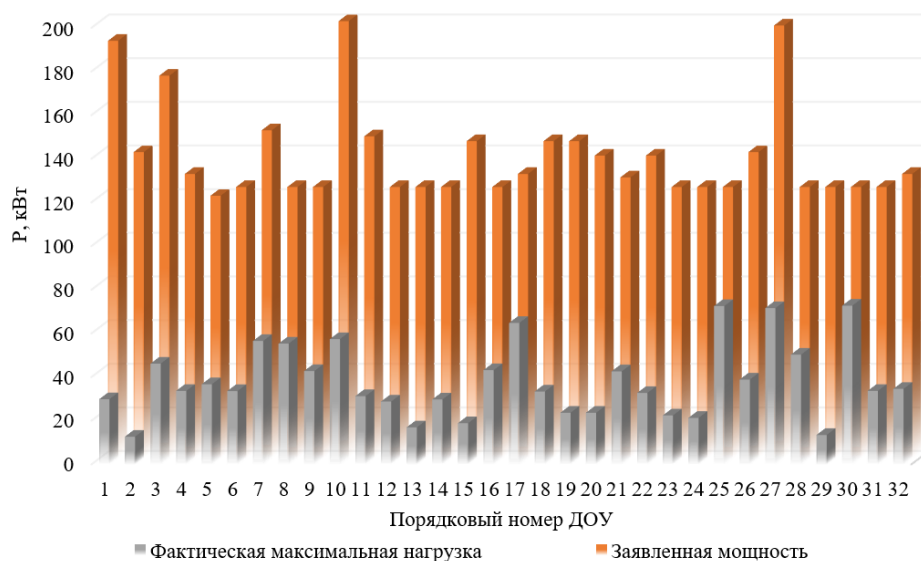


Рис. 5. Сравнение заявленной мощности технологического присоединения и фактических максимальных нагрузок ДОУ
 Fig. 5. Comparison of the declared capacity of technological connections and the actual maximum loads of kindergartens

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

Поскольку в режиме нормальной эксплуатации здания образуется не используемый резерв мощности, заложенный в выбор питающего кабеля и трансформаторов на питающей подстанции, имеется возможность его применить для подключения ЗС при условии оснащения подключаемой нагрузки соответствующей противаварийной автоматикой и системой балансировки мощности ЗС [7].

До 2030 г. ввиду наличия запаса мощности на ТП, питающих жилые и общественные здания, в соответствии с динамикой развития электротранспорта в РФ предлагается коэффициент несовпадения максимумов принять равным нулю, однако необходимо обеспечивать мониторинг количества эксплуатируемых ЭМ и зарядных сессий на ЗС для периодического пересмотра выше указанного коэффициента.

Делается это следующим образом. В электрощитовой здания устанавливается дополнительный щиток с автоматическими выключателями 0,4 кВ, оснащенными

независимыми расцепителями. Питание к новому щитку подводится от входных зажимов ВРУ. Автоматические выключатели щитка и кабели 0,4 кВ к ЗС выбираются исходя из мощности устанавливаемых станций, которая не должна превышать располагаемый аварийный запас. Возможно использование дополнительного резерва мощности в уже действующих общественных зданиях, если он выявлен измерениями реального электропотребления. На этапе проектирования это не допускается.

В случае срабатывания противопожарных охранных систем включаются электродвигатели дымососов и аварийное освещение, повышая общую нагрузку здания. Для предотвращения перегрузки питающих здание кабелей все ЗС должны быть немедленно отключены. Достигается это установкой автоматических выключателей с независимым расцепителем, на которые поступает команда «отключить» (цифровой вход) от охранной системы, или же силовой сигнал непосредственно на независимый расцепитель через адаптер, подключенный к противопожарной охранной системе. Дублирующий сигнал формируется максимальной токовой защитой/токовой отсечкой, подключаемой к трансформаторам тока на приёмном конце питающих кабелей. Тем самым выполняется разгрузка питающих кабелей до расчетной величины максимального тока.

На этапе проектирования системы электроснабжения общественного здания наличие ЗС может быть учтено заранее в виде самостоятельной цепи питания непосредственно от шин 0,4 кВ ТП. Предлагаемое выше техническое решение актуально для уже эксплуатируемых общественных зданий, где будут предусматриваться парковочные места для ЭМ и отсутствуют свободные ячейки для подключения новых присоединений в РУ-0,4 кВ ТП.

Численный пример. Общественное здание имеет максимальную расчетную нагрузку 500 кВт, аварийная нагрузка составляет 150 кВт. Заявленная мощность технологического присоединения составила 650 кВт. Свободные ячейки в РУ-0,4 кВ ТП для подключения новых кабелей от ЗС отсутствуют.

Мониторинг электрической нагрузки здания показал, что фактическая максимальная мощность достигает только 400 кВт. Таким образом, имеется возможность подключения ЗС на мощность не свыше 250 кВт. При этом должно быть предусмотрено отключение не менее 150 кВт мощности ЗС в случае срабатывания противопожарной охранной системы.

Возможны два технических решения подключения ЗС к эксплуатируемым электрическим сетям: непосредственно от электрощитовой здания (описано выше) и по схеме (рис. 6) через пункт секционирования заглубленного исполнения кабельных сетей 6-10 кВ [27].

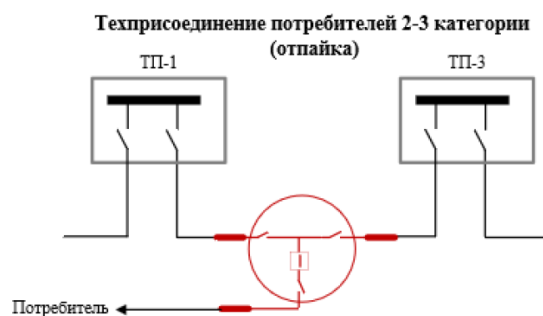


Рис. 6. Схема подключения новой нагрузки к кабельной сети на стороне 6-10 кВ

Fig. 6. Connection diagram of a new load to a 6-10 kV cable network

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

Второй вариант ограничен по мощности только допустимой нагрузкой кабелей, к которым подключается пункт секционирования, но существенно более затратен по отношению к первому варианту, т.к. требуется прокладка высоковольтного ответственного кабеля, установка понижающего трансформатора и распределительного щита 0,4 кВ.

Первый вариант требует внесения дополнений в нормативные документы в части состава противоаварийной автоматики и наличия автоматических выключателей с независимым расцепителем в дополнительном распределительном щитке 0,4 кВ.

Выводы (Conclusions)

Анализ загрузки ЗС в различных городах страны выявил, что наибольшим

спросом для зарядки ЭМ пользуются быстрые общественные ЗС (номинальная мощность 50 кВт и более). Установлено, что подавляющее большинство зарядных сессий приходится на разъемы, предназначенные для зарядки ЭМ производства Китая и Японии. Кроме того, было установлено, что несмотря на то, что ЗС оснащены несколькими разъемами, одновременная зарядка даже двух ЭМ на одной ЗС в подавляющем большинстве случаев не происходит. Выполнены исследования влияния нагрузки ЗС ЭМ на системы электроснабжения общественных зданий, таких как ДООУ, СОШ, МЛПУ, ФОК, а также разработана методика определения расчетных нагрузок ЗС ЭМ и методика определения расчетных нагрузок общественных зданий с учетом зарядной инфраструктуры.

Было установлено, что дополнительных мощностей для подключения зарядной инфраструктуры к системам электроснабжения жилых и общественных зданий до 2030 г. не требуется, ввиду достаточного запаса мощности на ТП.

Так как ДООУ, СОШ не предназначены для посещения посторонних лиц предлагается использование только медленных ЗС для персонала, а для МЛПУ, ФОК необходима установка как медленных, так и быстрых ЗС для удовлетворения потребностей персонала и посетителей данных объектов.

Литература

1. Бутырин П.А., Халютин С.П. Производство систем электропитания для автономных электротранспортных средств в России // *Электричество*. 2023. № 2. С. 13-26. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-2-13-26.
2. Чжан К., Коровкин Н.В., Тан М. Анализ спроса на зарядку электромобилей в Ланьчжоу (Китай) // *Электричество*. 2024. № 9. С. 52-59. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-9-52-59. EDN GHKGNТ.
3. Gilleran M., Bonnema E., Woods J., et al. Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings // *Applied Energy*. 2021. Vol. 4. Art. no. 100062. DOI: 10.1016/j.apen.2021.100062.
4. Ali S., Wintzek P., Zdrallek M. Development of demand factors for electric car charging points for varying charging powers and area types // *IEEE Electricity*. 2022. Vol. 3. Iss. 3. P. 410-441. DOI: 10.3390/electricity3030022.
5. Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., и др. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. Т. 23. № 5. С. 100-114. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. EDN YIGCHH.
6. Cui Q., Weng Y., Tan C.-W. Electric vehicle charging station placement method for urban areas // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019. Vol. 10. Iss. 6. P. 6552-6565.
7. Гвоздев Д.Б., Сафарян А.В., Королев А.А., и др. Принципы интеллектуального управления зарядными станциями для электромобилей // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2022. № S1(24). С. 8-14. EDN XMLXAG.
8. Xiong Y., Gan J., An B., et al. Optimal electric vehicle fast charging station placement based on game theoretical framework // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 19. Iss. 8. P. 2493-2504. Art. no. 8064175. DOI: 10.1109/TITS.2017.2754382.
9. Аргасцев А.Ю., Жданев О.В., Мякочин Ю.О. Развитие производства отечественных зарядных станций для электротранспорта // *Электрические станции*. 2022. № 6(1091). С. 42-53. EDN PHSNFT.
10. Воронин В.А., Непша Ф.С. Управление напряжением в низковольтных распределительных сетях в условиях внедрения домашних зарядных станций электромобилей // *iPolytech Journal*. 2024. Т. 28. № 2. С. 261-271. DOI: 10.21285/1814-3520-2024-2-261-271. EDN ZWSVER.
11. Кудрявцев А.А., Бабушкин М.А. Подстанция малой мощности 110/0,4 кВ как элемент электроснабжения зарядной инфраструктуры // *Энергия единой сети*. 2021. № 1(56). С. 56-59. EDN RTHFSK.
12. Воронин В.А., Непша Ф.С. Мультиагентное моделирование развития электрозарядной инфраструктуры города Кемерово // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. № 3(78). С. 10-17. EDN XVUSOW.
13. Yousuf A.K.M., Wang Z., Paranjape R., et al. An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: A comprehensive review of challenges, mitigation approaches and optimization strategies // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 51570-51589. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3385731.
14. Вострокнутов А.Ю. Электромобили и зарядная инфраструктура // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2023. № 2(77). С. 18-19. EDN YFMIYA.
15. Валеева Ю.С., Калинина М.В., Зорина Т.Г., и др. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 155-172. EDN UCKMFG.

16. Lam A.Y.S., Leung Y.-W., Chu X. Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. Vol. 5. Iss. 6. P. 2846 – 2856. Art. no. 6879337. DOI: 10.1109/TSG.2014.2344684.

17. Zema T., Sulich A., Grzesiak S. Charging stations and electromobility development: A cross-country comparative analysis // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 1. Art. no. 32. DOI: 10.3390/en16010032.

18. Soczówka P., Lasota M., Franke P., et al. Method of determining new locations for electric vehicle charging stations using GIS tools // Energies. 2024. Vol. 17. Iss. 18. Art. no. 4546. DOI: 10.3390/en17184546.

19. Chen L., Chung C.Y., Nie Y., et al. Modeling and optimization of electric vehicle charging load in a parking lot // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2013. Art. no. 6837301. DOI: 10.1109/APPEEC.2013.6837301.

20. Huang J., Zhu C., Liang Q., et al. A step-by-step load forecasting method considering electric vehicle charging stations // 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology. ICPEPET. 2024. P. 1325-1329. DOI: 10.1109/ICPEPET61938.2024.10627620.

21. Грачева Е.И., Наумов О.В., Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 71-77. EDN ZTQXSD.

22. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Актуализация удельных электрических нагрузок дошкольных образовательных и общеобразовательных учреждений // Вестник Чувашского университета. 2021. № 1. С. 134-145. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-1-134-145. EDN RUVYDK.

23. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Актуализация удельных электрических нагрузок многоквартирных жилых домов Москвы и Московской области // Электричество. 2023. № 7. С. 52-65. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. EDN IQAFRE.

24. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Анализ удельных электрических нагрузок коттеджных поселков // Электричество. 2024. № 4. С. 36-50. DOI: 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50.

25. Солуянов Ю.И., Федотов А.И., Ахметшин А.Р., и др. Анализ фактических электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 6. С. 134-147. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147. EDN MBYUSE.

26. Солуянов Ю.И., Ахметшин А.Р., Солуянов В.И. Актуализация удельных электрических нагрузок помещений общественного назначения, встроенных в жилые здания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 3. С. 47-57. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57. EDN LANQDE.

27. Асташев М., Горожанкин П., Красноперов Р., и др. Пункт секционирования заглубленного исполнения с силовыми выключателями для кабельных сетей 6-10 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2024. № S2(33). С. 28-39. EDN CAGVGC.

Авторы публикации

Солуянов Юрий Иванович – д-р техн. наук, заслуженный профессор Казанского государственного энергетического университета, президент ООО «Ассоциация РЭМ», председатель совета директоров АО «ТАТЭМ». *Email: info@roselmon.su.*

Федотов Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета. *ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4235-8038. Email: fed.ai@mail.ru.*

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

Федотов Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» им. В.К. Шибанова Казанского государственного энергетического университета. *Email: evfedotov2008@mail.ru.*

Халтурин Владимир Александрович – начальник управления проектирования АО «ТАТЭМ». *Email: k183om@mail.ru.*

References

1. Butyrin PA, Khalyutin SP. Production of power supply systems for autonomous electric vehicles in Russia. *Elektrichestvo*. 2023;2:13-26. doi: 10.24160/0013-5380-2023-2-13-26. (In Russ).
2. Zhang K, Korovkin NV, Tan M. Analysis of demand for charging of electric vehicles in Lanzhou (China). *Elektrichestvo*. 2024;9:52-59. doi: 10.24160/0013-5380-2024-9-52-59. (In Russ).
3. Gilleran M, Bonnema E, Woods J, et al. Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings. *Applied Energy*. 2021;4:100062. doi: 10.1016/j.apen.2021.100062.
4. Ali S, Wintzek P, Zdrallek M. Development of demand factors for electric car charging points for varying charging powers and area types. *IEEE Electricity*. 2022;3(3):410-441. doi: 10.3390/electricity3030022.
5. Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov AN, et al. Development of technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021; 23(5):100-114. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114. (In Russ).
6. Cui Q, Weng Y, Tan C-W. Electric vehicle charging station placement method for urban areas. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019;10(6):6552-6565.
7. Gvozdev DB, Safaryan AV, Korolev AA, et al. Principles of intelligent control of charging stations for electric vehicles. *Electric power. Transmission and distribution*. 2022;24(S1):8-14. (In Russ).
8. Xiong Y, Gan J, An B, et al. Optimal electric vehicle fast charging station placement based on game theoretical framework. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018;19(8):2493-2504. doi: 10.1109/TITS.2017.2754382.
9. Argastsev AYU, Zhdaneev OV, Myakochin YuO. Development of production of domestic charging stations for electric transport. *Electric stations*. 2022;1091(6):42-53. (In Russ).
10. Voronin VA, Nepsha FS. Voltage control in low-voltage distribution networks in the context of the introduction of home charging stations for electric vehicles. *iPolytech Journal*. 2024;28(2):261-271. doi: 10.21285/1814-3520-2024-2-261-271. (In Russ).
11. Kudryavtsev AA, Babushkin MA. Low-power substation 110/0.4 kV as an element of power supply of charging infrastructure. *Energy of the unified grid*. 2021;56(1):56-59. (In Russ).
12. Voronin VA, Nepsha FS. Multi-agent modeling of the development of electric charging infrastructure of the city of Kemerovo. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2023;78(3):10-17. (In Russ).
13. Yousuf AKM, Wang Z, Paranjape R, et al. An in-depth exploration of electric vehicle charging station infrastructure: A comprehensive review of challenges, mitigation approaches and optimization strategies. *IEEE Access*. 2024;12:51570-51589. doi: 10.1109/ACCESS.2024.3385731.
14. Vostroknutov AYU. Electric vehicles and charging infrastructure. *Electric power. Transmission and distribution*. 2023;77(2):18-19. (In Russ).
15. Valeeva YuS, Kalinina MV, Zorina TG, et al. Stimulating the development of electric transport as a tool for territorial development. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo ehnergeticheskogo universiteta*. 2022;14(1):155-172. (In Russ).
16. Lam AYS, Leung Y-W, Chu X. Electric vehicle charging station placement: Formulation, complexity, and solutions. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014;5(6):2846 – 2856. doi: 10.1109/TSG.2014.2344684.
17. Zema T, Sulich A, Grzesiak S. Charging stations and electromobility development: A cross-country comparative analysis. *Energies*. 2023;16(1):32. doi: 10.3390/en16010032.
18. Soczówka P, Lasota M, Franke P, et al. Method of determining new locations for electric vehicle charging stations using GIS tools. *Energies*. 2024;17(18):4546. doi: 10.3390/en17184546.
19. Chen L, Chung CY, Nie Y, et al. Modeling and optimization of electric vehicle charging load in a parking lot. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. 2013:6837301. doi: 10.1109/APPEEC.2013.6837301.
20. Huang J, Zhu C, Liang Q, et al. A step-by-step load forecasting method considering electric vehicle charging stations. *3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology. ICEPET*. 2024:1325-1329. doi: 10.1109/ICEPET61938.2024.10627620.
21. Gracheva EI, Naumov OV, Fedotov EA. Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2017;19(7-8):71-77. (In Russ).
22. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Updating the specific electrical loads of preschool educational and general educational institutions. *Bulletin of the Chuvash University*. 2021;1:134-145. doi: 10.47026/1810-1909-2021-1-134-145. (In Russ).
23. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Updating the specific electrical loads of apartment buildings in Moscow and the Moscow region. *Electricity*. 2023;7:52-65. doi: 10.24160/0013-5380-2023-7-52-65. (In Russ).

24. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Analysis of specific electrical loads of cottage villages. *Electricity*. 2024;4:36-50. doi: 10.24160/0013-5380-2024-4-36-50. (In Russ).

25. Soluyanov YuI, Fedotov AI, Akhmetshin AR, et al. Analysis of actual electrical loads of public spaces built into residential buildings. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(6):134-147. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-134-147. (In Russ).

26. Soluyanov YuI, Akhmetshin AR, Soluyanov VI. Updating the specific electrical loads of public spaces built into residential buildings. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2021;23(3):47-57. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-3-47-57. (In Russ).

27. Astashev M, Gorozhankin P, Krasnoperov R, et al. Recessed sectioning point with power switches for 6-10 kV cable networks. *Electric Power. Transmission and Distribution*. 2024;33(S2):28-39. (In Russ).

Authors of the publication

Yuri I. Soluyanov – LLC "Association REM", Kazan, Russia. *Email: info@roselmon.su.*

Alexander I. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4235-8038>. Email: fed.ai@mail.ru.*

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

Eugenii A. Fedotov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *Email: evfedotov2008@mail.ru.*

Vladimir A. Khalturin – JSC "TATEM", Kazan, Russia. *Email: k183om@mail.ru.*

Шифр научной специальности: 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Получено **25.10.2024 г.**

Отредактировано **25.11.2024 г.**

Принято **29.11.2024 г.**



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ ШЕСТИФАЗНОЙ ЛЭП НА ТРУБОПРОВОДЫ

Крюков А.В.^{1,2}, Суслов К.В.^{2,3}, Крюков А.Е.²

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия
dr.souslov@yandex.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка цифровых моделей для вычисления наведенных напряжений на трубопроводе, создаваемых шестифазной линией электропередачи в нормальном и аварийных режимах работы. *МЕТОДЫ.* Исследования проводились на компьютерной модели электрической сети, имеющей в своем составе линию данного типа. Для ее формирования использовался подход, базирующийся на применении фазных координат. Моделирование осуществлялось на основе программного комплекса Fazonord, версия 5.3.5.3-2024. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Рассматривались следующие режимы работы мультифазной ЛЭП 220 кВ: симметричный и неполнофазный при нагрузках на приемном конце $300 + j150$ МВ·А; одно- и двухфазные короткие замыкания (КЗ), а также 2-х фазное КЗ на землю. Для сравнения проведено моделирование ЛЭП типового исполнения. Полученные результаты дали возможность сделать следующие выводы: в симметричном нагрузочном режиме 6-ти фазная линия создает в отдельных точках трубы наведенные напряжения, более чем в три раза превышающие аналогичные параметры для ЛЭП традиционной конструкции; однако их величины не превышают допустимого уровня в 60 В; для КЗ максимумы потенциалов на трубе в рассматриваемых ЛЭП различаются незначительно; при отключении одной фазы их уровни при шестифазной ЛЭП выходят за допустимый предел, а в трехфазной линии не превышают 60 В. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Применяемый подход отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации; разработанные модели могут быть востребованы в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП шестифазного исполнения и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала.

Ключевые слова: шестифазные ЛЭП; наведенные напряжения на деталях магистрального трубопровода; моделирование.

Для цитирования: Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е. Моделирование электромагнитных влияний шестифазной ЛЭП на трубопроводы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 108-120. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-108-120.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC EFFECTS OF SIX-PHASE POWER LINES ON PIPELINES

Kryukov A.V.^{1,2}, Suslov K.V.^{2,3}, Kryukov A.E.²

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

³National Research University "MEI", Moscow, Russia
dr.souslov@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of digital models for calculating induced voltages on a pipeline created by a six-phase power transmission line in normal and emergency operating

modes. METHODS. The studies were conducted on a computer model of an electrical network that includes a line of this type. Its formation involved an approach based on the use of phase coordinates. The modeling was carried out using the Fazonord software package, version 5.3.5.3-2024. RESULTS. The following operating modes of a 220 kV multiphase power transmission line were considered: symmetrical and open-phase with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase; single-phase, two-phase short circuits, as well as a two-phase ground fault. For comparison, the modes of a two-circuit three-phase power transmission line were modeled. The obtained results allowed us to draw the following conclusions: in a symmetrical load mode, a six-phase line creates induced voltages at certain points of the pipe that are more than three times greater than similar parameters for a three-phase power transmission line; however, the values of induced potentials do not exceed the permissible level of 60 V; in short-circuit modes, the maximum induced voltages in the transmission lines under consideration differ insignificantly; when one phase is disconnected, the induced voltages in a six-phase power transmission line go beyond the permissible limit, and in a three-phase line they do not exceed 60 V. CONCLUSION. The applied approach is distinguished by its universality and can be used to determine modes in networks of various configurations; the developed models can be used in the practice of designing sections of joint passage of promising six-phase power transmission lines and pipelines when developing measures to ensure the safe operation of service personnel.

Keywords: *six-phase power transmission lines; induced voltages on parts of the main pipeline; modeling.*

For citation: Kryukov A.V., Suslov K.V., Kryukov A.E. Modeling of electromagnetic effects of six-phase power lines on pipelines. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 108-120. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-108-120.

Введение. Литературный обзор (Introduction. Literature Review)

Для реализации эффективных преобразователей переменного тока в постоянный применяются многофазные трансформаторные агрегаты [1]. На их основе разработаны мультифазные линии электропередачи [2-7], обладающие рядом преимуществ перед ЛЭП трехфазного типа. К их числу можно отнести:

- повышенная пропускная способность;
- уменьшенные потери энергии и несимметрия токов проводов;
- пониженные радиоизлучения, шум и др.

Недостаток линий многофазной конструкции состоит в повышенных затратах на преобразовательное оборудование.

Актуальность проблемы изучения мультифазных ЛЭП подтверждается большим числом зарубежных публикаций по данной тематике. Так, например, задача определения места повреждения шестифазных ЛЭП (ШФ ЛЭП) на основе вейвлет-преобразования высокочастотных переходных процессов, вызванных аварией, решена в [8]. Анализ неисправностей в ШФ ЛЭП проведен в [9]. Расширенная модель мультифазной ЛЭП представлена в [10]. Вопросы реализации защиты ШФ ЛЭП с использованием математической морфологии рассмотрены в [11]. Анализ динамической устойчивости ЭЭС с ШФ ЛЭП выполнен в [12]. Методика обнаружения и классификации нештатных ситуаций в ШФ ЛЭП на основе рекуррентной нейронной сети, способной обучаться долгосрочным зависимостям, описана в [13]. Метод распознавания повреждений ШФ ЛЭП на основе вейвлет-преобразования предложен в [14]. Алгоритм определения наведенных напряжений на объектах под ШФ ЛЭП описан в [15]. Крутильные моменты валов генератора из-за аварий ШФ ЛЭП рассмотрены в [16, 17]. Однотерминальная релейная защита (РЗ) ШФ ЛЭП предложена в [18]. Вопросы поиска неисправностей в ШФ ЛЭП с использованием нечеткой логики рассмотрены в [19, 20]. Исследование шестифазной линии электропередачи, использующей автотрансформаторное преобразование, проведено в [21]. Защита ШФ ЛЭП от перегрузки по току с помощью цифрового реле предложена в [22]. Комбинированная РЗ ШФ ЛЭП на основе S -преобразования рассмотрена в [23]. Обзор применения вейвлетов для РЗ ШФ ЛЭП представлен в [24]. Дистанционная защита для ШФ ЛЭП на основе высокочастотных переходных процессов предложена в [25]. Логическая схема резервной РЗ ШФ ЛЭП с использованием токов обратной последовательности описана в [26]. Результаты сравнительного исследования схем автоматического повторного включения ШФ ЛЭП приведены в [27].

Анализ проанализированных выше публикаций позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрен целый ряд важных аспектов, связанных с изучением мультифазных систем для транспорта электроэнергии; при этом основным объектом исследования является шестифазная линия, которая может быть реализована на основе двухцепной ЛЭП, значительная часть работ посвящена решению задач формирования релейной защиты и автоматики ШФ ЛЭП, актуальной и малоизученной проблеме определения наведенных напряжений, вызванных электромагнитным влиянием (ЭМВ) ШФ ЛЭП на смежные линии, посвящена только одна работа [15].

Ниже представлены результаты разработки цифровых моделей для определения ЭМВ ШФ ЛЭП на заземленные металлические конструкции. Актуальность этой проблемы подтверждается тем, что на многих участках трассы ЛЭП и магистральных трубопроводов проходят в одних коридорах. В среднесрочной перспективе можно ожидать, что на некоторых из них будут применяться мультифазные линии. Для решения задачи расчета ЭМВ ШФ ЛЭП на трубопроводы можно эффективно использовать подход, базирующийся на применении фазных координат [28-30].

Методика и результаты моделирования (Methods and results)

Для решения сформулированной выше задачи применялись методы определения режимов ЭЭС, базирующиеся на использовании фазных координат [28–30]. На этой базе разработан промышленный комплекс программ Fazonord, позволяющий формировать модели, адекватно описывающие реальные режимы ЭЭС, характеризующиеся наличием несимметрии и гармонических искажений. Для представления силовых элементов ЭЭС, к которым относятся линии электропередачи и трансформаторы, используются решетчатые схемы замещения (РСЗ) в виде наборов ветвей с проводимостями $g_{ik} + jb_{ik}$, которые соединяются так, чтобы образовывались полные графы, т. е.

$$PCZ : NOD \cup BRANC, \forall i, k \subset NOD \rightarrow branc_{i,k} \subset BRANC,$$

где NOD , $BRANC$ – соответственно, множества узлов и ветвей.

Матрица проводимостей ЛЭП может быть представлена так [29]:

$$\underline{Y}_C = \underline{Y}_{PC} + j\omega \underline{C}_Y,$$

где $\underline{Y}_{PC} = -\underline{M}_0 \underline{Z}^{-1} \underline{M}_0^T$; $\underline{M}_0 = \begin{bmatrix} \underline{E}_r \\ -\underline{E}_r \end{bmatrix}$; $\underline{C}_Y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \underline{B} & 0 \\ 0 & \underline{B} \end{bmatrix}$; $\underline{D} = \underline{Z}^{-1}$; \underline{Z} , \underline{E}_r , \underline{A} – соответственно, матрицы сопротивлений, единичная и потенциальных коэффициентов; $\omega = 314$ рад/с $\underline{B} = \underline{A}^{-1}$.

Аналогичное соотношение для трансформаторов записывается следующим образом:

$$\underline{Y}_{PC} = -\underline{M}_0 \underline{Z}_E^{-1} \underline{M}_0^T,$$

где $\underline{Z}_E = \underline{Z} - j\omega \underline{W}_1 \underline{R}_M^{-1} \underline{W}_2$; \underline{Z} , \underline{R}_M , \underline{W}_1 , \underline{W}_2 – соответственно, матрицы электрических и магнитных сопротивлений, а также чисел витков обмоток.

Наряду с типовыми сетями трехфазного исполнения возможно моделирование сетей, включающих участки с числом фаз, меньшим или большим трех, например, 2-х, 4-х и 6-ти фазные. В текущей версии 5.3.6.0 комплекса Fazonord реализована возможность моделирования ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД), содержащих сегменты переменного и постоянного тока с подробным представлением выпрямителей и инверторов.

При расчетах ЭЭС или СЭЖД, имеющих заземленные токоведущие части, например рельсы или трубопроводы, необходимо учитывать распределенность параметров, поскольку длина волны электромагнитного поля для такого элемента значительно меньше аналогичного показателя для воздуха. Учет осуществляется путем формирования цепочечной схемы, включающей многополюсники, моделирующие короткие участки.

Метод фазных координат (МФК) имеет преимущества по сравнению с методом симметричных составляющих (МСС), особенно при моделировании и анализе сложных ЭЭС и СЭЖД:

- он позволяет напрямую рассматривать ЭЭС или СЭЖД с несимметричными элементами или нагрузками без необходимости преобразования к симметричным составляющим.

- фазные координаты наиболее полно отвечают физической сущности моделируемого объекта, что упрощает понимание и интерпретацию режимов его работы и помогает визуализировать результаты расчетов.

- в сложных ЭЭС и СЭЖД с многократными несимметриями использование МСС может быть затруднено из-за необходимости стыковки схем различных последовательностей; МФК не имеет такого ограничения.

- работа в фазных координатах позволяет пользователю легко вносить изменения и модификации в модели ЭЭС и СЭЖД.

Проверка адекватности предложенных в [28] методов и алгоритмов основывалась на сопоставлении с аналитическими вычислениями, а также с расчетами по известным программам, прошедшим масштабную проверку. Расхождения составили доли процента по уровням напряжений в узлах. Кроме того, проводилось сравнение с результатами натурных экспериментов в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции Забайкальской железной дороги и Байкало-Амурской магистрали (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Сопоставление расчетов и измерений фазных напряжений
Comparison of calculations and measurements of phase voltages

Фаза	Подстанция	Измерение	Расчет	Различие, %
A	ТП 1	139,7	138,2	1,1
B		140,0	140,1	-0,1
C		139,9	139,9	0,0
A	ТП 2	137,3	137,8	-0,4
B		137,6	138,4	-0,6
C		138,0	139,8	-1,3
A	ТП 3	137,2	138,0	-0,6
B		136,7	138,6	-1,4
C		135,6	138,6	-2,2

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

Перечень рассматриваемых элементов ЭЭС и СЭЖД представлен в таблице 2, а описание задач моделирования с указанием направлений практического использования результатов – в таблице 3.

Таблица 2
Table 2

Перечень моделируемых элементов ЭЭС и СЭЖД

№	Наименование элемента	Особенности исполнения
1	Воздушные линии (ВЛ) электропередачи	Типовая конструкция, компактные повышенной пропускной способности, мультифазные, многоцепные, управляемые самокомпенсирующиеся, использующие землю в качестве обратного провода, с заземленной фазой
2	Кабельные линии (КЛ)	Типовой конструкции, с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена, криогенные
3	Токопроводы	Жесткие и гибкие высокого напряжения, газонезащищенные ЛЭП, магистральные и распределительные шинопроводы 0,4 кВ
4	Силовые трансформаторы	Типовой конструкции, многообмоточные, симметрирующие, преобразовательные, вольтодобавочные
5	Измерительные преобразователи	Трансформаторы тока и напряжения
6	Элементы smart grid и киберфизических систем электроснабжения	Активные фильтры и кондиционеры гармоник, вольтодобавочные и кросс-трансформаторы, управляемые источники реактивной мощности, фазоповоротные устройства, накопители энергии
7	Возобновляемые источники энергии	Мини- и микроГЭС, ветрогенераторы и ветропарки, солнечные электростанции, установки инверторной генерации

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

Таблица 3

Список решаемых задач

№	Задача	Объект моделирования	Направления практического использования результатов
1	Определение нормальных, сложносимметричных, несинусоидальных и предельных по статической устойчивости режимов	ЭЭС, СЭЖД	Расчет нагрузочной способности сетей, показателей энергоэффективности и качества электроэнергии
2	Расчет напряженностей	ЭЭС,	Оценка электромагнитной

	электромагнитных полей, создаваемых ВЛ, КЛ, токопроводами и тяговыми сетями	СЭЖД	безопасности и разработка мероприятий по улучшению ее условий
3	Вычисление наведенных напряжений на линиях электропередачи, связи и трубопроводах	ЭЭС, СЭЖД	Разработка методов и средств повышения безопасности персонала, а также устройств защиты подземных сооружений от коррозии
4	Моделирование режимов плавки гололеда на проводах ЛЭП и тяговых сетей	ЭЭС, СЭЖД	Повышение эффективности средств борьбы с гололедными отложениями
5	Параметрическая идентификация	ЭЭС, СЭЖД	Определение фактических параметров ЛЭП, трансформаторов и контактных сетей
6	Определение тепловых режимов проводов и трансформаторов	ЭЭС, СЭЖД	Расчет температур нагрева токоведущих частей и трансформаторов, выбор рациональных режимов работы, оценка допустимости перегрузок
7	Имитационное моделирование тяговых и внешних сетей железных дорог переменного и постоянного тока	СЭЖД	Определение нагрузочной способности по системе электроснабжения, формирование рациональных графиков движения поездов

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

В рамках рассматриваемой в данной статье проблемы следует подчеркнуть еще одну отличительную особенность методики, реализованной в комплексе Fazonord. Она состоит в высокой точности расчета электромагнитных влияний в ближней, дальней и промежуточной зонах интеграла Карсона [31]; при этом для первых двух зон применяются апробированные аппроксимирующие формулы, а в промежуточной – интеграл вычисляется путем разложения в ряд:

$$E_{ik} = 0,5 - \ln(\lambda r) - j \frac{\pi}{4} - \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{(r/2)^{2n}}{n!(n+1)!} \left[\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) + j \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \right] \times$$

$$\times \left[\ln(\lambda r) - m_n \right] \cos(2n\theta) - \theta \sin(2n\theta) + j \frac{\pi}{4} \cos(2n\theta) -$$

$$- 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{r^{2n-1} \cos[(2n-1)\theta]}{1^2 \cdot 3^2 \cdot \dots \cdot (2n-1)^2 \cdot (2n+1)} \left\{ \cos\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] + j \sin\left[\frac{(2n-1)\pi}{4}\right] \right\},$$

где $m_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n+1} - \frac{1}{2(n+1)}$; $r = r_{ik} \cdot \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}} = 2,8099 \cdot 10^{-3} \cdot r_{ik} \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}$; f – частота, Гц;

$r_{ik}' = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i + y_k)^2}$; ρ – сопротивление грунта, Ом·м; $\lambda = 0,890536209$;

$\theta = \arctg \frac{|x_i - x_k|}{y_i + y_k}$; $(x_i, y_i), (x_k, y_k)$ – координаты токоведущих частей, м.

Расчеты проводилось на основе программного комплекса Fazonord, версия 5.3.6.0-2024 применительно к схеме 6-тифазной ЛЭП, показанной на рисунке 1. Предполагалась, что параллельно ЛЭП проложен стальной трубопровод с диаметром трубы в 250 мм. По краям сооружения подключались стационарные заземлители с сопротивлением растеканию в один Ом. Кроме того, учитывалось распределенное заземление трубы в 0,05 См/км.

Результаты моделирования представлены на рис. 4 –10. Для сравнения проведено определение режимов двухцепной ЛЭП трехфазной конструкции.

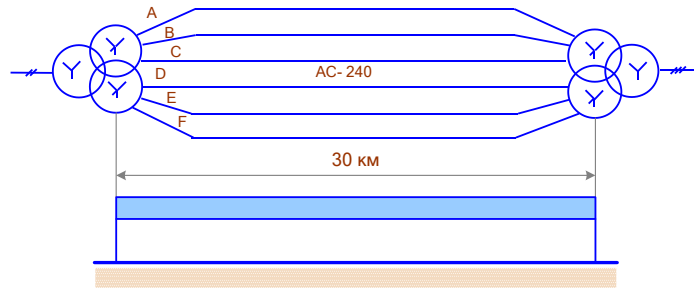


Рис. 1. Схемы шестифазной ЛЭП

Fig. 1. Six-phase power transmission line diagrams

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

На рисунке 2 показаны зависимости наведенных напряжений от координаты x : $U=U(x)$ для симметричного нагрузочного режима ШФ ЛЭП.

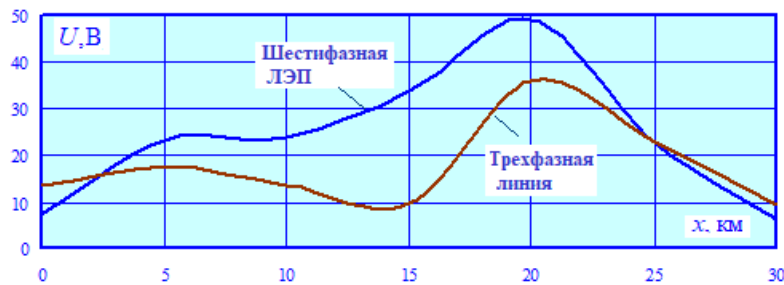


Рис. 2. Наведенные напряжения в симметричном режиме при нагрузках на приемном конце $100 + j50$ МВ·А на фазу: x – координата оси параллельной трассе ЛЭП

Fig. 2. Induced voltages in symmetrical mode with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase: x is the coordinate of the axis parallel to the transmission line route

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

На рисунке 3 представлены результаты расчета $U=U(x)$ для режимов двухфазного короткого замыкания (КЗ) ШФ ЛЭП в отдельных точках линии. На рисунке 4а приведены графики, иллюстрирующие различия в уровнях наведенных напряжений для ШФ ЛЭП и двухцепной линии трехфазного типа. На рисунке 4б показаны зависимости максимальных значений этих параметров от координаты x .

На рисунках 5, 6 представлены аналогичные диаграммы для двухфазного КЗ на землю, а на рисунках 7, 8 – для однофазного КЗ. На рисунке 9 приведены графики для режима обрыва одной фазы ШФ ЛЭП.

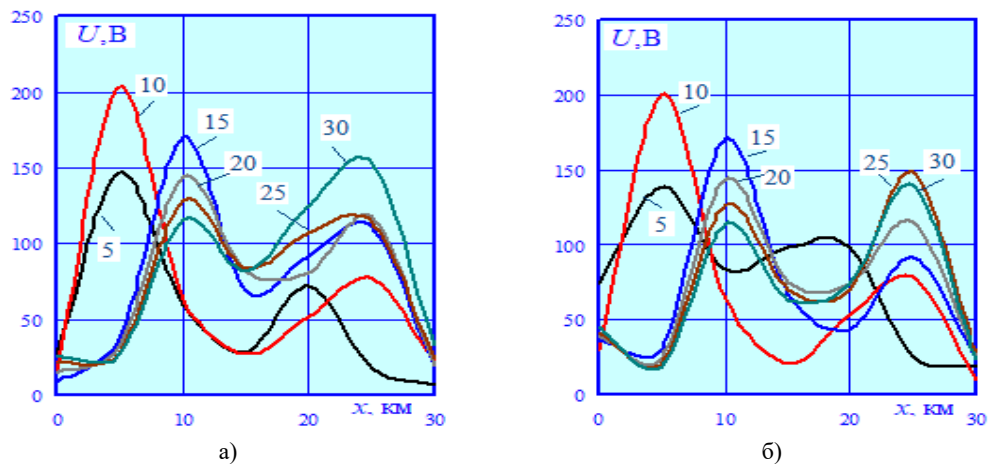
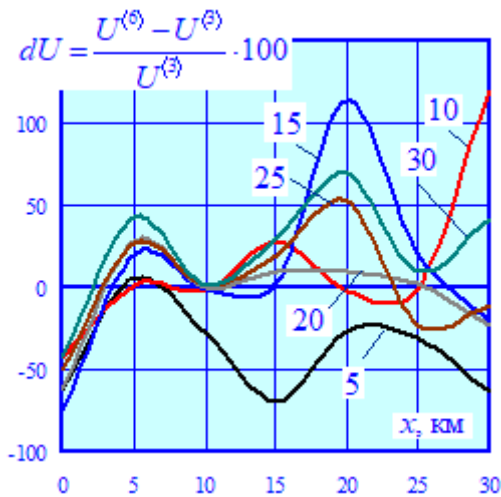


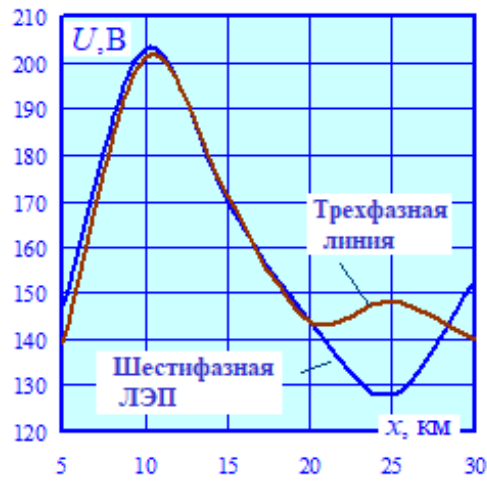
Рис. 3. Наведенные напряжения при двухфазном КЗ: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{КЗ}$ места КЗ

Fig. 3. Induced voltages during a two-phase short circuit: а – six-phase power transmission line; б – three-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{КЗ}$ of the short circuit location

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



а)



б)

Рис. 4. Различия в уровнях наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при двухфазном КЗ: $U^{(6)}$ – напряжения, наведенные шестифазной ЛЭП; $U^{(3)}$ – то же для трехфазной линии

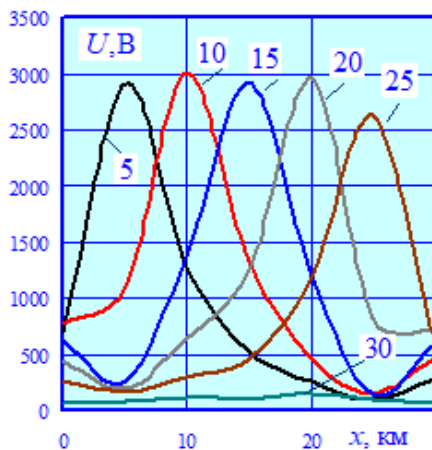
Fig. 4. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maxima (b) during a two-phase short circuit: $U^{(6)}$ – voltages induced by a six-phase power line; $U^{(3)}$ – the same for a three-phase line

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

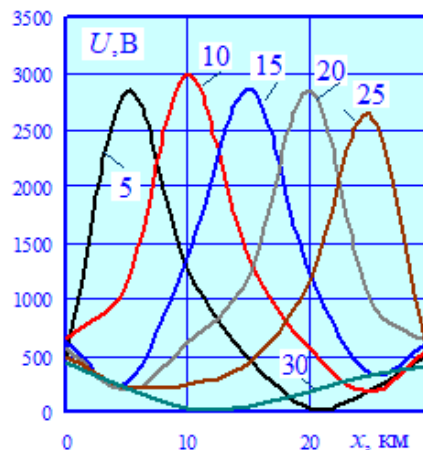
Сравнение максимумов наведенных напряжений при различных видах КЗ на шестифазной ЛЭП проиллюстрировано на рисунке 10.

Анализ представленных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- в симметричном нагрузочном режиме ШФ ЛЭП создает в отдельных точках трубы наведенные напряжения U , в три раза большие аналогичных параметров для трехфазной ЛЭП; однако величины потенциалов не превышают допустимого уровня в 60 В (рис. 3);
- в режимах КЗ максимумы U в рассматриваемых ЛЭП достаточно близки; однако их величины в отдельных точках трубы для ШФ ЛЭП и линии трехфазного типа могут существенно различаться (рис. 4а, 6а, 8а);
- при отключении фазы значения U при ШФ ЛЭП выходят за допустимый предел, а в трехфазной линии незначительно превышают 60 В для одной точки (рис. 8);
- наибольшие уровни потенциалов, достигающие 3,5 кВ, наблюдаются в режиме однофазного КЗ; при двухфазном КЗ на землю максимальная величина U составляет 3 кВ (рис. 9).



а)

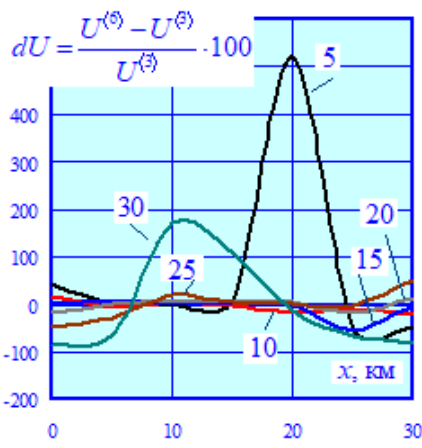


б)

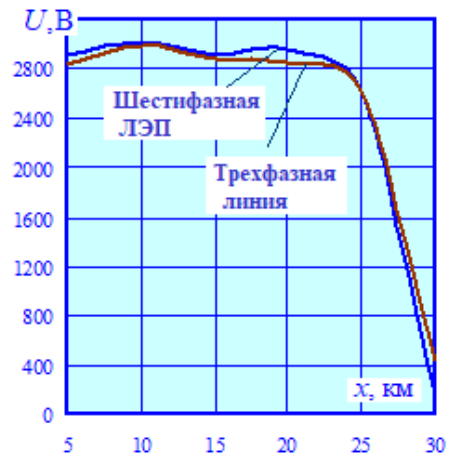
Рис. 5. Наведенные напряжения при двухфазном КЗ на землю: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{кз}$ места КЗ

Fig. 5. Induced voltages during a two-phase short circuit to earth: a – six-phase power transmission line; b – three-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{кз}$ of the short circuit location

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



а)

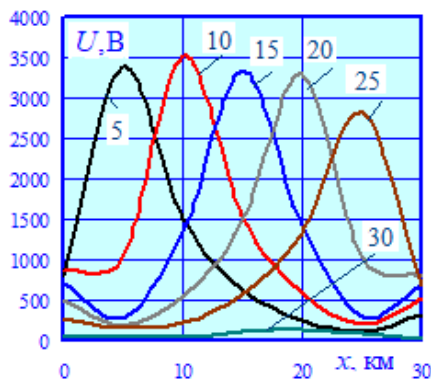


б)

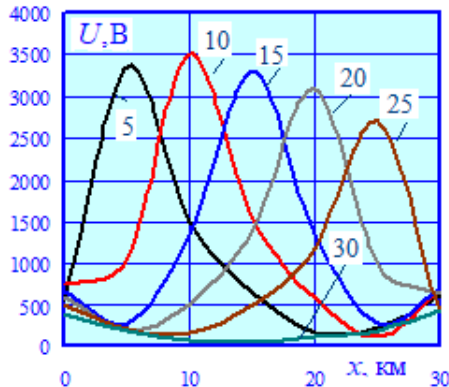
Рис. 6. Различия в уровне наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при двухфазном КЗ на землю

Fig. 6. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maximums (b) during a two-phase short circuit to ground

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



а)

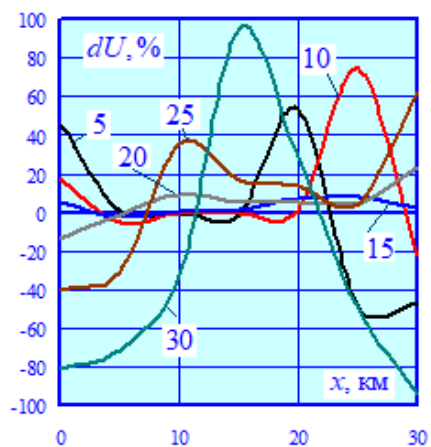


б)

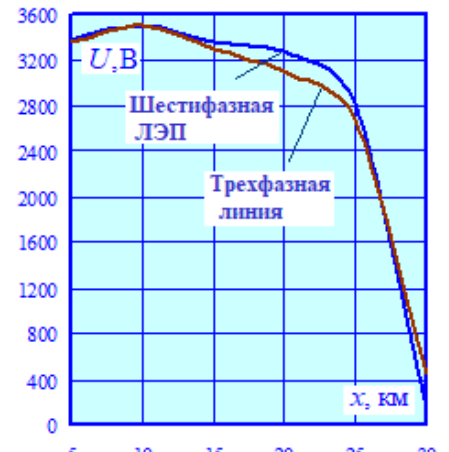
Рис. 7. Наведенные напряжения при однофазном КЗ: а – шестифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная линия; цифрами обозначены координаты $x_{КЗ}$ места КЗ

Fig. 7. Induced voltages during a single-phase short circuit: а – 6-phase power transmission line; б – 3-phase double-circuit line; the numbers indicate the coordinates $x_{КЗ}$ of the short circuit location

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



а)



б)

Рис. 8. Различия в уровне наведенных напряжений в отдельных точках трубы (а) и их максимумы (б) при однофазном КЗ

Fig. 8. Differences in the level of induced voltages at individual points of the pipe (a) and their maximums (b) during a single-phase short circuit

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

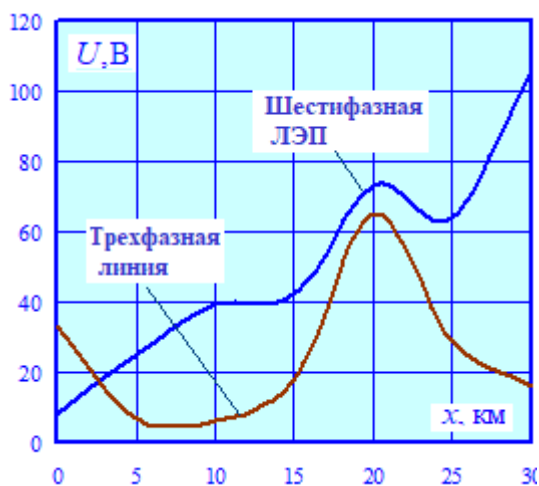


Рис. 9. Наведенные напряжения в неполнофазном режиме при нагрузках на приемном конце $100 + j50$ МВ·А на фазу

Fig. 9. Induced voltages in open-phase mode with loads at the receiving end of $100 + j50$ MVA per phase

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

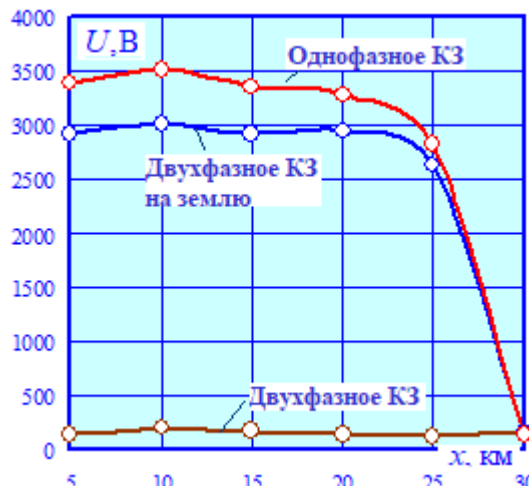


Рис. 10. Сравнение максимумов наведенных напряжений при различных видах КЗ на шестифазной ЛЭП

Fig. 10. Comparison of induced voltage maxima for different types of short circuits on a six-phase power transmission line

Заклучение (Conclusions)

Применяемый подход к расчету наведенных напряжений отличается универсальностью и может использоваться для определения режимов в сетях различной конфигурации; представленные в статье модели могут быть полезными в практике проектирования участков совместного прохождения перспективных ЛЭП шестифазной конструкции и трубопроводов при планировании мероприятий по обеспечению безопасной работы обслуживающего персонала.

Научная новизна представленных результатов состоит в использовании оригинальных алгоритмов определения электромагнитных влияний ШФ ЛЭП на трубопроводы [30], базирующейся на применении фазных координат. Методика распространяется на мультифазные ЛЭП других конструкций, например, четырех-, девяти-, двенадцатифазных и др. [29].

Литература

1. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками / Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Т. 22. № 6. 2020. С. 3-15.
2. Гершенгорн А. И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. № 8. 1994. С. 67-70.
3. Королев А.Н., Куликов К.В., Коротков В.В. Особенности построения многофазных ЛЭП // Повышение эффективности работы энергосистем. Иваново, 2001. С. 108-111.
4. Сулов В.М. Определение матрицы обобщенных параметров несимметричной многофазной линий электропередачи // Проблемы региональной энергетики. № 1. 2005. С. 74-77.
5. Самородов Г. И. Четырехфазные электропередачи. // Известия РАН «Энергетика». № 6. 1995. С. 101–108.
6. Москалев Ю.В. Повышение эффективности транспорта электроэнергии с использованием трансформаторного преобразователя числа фаз и многофазной линии электропередачи // Проблемы машиноведения. Материалы VII Международной научно-технической конференции. Омск, 2023. С. 13-18.
7. Москалев Ю.В. Моделирование работы трехфазно-многофазного трансформаторного преобразователя числа фаз с линейной симметричной нагрузкой // Динамика систем, механизмов и машин. Т. 10. № 1. 2022. С. 65-69.
8. Ammar A. Hajjar, M. M. Mansour. Fault location for Six-Phase Transmission Lines based on the wavelet transform of the fault induced high frequency transients. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. Publisher: IEEE.
9. M.W. Mustafa, M.R. Ahmad, H. Shareef. Fault analysis on double three-phase to six-phase converted transmission line. 2005 International Power Engineering Conference. 2005. Publisher: IEEE.

10. Hussein Ahmad, M. I. Jambak. Advanced laboratory scale model of high phase conversion power transmission line. 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. 2008. Publisher: IEEE.
11. Gaurav Kapoor. Six Phase Transmission Line Boundary Protection Using Mathematical Morphology. 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2018. Publisher: IEEE.
12. M. W. Mustafa, M. R. Ahmad. Transient Stability Analysis of Power System with Six-Phase Converted Transmission Line. 2006 IEEE International Power and Energy Conference. 2006. Publisher: IEEE.
13. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Gosh. LSTM Classifier Based Fault Detection and Classification Scheme for 1-Open Conductor Faults in Six-Phase Transmission Line. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). 2024. Publisher: IEEE.
14. Gaurav Kapoor, Rabindra Nath Shaw. SWT-Based Fault Recognition Technique for Six-Phase Transmission System. 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2020 Publisher: IEEE.
15. M.A.B Sidik, H. Ahmad, Z.A. Malek, Z. Buntat, N. Bashir, M.I.A. Zarin, M.A.B Sidik, Z. Nawawi, M.I. Jambak. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference. 2011. Publisher: IEEE.
16. Jong-Ian Tsai, Rong-Ching Wu, Tung-Sheng Zhan, Ting-Chia Ou, Wen-Yang Li, Yong-Nong Chang. Turbine-generator blade and shaft torsional torques due to line faults in six-phase transmission systems evolved from three-phase double-circuit line systems. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. Publisher: IEEE.
17. S.O. Faried, S. Al-Senaidi, S. Upadhyay. Impact of fault clearing and high-speed reclosing of six phase transmission line faults on turbine-generator shaft torsional torques. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502). 2001. Publisher: IEEE.
18. Gaurav Kapoor, Anamika Yadav. A Single-Terminal Hybrid Scheme for Six-Phase Transmission Line Protection. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). 2020. Publisher: IEEE.
19. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Fuzzy Logic based Fault Detection and Classification scheme for Series Faults in Six Phase Transmission Line. 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2021. Publisher: IEEE.
20. Maneesh Verma, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Application of Fuzzy Logic for Fault Detection and Classification in Six Phase Transmission Line. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). 2017. Publisher: IEEE.
21. Tuan Mohd Ikhwan Bin Tuan Yacob, Zuhaina Binti Zakaria, Noraliza Binti Hamzah. Study of six phase transmission line using the autotransformer conversion. 2011 IEEE Student Conference on Research and Development. 2011. Publisher: IEEE.
22. Shanker Warathe, R N Patel. Six-phase transmission line over current protection by numerical relay. 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2015. Publisher: IEEE.
23. Sunil Kumar Shukla, Murli Manohar, Chintan Patel, Tarun Tailor, Arun Rathore. A Combined S-transform and Ensemble of DT based Protection scheme for six-phase transmission line. 2023 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). 2023. Publisher: IEEE.
24. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Tallat. Wavelets for six-phase transmission lines relaying: fault classification and phase selection. 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.02CH37379). 2002. Publisher: IEEE.
25. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Talaat, S.O. Faried. Distance protection for six-phase transmission lines based on fault induced high frequency transients and wavelets. IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373). 2002. Publisher: IEEE.
26. G. Chandra Sekhar. A complete logic-based backup protection scheme for three and six phase transmission system by using negative sequence currents. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. Publisher: IEEE.
27. V. Salehi, M. Jaefary, H. Lesani, E. Mostery. A comparative study of tripping and reclosing schemes for six-phase transmission line considering transient stability. 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. 2009. Publisher: IEEE.
28. Закарюкин В. П., Крюков А. В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с.
29. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Тхао Ван Лэ. Комплексное моделирование мультифазных, многоцепных и компактных линий электропередачи. Иркутск : ИрГУПС, 2020. 296 с.

30. Крюков А. В., Черепанов А. В., Крюков А. Е. Моделирование электромагнитных влияний линий электропередачи и тяговых сетей на протяженные металлические конструкции. Иркутск : ИрГУПС, 2022. 188 с.

31. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

Авторы публикации

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета.

Суслов Константин Витальевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии Национального исследовательского университета «МЭИ»; профессор кафедры электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета. E-mail: *dr.souslov@yandex.ru*.

Крюков Александр Егорович – ассистент кафедры электрических станций Иркутского национального исследовательского технического университета.

References

1. Power Factor Correction in Power Supply Systems with Multiphase Nonlinear Loads / Egorov D.E., Dovgun V.P., Boyarskaya N.P. [et al.] // News of Higher Educational Institutions. Problems of Power Engineering. Vol. 22. No. 6. 2020. Pp. 3-15.
2. Gershengorn A.I. Multiphase High and Ultra-High Voltage Power Transmission Lines // Electric Power Stations. No. 8. 1994. Pp. 67-70.
3. Korolev A.N., Kulikov K.V., Korotkov V.V. Features of the Construction of Multiphase Power Transmission Lines // Improving the Efficiency of Power Systems. Ivanovo, 2001. Pp. 108-111.
4. Suslov V.M. Definition of the Matrix of Generalized Parameters of an Asymmetrical Multiphase Power Transmission Line // Problems of Regional Power Engineering. № 1. 2005. P. 74-77.
5. Samorodov G. I. Four-phase power transmission. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences "Power Engineering". № 6. 1995. Pp. 101–108.
6. Moskalov Yu. V. Increasing the efficiency of electric power transportation using a transformer phase converter and a multi-phase power transmission line // Problems of Mechanical Engineering. Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference. Omsk, 2023. P. 13-18.
7. Moskalov Yu. V. Modeling the operation of a three-phase-multiphase transformer phase converter with a linear symmetrical load // Dynamics of systems, mechanisms and machines. Vol. 10. № 1. 2022. P. 65-69.
8. Ammar A. Hajjar, M. M. Mansour. Fault location for Six-Phase Transmission Lines based on the wavelet transform of the fault induced high frequency transients. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference. 2007. Publisher: IEEE.
9. M.W. Mustafa, M.R. Ahmad, H. Shareef. Fault analysis on double three-phase to six-phase converted transmission line. 2005 International Power Engineering Conference. 2005. Publisher: IEEE.
10. Hussein Ahmad, M. I. Jambak. Advanced laboratory scale model of high phase conversion power transmission line. 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference. 2008. Publisher: IEEE.
11. Gaurav Kapoor. Six Phase Transmission Line Boundary Protection Using Mathematical Morphology. 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2018. Publisher: IEEE.
12. M. W. Mustafa, M. R. Ahmad. Transient Stability Analysis of Power System with Six-Phase Converted Transmission Line. 2006 IEEE International Power and Energy Conference. 2006. Publisher: IEEE.
13. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Gosh. LSTM Classifier Based Fault Detection and Classification Scheme for 1-Open Conductor Faults in Six-Phase Transmission Line. 2024 Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies (ICPC2T). 2024. Publisher: IEEE.

14. Gaurav Kapoor, Rabindra Nath Shaw. SWT-Based Fault Recognition Technique for Six-Phase Transmission System. 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). 2020 Publisher: IEEE.
15. M.A.B Sidik, H. Ahmad, Z.A. Malek, Z. Buntat, N. Bashir, M.I.A. Zarin, M.A.B Sidik, Z. Nawawi, M.I. Jambak. Induced voltage on objects under six-phase transmission line. TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference. 2011. Publisher: IEEE.
16. Jong-Ian Tsai, Rong-Ching Wu, Tung-Sheng Zhan, Ting-Chia Ou, Wen-Yang Li, Yong-Nong Chang. Turbine-generator blade and shaft torsional torques due to line faults in six-phase transmission systems evolved from three-phase double-circuit line systems. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2009. Publisher: IEEE.
17. S.O. Faried, S. Al-Senaidi, S. Upadhyay. Impact of fault clearing and high-speed reclosing of six phase transmission line faults on turbine-generator shaft torsional torques. 2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502). 2001. Publisher: IEEE.
18. Gaurav Kapoor, Anamika Yadav. A Single-Terminal Hybrid Scheme for Six-Phase Transmission Line Protection. 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). 2020. Publisher: IEEE.
19. Tirupathi Rao Althi, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Fuzzy Logic based Fault Detection and Classification scheme for Series Faults in Six Phase Transmission Line. 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES). 2021. Publisher: IEEE.
20. Maneesh Verma, Ebha Koley, Subhojit Ghosh. Application of Fuzzy Logic for Fault Detection and Classification in Six Phase Transmission Line. 2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC). 2017. Publisher: IEEE.
21. Tuan Mohd Ikhwan Bin Tuan Yacob, Zuhaina Binti Zakaria, Noraliza Binti Hamzah. Study of six phase transmission line using the autotransformer conversion. 2011 IEEE Student Conference on Research and Development. 2011. Publisher: IEEE.
22. Shanker Warathe, R N Patel. Six-phase transmission line over current protection by numerical relay. 2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems. 2015. Publisher: IEEE.
23. Sunil Kumar Shukla, Murli Manohar, Chintan Patel, Tarun Tailor, Arun Rathore. A Combined S-transform and Ensemble of DT based Protection scheme for six-phase transmission line. 2023 International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE). 2023. Publisher: IEEE.
24. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Tallat. Wavelets for six-phase transmission lines relaying: fault classification and phase selection. 11th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No.02CH37379). 2002. Publisher: IEEE.
25. A.A. Hajjar, M.M. Mansour, H.E.A. Talaat, S.O. Faried. Distance protection for six-phase transmission lines based on fault induced high frequency transients and wavelets. IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373). 2002. Publisher: IEEE.
26. G. Chandra Sekhar. A complete logic-based backup protection scheme for three and six phase transmission system by using negative sequence currents. TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference. 2017. Publisher: IEEE.
27. V. Salehi, M. Jaefary, H. Lesani, E. Mostery. A comparative study of tripping and reclosing schemes for six-phase transmission line considering transient stability. 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology. 2009. Publisher: IEEE.
28. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Complex asymmetric modes of electrical systems. Irkutsk: Irkutsk University Press. 2005. 273 p.
29. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Thao Van Le. Complex modeling of multiphase, multi-circuit and compact power transmission lines. Irkutsk, 2020. 296 p.
30. Kryukov A. V., Cherepanov A. V., Kryukov A. E. Modeling of electromagnetic influences of power transmission lines and traction networks on extended metal structures. Irkutsk, 2022. 188 p.
31. Carson I.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell System Techn. J. 1926. V. 5. P. 539-554.

Authors of the publication

Andrey V. Kryukov – Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

© Крюков А.В., Суслов К.В., Крюков А.Е.

Konstantin V. Suslov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia;
National Research University "MEI", Moscow, Russia. E-mail: *dr.souslov@yandex.ru*.

Aleksandr E. Kryukov – Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **18.09.2024 г.**

Отредактировано **02.10.2024 г.**

Принято **10.10.2024 г.**



РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ СПЭНЭ-1

Смоленцев Н.И.¹, Бондарева В.Ю.²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия
uralcm@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке управляемого накопительного комплекса (НК) электрической энергии для современной распределённой энергетики на основе передовых инновационных технологий. Научная новизна состоит в применении в НК сверхпроводящего электромеханического накопителя энергии СПЭНЭ-1 модульной конструкции. Модульная конструкция является новой и защищена тремя патентами (2791661, 2760784, 2601590). ЦЕЛЬ. Провести экспериментальные исследования, подтвердить основные технические решения, заложенные в конструкцию НК и разработать конструкторско-технологическую документацию (КТД). МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялись экспериментальные методы, подтверждающие теоретические исследования и расчеты узлов и элементов НК, реализованные средствами MatLab®. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, научная новизна, пути и этапы разработки накопителя энергии СПЭНЭ-1 НК. Работы проведены в три этапа. На первом этапе разработаны функциональная структура накопительного комплекса, математическая модель работы накопительного комплекса в составе электрической сети, методы расчета параметров и управления энергетическими потоками в электрических сетях различной топологии, а также ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса и системы управления. На втором этапе изготовлен экспериментальный образец системы управления накопительным комплексом, и проведена наладка и тестирование экспериментального образца системы управления накопительного комплекса. Разработаны программа и методика проведения испытаний экспериментального образца накопительного комплекса, включая систему управления, подготовлены методические материалы проведения комплексных испытаний экспериментальных образцов и рабочая документация для модернизации испытательной установки. На третьем этапе работы выполнены: а) сборка, наладка и тестирование НК для проведения совместных комплексных испытаний экспериментальных образцов; б) определение оптимальных параметров НК, основных характеристик и диапазона их изменений; в) экспериментальные испытания критических параметров сверхпроводящего подвеса ротора-маховика экспериментального образца накопительного комплекса и его системы управления; г) экспериментальные комплексные испытания экспериментальных образцов; д) корректировка КТД по результатам технологии изготовления и экспериментальных комплексных испытаний. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты, полученные в работе, имеют важное значение для развития распределённой энергетики в РФ. Разработана ЭКД накопительного комплекса и испытательной базы, а также нормативные документы для эксплуатации накопительного комплекса в различных системах электроснабжения. НК может использоваться в тяговых электросистемах электротранспорта, распределённых электрических сетях с альтернативными источниками питания. Особенно эффективно применение разработанного НК в системах электроснабжения, работающих в условиях низких температур, например, Арктики, Космоса.

Ключевые слова: накопитель энергии; ЭНЕРНЕТ; локальная электрическая сеть; распределённая генерация; управление потоками энергии; распределение мощности.

Благодарности: Работа, по результатам которой написана статья, выполнена в рамках гос. задания № 071-03-2024-008 от 19.01.2024 г.

Для цитирования: Смоленцев Н.И., Бондарева В.Ю. Результаты разработки и экспериментальных исследований накопительного комплекса с накопителем энергии СПЭНЭ-1 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 121-131. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.

RESULTS OF DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STORAGE COMPLEX WITH THE ENERGY STORAGE UNIT SPENE-1

Smolentsev N.I.¹, Bondaryeva V.Y.²

¹Siberian State University of Telecommunications and Information, Novosibirsk, Russia

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia
uralcm@mail.ru

Abstract: The RELEVANCE of the study is to develop a controlled storage complex (SC) of electrical energy for modern distributed energy based on advanced innovative technologies. **OBJECTIVE.** To conduct experimental studies, confirm the main technical solutions incorporated into the SC design and develop design and technological documentation (DTD). **METHODS.** When solving the tasks, experimental methods were used to confirm theoretical studies and calculations of SC units and elements, implemented by MatLab®. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, the ways and stages of developing the SPENE-1 SC energy storage device. The work was carried out in three stages. At the first stage, the functional structure of the storage complex, a mathematical model of the storage complex operation as part of an electrical network, methods for calculating parameters and controlling energy flows in electrical networks of various topologies, as well as the ECD for an experimental sample of the storage complex and the control system were developed. At the second stage, an experimental sample of the storage complex control system was manufactured and the experimental sample of the storage complex control system was adjusted and tested. A program and methodology for testing an experimental sample of the storage complex, including the control system, have been developed; methodological materials for conducting comprehensive tests of experimental samples and working documentation for upgrading the test facility have been prepared. At the third stage of the work, the following was performed: a) assembly, adjustment and testing of the NC for conducting joint comprehensive tests of experimental samples; b) determination of the optimal parameters of the NC, the main characteristics and the range of their changes; c) experimental tests of the critical parameters of the superconducting suspension of the rotor-flywheel of the experimental sample of the storage complex and its control system; d) experimental comprehensive tests of experimental samples; e) adjustment of the KTD based on the results of the manufacturing technology and experimental comprehensive tests. **CONCLUSION.** The results obtained in the work are of great importance for the development of distributed energy in the Russian Federation. The ECD of the storage complex and the test base, as well as regulatory documents for the operation of the storage complex in various power supply systems have been developed. The NC can be used in traction electric systems of electric transport, distributed electric networks with alternative power sources. The application of the developed NC is especially effective in power supply systems operating in low temperature conditions, for example, in the Arctic and space.

Keywords: energy storage; ENERNET; local power grid; distributed generation; energy flow management; power distribution.

Acknowledgments: The work, based on the results of which the article was written, was carried out within the framework of state assignment No. 071-03-2024-008 dated 01/19/2024.

For citation: Smolentsev N.I., Bondaryeva V.Y. Results of development and experimental studies of the storage complex with the energy storage unit SPENE-1. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 121-131. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-121-131.

Введение (Introduction)

Основой накопительного комплекса (НК) является накопитель энергии. Накопитель энергии – новый вид электротехнического оборудования, функции и области применения которого непрерывно расширяются. Перспективным направлением применения НК являются сетевые технологии ЭНЕРНЕТ, где с помощью накопителей энергии и энергетических маршрутизаторов организуется двустороннее движение энергетических потоков в сильно-связанных электрических сетях. Это позволяет регулировать дисбаланс выработанной и потребленной энергии в распределённой энергосистеме в реальном режиме времени, повышать энергосбережение и энергоэффективность [1]. Основой сетевых технологий ЭНЕРНЕТ является пакетный способ передачи электрической энергии, реализуемый с помощью накопителей энергии [2]. Поэтому разработка управляемого НК с перспективным накопителем электрической энергии для современной распределённой энергетики является актуальной задачей.

Известно много типов накопителей энергии, использующих разные физические законы для накопления и сохранения энергии. Особое место среди них занимают сверхпроводящие накопители энергии. Это обусловлено высокими удельными характеристиками накопителей энергии этого типа (удельная энергоемкость и мощность) при азотных температурах и перспективой создания сверхпроводящих накопителей на базе «комнатных» сверхпроводников, экологичностью, широким диапазоном применения [3, 4]. Среди сверхпроводящих накопителей энергии сверхпроводящие электромеханические накопители с бесконтактным подвесом ротора-маховика отличаются технологичностью, управляемостью, высокими удельными характеристиками, широким диапазоном областей применения. Цель данной работы – представить результаты разработки и экспериментальных исследований НК, содержащий сверхпроводящий электромеханический накопитель энергии СПЭНЭ-1 модификации V1 модульной конструкции, обладающий новизной, защищенной тремя патентами (2791661, 2760784, 2601590). Авторы ставят задачу показать приемлемые подходы к созданию многофункционального НК с перспективным накопителем энергии, определить области его применения, дальнейшие направления работы.

Материалы и методы (Materials and methods)

Работы были проведены в три этапа. На первом этапе НИОКР были разработаны функциональная структура электромеханического накопителя энергии накопительного комплекса (НК), мат. модель функционирования НК в электрической сети, методы расчета параметров и управления энергетическими потоками в электрических сетях различной топологии, а также ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса и системы управления. На рисунке 1 показан накопитель энергии СПЭНЭ-1 в разрезе.

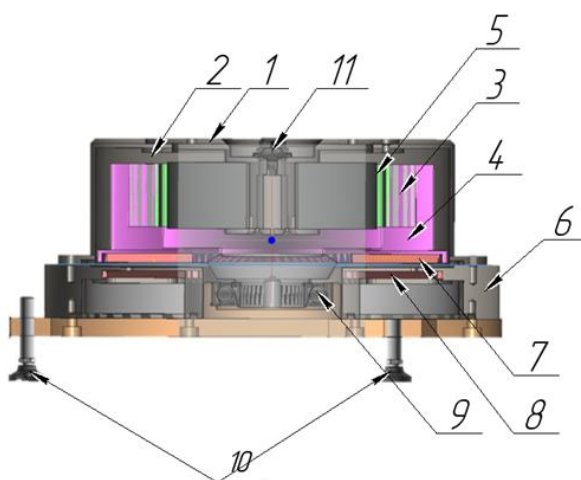


Рис. 1. Накопитель энергии СПЭНЭ-1 в разрезе:
1 – синхронная электрическая машина, 2 – статор,
3 – магнитопровод статора, 4 – ротор-маховик,
5 – магниты возбуждения, 6 – криостат,
7 – опорные магниты подвеса,
8 – сверхпроводящие пластины, 9 – подшипник,
10 – опоры, 11 – разъем

Fig. 1. Energy storage device SPENE-1 in section:
1 – synchronous electric machine, 2 – stator,
3 – stator magnetic circuit, 4 – rotor-flywheel,
5 – excitation magnets, 6 – cryostat, 7 – support
magnets of suspension, 8 – superconducting plates,
9 – bearing, 10 – supports, 11 – connector

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

На этом же этапе изготовлены компоненты и основные узлы экспериментального образца накопительного комплекса и системы управления. Проведены теоретические исследования динамической устойчивости, теплового баланса и критических параметров сверхпроводящего подвеса.

На втором этапе НИОКР были поставлены новые задачи и получены следующие результаты: изготовлен экспериментальный образец системы управления накопительным комплексом и проведена наладка и тестирование экспериментального образца системы управления накопительного комплекса. Затем разработаны программа-методика проведения испытаний экспериментального образца НК, включая систему управления, подготовлены методические материалы проведения комплексных испытаний экспериментальных образцов и рабочая документация для модернизации испытательной установки.

Решение задач первого и второго этапов позволило перейти к задачам третьего этапа:

- а) сборка, наладка и тестирование накопительного комплекса для проведения совместных комплексных испытаний экспериментальных образцов;
- б) определение оптимальных параметров НК, основных характеристик и диапазона их изменений;
- в) экспериментальные испытания критических параметров бесконтактного подвеса ротора-маховика экспериментального образца накопительного комплекса и его системы управления;
- г) экспериментальные комплексные испытания экспериментальных образцов;
- д) корректировка конструкторско-технологической документации по результатам технологии изготовления и экспериментальных комплексных испытаний. Состав и блок-схема управления НК приведены на рисунке 2.



Рис. 2. Блок-схема управления НК

Fig. 2. Block diagram of the storage complex

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

Управление вращением ротора-маховика осуществляют с помощью электропривода НК, а управление режимами работы накопителя энергии (заряд-разряд) – с пульта управления накопительным комплексом. Пульт управления предусматривает разные режимы работы НК: ручной, автоматический и интеллектуальный. Для реализации автоматического и интеллектуального режимов работы НК необходимы данные о нагрузке с датчиков электроприемников и программируемые контроллеры, которые позволят управлять подключением НЭ к сети и к потребителю энергии. Контроль за режимами работы НК обеспечивают специальные датчики (скорость вращения, температура и т.д.), которые вмонтированы в конструкцию НЭ. Бесконтактный подвес ротора-маховика в накопительном элементе осуществляется с помощью системы сверхпроводящего подвеса. Для этого используются сверхпроводящие пластины и постоянные магниты.

В результате проведения расчетов и моделирования сверхпроводящего подвеса получены значения удельной плотности вертикальной и аксиальной составляющих силы сверхпроводящего подвеса [5]:

$$F_z = 5,8 \text{ кГ/см}^2, F_x = 0,119 \text{ кГ/см}^2$$

Согласно разработанной эскизной конструкторской документации (УРГА.2021235-01.01.00, СА-22-76) изготовлены один из компонентов экспериментального образца накопительного комплекса – «Блок разгона и торможения накопителя энергии» (рис. 3) и «Шкаф управления накопительным комплексом» (рис. 4), состоящий из следующих компонентов:

- шкаф компактный распределительный MEV 80.60.21, IP65, 800x600x210мм;

- программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК 160;
- многоканальный блок питания ОВЕН БП14Б-Д4.2;
- блоки питания MDR-20-24 24В и MDR-10-12 12В, 0,84А;
- комплект автоматических выключателей.



Рис. 3. Компоненты блока разгона и торможения накопителя энергии *Fig. 3. Components of the energy storage acceleration and braking unit*

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



Рис. 4. Шкаф управления накопительным комплексом *Fig. 4. Control cabinet of the storage complex*

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

На этом этапе разработана мат. модель функционирования НК в составе электрической сети, а также обоснованы методы расчета технических, энергетических, экономических параметров, сделан анализ и проверка корректности модели, разработаны алгоритмы решения и исследованы его свойства [6, 7].

Также в ходе работы определен ряд унифицированных номинальных характеристик накопителя энергии и диапазон их изменений, определены оптимальные параметры накопителя энергии накопительного комплекса с учетом требований унификации, обозначены основные функции работы НК в системах электроснабжения и области его применения.

Разработана ЭКД на экспериментальный образец накопительного комплекса (УРГА.2021235-01.01.00). В состав документации вошли: пояснительная записка, чертёж общего вида, габаритный чертеж, схема электрическая, функциональная. На этапе разработки конструкторской документации проведено трехмерное моделирование нескольких вариантов конструкций накопителя энергии, а также проведены необходимые расчеты нескольких конструкций синхронного электродвигателя для накопителя энергии.

Проведены работы по изготовлению и сборке экспериментального образца накопительного комплекса. Для проведения первичных испытаний и определения силовых характеристик (силы левитации), полученных от производителя ВТСП-дисков (сверхпроводник состава $YBa_2Cu_3O_{7-x}$), изготовлен и собран основной испытательный макет – макет криостата в нескольких вариантах: 1 диск, 8 дисков, 12 дисков.

Макет ротора-маховика изготовлен в нескольких вариантах: с ферритовым кольцевым магнитом, с неодимовыми магнитными дисками 30*10мм – 6, 12 шт., с неодимовыми квадратными магнитами 12*12*3мм – 24 шт., с неодимовым кольцом, с однонаправленным неодимовым магнитом. Испытания проходил экспериментальный образец накопительного комплекса (УРГА 2021235-01.01.00 (далее – объект испытаний). Объект испытаний представлен в сопровождении следующих документов:

- техзадание на выполнение НИР;
- рабочая документация на испытательную установку (УРГА 2021235-10.00.00, УРГА.2021235-11.00.00);
- конструкторская документация на ЭО НК (УРГА.2021235-01.01.00);
- программа и методика испытаний УРГА.2021235-01.01.00 ПМ;
- нормативная документация, указанная в программе и методике испытаний;
- акт изготовления экспериментального образца накопительного комплекса.

Испытания опытных образцов проводились на модернизированной экспериментальной установке, содержащей в т.ч. вновь созданные модуль испытаний систем управления электрическими машинами и модуль испытаний накопителей энергии:

- предварительная проверка основных технических решений, заложенных в конструкцию экспериментального образца накопителя энергии, и определение направлений доработки конструкторской документации по итогам испытаний.
- подтверждение принципиальной возможности бесконтактного сверхпроводящего подвеса ротора-маховика накопителя энергии и исследование его силовых характеристик в динамическом режиме.
- оценка возможности промышленного производства накопителя энергии с учетом полученных результатов испытаний и технических требований для конкретных областей применения.
- тестирование модернизированной экспериментальной установки, содержащей в т.ч. вновь созданные модуль испытаний систем управления электрическими машинами (УРГА 2021235-10.00.00), модуль испытаний накопителей энергии (УРГА.2021235-11.00.00).

В результате испытаний впервые в стране проведен эксперимент по проверке динамической левитации ротора-маховика. Ротор-маховик бесконтактно раскручивался с большой скоростью и удерживался в левитирующем состоянии, что подтвердило технические решения, заложенные в конструкции НК. Для проверки основных технических решений, заложенных в конструкцию накопителя энергии изготовлена экспериментальная установка (рис. 5-6), содержащая макет криостата, макет ротора-маховика с квадратными магнитами 10x10x3 мм в количестве 24 штуки, закрепленных на роторе-маховике медными винтами. Ответная часть силового блока содержала 12 ВТСП – элементов размерами Ф30x10 мм и размещалась в криостате.

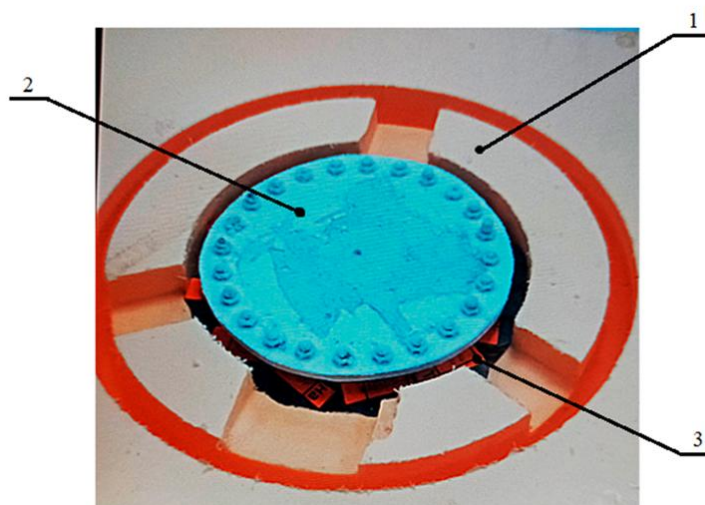


Рис. 5. Схема установки по экспериментальному исследованию бесконтактного подвеса ротора-маховика накопителя энергии (1 – криостат, 2 – ротор-маховик, 3 – силовой блок)

Fig. 5. Scheme of the experimental study of the contactless suspension of the rotor-flywheel of the energy storage device (1 – cryostat, 2 – rotor-flywheel, 3 – power unit)

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

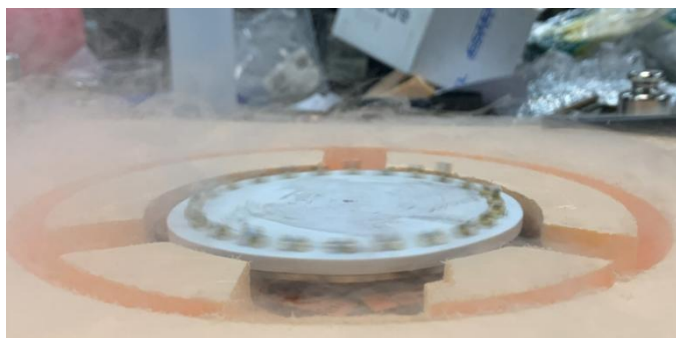


Рис. 6. Проверка принципиальной возможности левитации и динамической устойчивости вращающегося ротор-маховика на экспериментальной установке

Fig. 6. Testing the fundamental possibility of levitation and dynamic stability of a rotating rotor-flywheel on an experimental setup

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

Объект испытаний соответствует заявляемому параметру согласно тех. задания на выполнение НИР и предназначен для работы:

- в распределённых электрических сетях с альтернативными источниками энергии;
- в городских, распределительных электрических сетях, силовых сетях электротранспорта;
- в бортовых электрических сетях (судовых, электротранспортных);
- в автономных системах электроснабжения.

Основные технические параметры НК указаны в таблице 1, основные конструктивные требования к ЭО НК – в таблице 2.

Результаты (Results)

Таблица 1

Основные технические параметры НК

	Основные технические параметры	Соответствие ТЗ на НИР
	Функции, выполнение которых должен обеспечивать разрабатываемый научно-технический продукт	
1	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен обеспечивать повышение энергосбережения и энергоэффективности электрической сети путем накопления, интеллектуального распределения, рекуперации электрической энергии	Соответствует
2	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен выполнять следующие функции: - обеспечение балансировки и выравнивания графиков нагрузки в сети (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной энергии и выдача в сеть в периоды пиковой нагрузки); - сглаживание резкопеременных колебаний мощности вырабатываемой электроэнергии; - стабилизация работы источников и систем распределенной генерации электрической энергии; - обеспечение бесперебойного питания объектов различного назначения; - обеспечение запаса энергии автономных транспортных средств.	Соответствует
	Количественные параметры, определяющие выполнение научно-техническим продуктом своих функций:	
	Интеллектуальный накопительный комплекс должен разрабатываться в кластерном исполнении. Характеристики: Удельная энергоёмкость: не менее 1 МДж/кг. Удельная мощность: не менее 1 МВт/кг. Коэффициент полезного действия: 96-98%. Средняя наработка на отказ: не менее 50000 часов. Среднее время восстановления не более 1 час. Срок службы – не менее 10 лет. Ресурс до списания – не менее 85000 часов. Средний срок сохраняемости – не менее 10 лет (без учета срока сохраняемости элементов питания).	Соответствует

	Входные воздействия, необходимые для выполнения научно-техническим продуктом заданных функций	
	Электромеханический накопитель энергии – это накопитель, в котором энергия накапливается и сохраняется в виде кинетической энергии вращающегося маховика, а выделяется в виде механической энергии вращения. Входной электрический ток статора вращает ротор- маховик и поддерживает его вращение 24 часа в сутки, 7 дней в неделю, пока накопленная энергия не освобождается через генератор, такой, как обращенный синхронный электродвигатель. Количество запасенной электроэнергии и продолжительность его работы определяются массой маховика и его скоростью вращения.	Соответствует
	Выходные реакции, обеспечиваемые научно-техническим продуктом в результате выполнения своих функций:	
	Для зарядки электромеханического накопителя энергии электрическая машина работает в режиме двигателя, потребляет электрическую энергию от внешнего источника и разгоняет маховик, а при разрядке электрическая машина работает уже в режиме генератора, выделяя электрическую энергию, при этом замедляя маховик.	Соответствует

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

Таблица 2

Проверка конструктивных требований

№	Конструктивные требования	Соответствие ТЗ на НИР
	Экспериментальный образец электрокинетического накопителя энергии должен включать в себя:	
1	Обращенный синхронный двигатель-генератор	Соответствует
2	ротор-маховик	Соответствует
3	статорные обмотки, выполняющие функции прямого и обратного преобразования электрической энергии в механическую энергию и ее последующей отдачи в сеть	Соответствует
4	системы азотного криостатирования	Соответствует
5	системы вакуумирования	Соответствует
6	системы коммутации	Соответствует
7	системы автоматике и управления	Соответствует
8	Экспериментальный образец электромеханического накопителя энергии должен быть выполнен в модульном исполнении и состоять из:	Соответствует
9	– модуля криостата;	Соответствует
10	– модуля двигателя-генератора, содержащего маховик и опорные постоянные магниты, размещенные на нижней плоскости ротора-маховика и магниты возбуждения синхронного двигателя-генератора, расположенные на внутренней боковой поверхности ротора-маховика.	Соответствует

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

Обсуждение (Discussions)

Таким образом, подтверждена теоретически и экспериментально работоспособность модульной конструкции СПЭНЭ-1 в составе НК. Результаты, полученные в работе, имеют большое значение для внедрения распределенной энергетики в РФ [8-13]. Разработана ЭКД накопительного комплекса и испытательной базы, а также нормативные документы для эксплуатации накопительного комплекса в различных системах электроснабжения. Полученные результаты соответствуют тенденциям современного развития распределенной энергетики и технологиям накопления электрической энергии. Этот факт подтверждается использованием эффекта сверхпроводимости и перспективой постоянного улучшения качества сверхпроводящих материалов, что открывает большие перспективы для роста технико-экономических показателей НК. Показана работоспособность предложенной конструкции теоретически и экспериментально. Конструкция ориентирована на отечественную технологическую базу и комплектующие, включая сверхпроводящие материалы и другие элементы, что является крупным вкладом в решение проблемы импортозамещения российской экономики. Модульная конструкция накопителя энергии защищена патентами и авторскими

свидетельствами.

Результаты работы по созданию НК демонстрировались на ряде выставок, где получили высокие награды, в частности: XXVI Московский международный Салон изобретений и инновационных технологий, Москва, 28.03-30.03. 2023, Золотая медаль. Международный военно-технический форум «Армия-22», Москва, Диплом. Международный военно-технический форум «Армия-23», Москва, Диплом. Выставка «Экспотехностраж». Сибирский округ войск национальной гвардии РФ, Новосибирск, Экспоцентр, 2022-2023гг. Диплом. Конкурс на лучший проект в сфере информационных технологий в интересах обороны и безопасности 2023 г. Архимед 22, 23, Интерполитех 22, 23, где отмечены золотой медалью и дипломами. Результаты работы представлены в 2023 г. на конкурс лучших проектов МО РФ, где получили 3 место.

Заключение (Conclusions)

Основным преимуществом предлагаемого решения является высокая адаптивность его применения в энергосистемах различных регионов России с учетом специфики их природно-климатических условий, применяемых технологий ресурсосбережения. Накопительный комплекс может использоваться в системах электроснабжения различного назначения как многофункциональный регулятор, например, для решения задач повышения надежности, энергосбережения, качества электроэнергии. Также может использоваться в тяговых электросистемах электротранспорта, распределённых электрических сетях с альтернативными источниками питания. Особенно эффективно применение разработанного НК в системах электроснабжения, работающих в условиях низких температур, например, Арктики, Космоса. Полученные результаты позволили сформулировать формулу направлений дальнейших работ по совершенствованию конструкции накопителя энергии:

1. Материалы. Использование высокотемпературных сверхпроводников или других передовых материалов, обладающих сверхпроводящими свойствами, для создания надежного накопителя энергии.

2. Дизайн. Разработка инновационного дизайна, который позволит эффективно накапливать и хранить энергию в сверхпроводящем состоянии.

3. Охлаждение. Обеспечение необходимых условий охлаждения для поддержания сверхпроводящего состояния материалов, что позволит сохранить высокую энергетическую эффективность, снизить потери в токопроводах и теплопритоках через стенки криостата, повысить технико-экономические показатели НК.

4. Контроль и мониторинг. Внедрение современных систем контроля и мониторинга, которые позволят эффективно управлять процессом зарядки, хранения и выдачи энергии.

5. Эффективность. Работа над повышением эффективности накопителя, уменьшение потерь и повышение стабильности работы, что сделает его привлекательным для крупномасштабного использования.

Эта формула учитывает ключевые аспекты при создании сверхпроводящих накопителей энергии, что может привести к разработке инновационных устройств, способных революционизировать хранение и использование энергии в будущем.

Литература

1. Смоленцев, Н. И. Энернет. Состояние и перспективы / Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибаева // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 22–23 апреля 2021 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. – С. 409-413.

2. Патент № 2825222 С1 Российская Федерация, МПК. H02J 4/00 (2024.01); H02J 7/00 (2024.01) Пакетный способ передачи энергии: № 2023119435: заявл. 21.07.2023: опубл.22.08.2024 / Н. И. Смоленцев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики".

3. Lee, S., Kim, J., Im, S., An, S., Kwon, Y.-W., & Auh, K. H. (2023). Consideration for the development of room-temperature ambient-pressure superconductor (LK-99). *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, 33(2), 61–70.

4. Патент № 2791601 С1 Российская Федерация, МПК H02K 55/00, H02K 7/02, H02K 26/00. Электромеханический накопитель энергии: № 2022113364: заявл. 18.05.2022: опубл. 13.03.2023 / Н. И. Смоленцев, Ю. Л. Бондарев, А. В. Никитин;

5. Разработка накопительного комплекса для систем энергоснабжения различного назначения/ Н. И. Смоленцев, А. Н. Игнатов, Д. С. Иргибаева, А. В. Никитин // Современные

проблемы телекоммуникаций: Материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 20–21 апреля 2022 года. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. – С. 727-733.

6. Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М., Игнатов А.Н. Управление электромеханическим накопителем энергии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(6):75-84.

7. Смоленцев Н.И., Четошникова Л.М. Топология электрической сети и способ передачи электрической энергии. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(4):95-103. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103>.

8. Хохлов А., Мельников Ю., Веселов Ф., Холкин Д., Дацко К. Распределённая энергетика в России: потенциал развития. — М.: Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 2019. – 89 с.

9. Ерошенко С. А., Карпенко А. А., Кокин С. Е., Паздерин А. В. Научные проблемы распределённой генерации // Известия вузов: Проблемы энергетики, 2010. №11–12. С. 126–133.

10. Хохлов А. Развитие распределённой генерации приведет к кардинальным изменениям в архитектуре электроэнергетики России. Энергетика и промышленность России. 2017, № 11

11. «Дорожная карта» «ЭНЕРДЖИНЕТ» Национальной Технологической Инициативы. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 11.04.2024 г.).

12. Тягунов М. Г., Викулов А. Н. Возобновляемая энергетика в распределённых энергосистемах. Московский энергетический институт (НИУ) СОК №7. [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (дата обращения 11.04.2024 г.).

13. Цифровой переход в электроэнергетике России: экспертно-аналитический доклад. / под общ. ред. В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина. М., ЦСР, 2017.

Авторы публикации

Смоленцев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры технической электроники СибГУТИ. ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. uralcm@mail.ru.

Бондарева Вероника Юрьевна – студентка Политехнического института Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ (НИУ)). nik4.b@mail.ru

References

1. Smolentsev, N. I. Enernet. State and prospects / N. I. Smolentsev, A. N. Ignatov, D. S. Irgibaeva // Modern problems of telecommunications: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, April 22-23, 2021. - Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2021. - С. 409-413.

2. Patent No. 2825222 C1 Russian Federation, МПК. H02J 4/00 (2024.01); H02J 7/00 (2024.01) Packet method of energy transfer: No. 2023119435: avt. 21.07.2023: published on 22.08.2024 / N. I. Smolentsev; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Informatics”.

3. Lee, S., Kim, J., Im, S., An, S., Kwon, Y.-W., & Auh, K. H. (2023). Consideration for the development of room-temperature ambient-pressure superconductor (LK-99). Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology, 33(2), 61-70.

4. Patent No. 2791601 C1 Russian Federation, МПК H02K 55/00, H02K 7/02, H02K 26/00. Electromechanical energy storage device: No. 2022113364: avt. 18.05.2022: publ. 13.03.2023 / N. I. Smolentsev, Y. L. Bondarev, A. V. Nikitin;

5. Development of storage complex for power supply systems for different purposes / N. I. Smolentsev, A. N. Ignatov, D. S. Irgibaeva, A. V. Nikitin // Modern problems of telecommunications: Proceedings of the Russian Scientific and Technical Conference, Novosibirsk, April 20-21, 2022. - Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics, 2022. - С. 727-733.

6. Smolentsev, N.I.; Chetoshnikova, L.M.; Ignatov, A.N. Control of the electromechanical energy accumulator (in Russian) // Izvestia vysokikh uchebnykh uchebnykh obrazovaniye. ENERGY PROBLEMS. 2019;21(6):75-84.

7. Smolentsev, N.I.; Chetoshnikova, L.M. Topology of an electric network and a method of electric energy transmission. Izvestiya vysokikh uchebnykh uchebnykh obrazovaniye [Izvestia of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS. 2019;21(4):95-103. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-4-95-103>.

9. Eroshenko S. A., Karpenko A. A., Kokin S. E., Pazderin A. V. V. Scientific problems

of distributed generation // Izvestiya Vuzov: Problems of Power Engineering, 2010. №11-12. С. 126-133.

10. Khokhlov A. Development of distributed generation will lead to cardinal changes in the architecture of the Russian power industry. *Energetika i promyshlennosti Rossii*. 2017, № 11

11. “ENERGYNET Roadmap” of the National Technological Initiative. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (date of circulation 11.04.2024).

12. Tyagunov M. G., Vikulov A. N. Renewable energy in distributed energy systems. Moscow Power Engineering Institute (NIU) SOK No. 7. [Electronic resource]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8916> (accessed on 11.04.2024).

13. Digital transition in the electric power industry of Russia: expert-analytical report. / Edited by V.N. Knyaginina and D.V. Holkin. MOSCOW, CSR, 2017.

Authors of the publication

Nikolay I. Smolentsev – Siberian State University of Telecommunications and Information, Novosibirsk, Russia. *ORCID**: <https://orcid.org/0000-0002-5775-2903>. *uralcm@mail.ru*.

Veronika Y. Bondareva – South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. *nik4.b@mail.ru*.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **13.07.2024 г.**

Отредактировано **16.09.2024 г.**

Принято **22.10.2024 г.**



РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 110 кВ

Балобанов Р.Н.¹, Латыпова А.А.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-2, г. Казань, Россия

rassel_ipek@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния (ИТС) для элегазовых выключателей напряжением 110 кВ согласно методики расчета ИТС, разработанной Минэнерго России. ЦЕЛЬ. Провести анализ погрешностей, возникающих при расчете ИТС. Рассмотреть проблемы, возникающие при расчете ИТС и предложить пути решения данной проблемы. Выполнить ручной расчет индекса технического состояния элегазового выключателя ВЭБ-110 по утвержденной методике. Разработать рабочую версию алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния (ИТС) для элегазовых выключателей напряжением 110 кВ согласно методики расчета ИТС, разработанной Минэнерго России. Провести расчет ИТС выключателя ВЭБ-110 с помощью созданного алгоритма. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялся метод моделирования методики расчета ИТС, реализованный в среде программирования Delphi7. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности расчета ИТС для разных видов выключателей. Определены погрешности, возникающие при ручном расчете ИТС. Произведен ручной расчет ИТС и расчет ИТС с помощью разработанного алгоритма для элегазового выключателя ВЭБ-110, проведен сравнительный анализ результатов расчета. В данной статье смоделирован рабочий алгоритм автоматизированного расчета ИТС для элегазовых выключателей типа ВЭБ-110. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование алгоритма автоматизированного расчета ИТС дает возможность значительно уменьшить (практически исключить) погрешности, возникающие при ручном расчете. Также сильно сокращается время расчета и появляется возможность более оперативного получения данных о состоянии выключателей. Разработанный алгоритм рекомендует управляющее воздействие на оборудование исходя из его состояния, тем самым облегчая планирование ремонтов, технических обслуживаний оборудования. Исходя из рассчитанного значения ИТС, осуществляется ранжирование выключателей по первоочередности включения в план технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Ключевые слова: элегазовый выключатель; индекс технического состояния; функциональный узел; состояние оборудования; автоматизация процесса.

Для цитирования: Балобанов Р.Н., Латыпова А.А. Разработка алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 132-146. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-132-146.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR AUTOMATED CALCULATION OF THE TECHNICAL CONDITION INDEX OF 110 kV GAS-INSULATED CIRCUIT BREAKERS

Balobanov R.N.¹, Latypova A.A.²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Branch of JSC «Tatenergo» Kazan CHPP-2, Kazan, Russia

rassel_ipek@mail.ru

Abstract: RELEVANCE of the study is to develop an algorithm for automated calculation of

the technical condition index (TCI) for 110 kV gas-insulated circuit breakers according to the TCI calculation method developed by the Ministry of Energy of Russia. THE PURPOSE. To analyze the errors arising at calculation of TCI. To consider the problems arising at calculation of TCI and to offer ways of the decision of the given problem. To perform manual calculation of the technical condition index of the VEB-110 gas-insulated circuit breaker according to the approved methodology. Develop a working version of the algorithm for automated calculation of the technical condition index (TCI) for 110 kV gas-insulated circuit breakers according to the TCI calculation methodology developed by the Ministry of Energy of Russia. To carry out TCI calculation of VEB-110 circuit breaker with the help of the created algorithm. METHODS. The method of modeling of the TCI calculation method implemented in the Delphi7 programming environment was used to solve the task. RESULTS. The article describes the relevance of the topic, considers the peculiarities of TCI calculation for different types of circuit breakers. Manual TCI calculation and TCI calculation with the help of the developed algorithm for VEB-110 gas-insulated circuit breaker are made, the comparative analysis of the calculation results is carried out. In this paper the working algorithm of automated calculation of ITS for gas-insulated circuit breakers of VEB-110 type is modeled. CONCLUSION. The use of the algorithm of the automated calculation of TCI gives an opportunity to reduce (practically to exclude) the errors arising at manual calculation. Also the calculation time is greatly reduced and there is a possibility of more operative obtaining of data on the state of circuit breakers. The developed algorithm recommends the control action on the equipment based on its condition, thus facilitating the planning of repairs, maintenance of equipment. Based on the calculated TCI value, the circuit breakers are ranked according to the priority of inclusion in the maintenance plan.

Keywords: *gas-insulated circuit breaker; technical condition index; functional unit; equipment condition; process automation.*

For citation: Balobanov R.N., Latypova A.A. Development of an algorithm for automated calculation of the technical condition index of 110 kV gas-insulated circuit breakers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 132-146. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-132-146.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Министерство энергетики Российской Федерации предложило методику для оценки технического состояния, которая включает вычисление показателя устройства с использованием формулы из соответствующей методики. Этот расчет основан на весовых коэффициентах, индивидуально назначаемых для каждого параметра функционального блока устройства. Для газовых выключателей ИТС количество учитываемых параметров может варьироваться от 33 до 65, и для каждого из них приводится от 2 до 5 условий, необходимых для проведения оценки. В результате выполнение расчета ИТС для одного устройства требует значительной ручной работы, высоких затрат труда и времени [1]. Целью данного исследования является совершенствование системы оценки технического состояния газовых выключателей и оптимизация процесса ее расчета путем создания алгоритма автоматического расчета, реализующего требования современных нормативных документов. Научная новизна исследования состоит в том, что в работе смоделирована программа, позволяющая определять индекс состояния элегазового выключателя и выводящая рекомендации по дальнейшим воздействиям на оборудование. Практическая значимость полученных результатов также состоит в том, что программа позволяет увидеть узкие места выключателя (параметры с наименьшей балльной оценкой) и более оперативно среагировать, предупредить возможные дефекты. Использование данной программы позволяет оптимизировать процесс расчета ИТС и повысить эффективность мониторинга за техническим состоянием выключателей.

В ходе исследования были изучены российские и зарубежные научные статьи, в которых выслеживается выбранная тема.

Элегазовые выключатели SF₆ занимают важное место в энергосистемах высокого напряжения, благодаря своим уникальным свойствам: высокой диэлектрической прочности, устойчивости к высоким температурам и долговечности. Однако для их эффективной работы необходима постоянная диагностика и мониторинг состояния, что требует разработки современных методов и алгоритмов. В статье [2] рассматривается

структура и особенности элегазовых выключателей, а также подчеркивается необходимость в разработке комплексных диагностических систем для мониторинга их состояния.

Современные подходы к диагностике высоковольтных выключателей базируются на мониторинге ключевых параметров, таких как давление газа, влажность, электрические и механические характеристики. В исследовании Gomes et al., 2020 подчеркивается значимость непрерывного мониторинга этих параметров для предотвращения аварийных ситуаций и оптимизации технического обслуживания оборудования [3]. В частности, мониторинг давления SF₆ и уровня влажности помогает выявить потенциальные утечки и ухудшение изоляции.

Статья [4] учитывает подход оценки обязательных показателей технического состояния (ТС) электрооборудования на основе современных нормативных документов. Авторы анализируют текущую методологию и приводят основные недостатки существующего подхода. Это связано с тем, что отсутствует статистическая информация о диагностических значениях параметров оборудования технического состояния и методах определения параметров его функциональных узлов, весовые коэффициенты группы параметров функциональных узлов оборудования ТС методами экспертной оценки. При этом группа параметров ТС средства может быть изменена в зависимости от методов диагностики, используемых компанией. По мнению авторов, значения полученных условных показателей могут быть использованы для определения «показателей надежности оборудования и планирования мероприятий по ТОиР».

Для расчета индекса технического состояния важно учитывать не только физические параметры (давление и влажность газа), но и временные характеристики работы механизма, вибрационные сигнатуры и электрическое сопротивление контактов. В статье [5] предложена система интеграции данных с различных датчиков для более точного анализа состояния выключателей и расчета индекса их надежности. Комбинированный подход позволяет учитывать специфику каждого узла оборудования, что улучшает точность диагностики.

С. В. Мезин, А. В. Благочиннов, Ш. М. Милитонян, С. А. Агринская [6] создали профессиональную систему, которая может изменять структуру и базу знаний, дополнять ее и решать множество задач по выявлению технического состояния оборудования. Авторы предлагают новый подход к оценке технического состояния оборудования, а также приводят примеры расчетов на основе весовых показателей функциональных компонентов оборудования. Программная модель представлена на VBA Excel, внутреннем языке программирования для программ Microsoft Office. Этот алгоритм имеет некоторые общие черты с алгоритмом автоматического расчета, предложенным в данной статье.

Хальясмаа Александра Ильмаровна в [7] отмечает о важности интеллектуализации процессов обработки и анализа данных. По ее мнению, «интеллектуализация связана как с необходимостью использования эксплуатационного опыта, так и получения объективных оценок состояния оборудования вне зависимости от квалификации персонала». Научная новизна ее работы состоит в том, что в работе доказана возможность решения задачи комплексной оценки технического состояния сложного объекта на основе нейро-нечеткого логического вывода. Данный способ использует агрегированную информацию об объекте исследования и сформулированные экспертные знания с учетом эксплуатационного опыта.

В [8] предложен методологический подход к определению набора характеристик технического состояния в многоэтапных системах диагностического обследования. Исследование статистических данных и опытом использования парка высоковольтных выключателей показало, что надежность, безопасность и эффективность работы элегазовых выключателей обуславливаются всеми жизненными стадиями, включая научные исследования, производство, выбор и проектирование, а также эксплуатацию. Было разработано несколько новых методов для определения индекса технического состояния этих выключателей и методика проверки их фарфоровых корпусов с помощью ультразвуковой структурометрии, а также классификация примесей, возникающих на каждом этапе жизненного цикла элегаза. Доказано, что комплексное обследование эффективно решает ключевые задачи, связанные с обеспечением надежности и эффективности эксплуатации выключателей.

Методы машинного обучения активно используются для обработки и анализа данных о состоянии оборудования. В [9] описаны алгоритмы классификации и прогнозирования, которые помогают выявить потенциальные неисправности и оценить

оставшийся срок службы коммутационных аппаратов. Машинное обучение, включая нейронные сети, помогает повысить точность диагностики и мониторинга состояния оборудования и стало важным инструментом для автоматизации процесса оценки.

Автоматизация процесса диагностики требует разработки алгоритмов для автоматического расчета индекса состояния на основе данных, полученных от множества различных датчиков. В исследовании [10] описывается концепция Интернета вещей (IoT) и ее роль в удаленном мониторинге и диагностике высоковольтного оборудования, включая элегазовые выключатели. Применение IoT позволяет собирать данные в реальном времени и анализировать их на удаленных серверах, что упрощает эксплуатацию и обслуживание оборудования.

Хотя автоматизированные системы мониторинга приносят значительные улучшения в процесс эксплуатационной надежности, они также сталкиваются с рядом сложностей, включая обработку больших объемов данных, необходимость в высококачественных датчиках и алгоритмах, а также в обеспечении безопасности данных. В работе [11] отметили ключевые проблемы в управлении и хранении данных для анализа состояния выключателей. Решение данной проблемы предложили [12] методики улучшения качества данных с использованием методов разреженного моделирования.

В статьях [13] и [14] описаны успешные внедрения систем автоматического мониторинга и расчета индекса технического состояния для высоковольтных выключателей. Внедрение таких систем позволяет продлевать срок эксплуатации оборудования, снижать затраты на его обслуживание и предотвращать аварийные ситуации благодаря своевременной диагностике.

В [15] приведен анализ информации о совместном использовании показателей надежности и индекса технического состояния при оценке состояния основного электрооборудования на примере схем распределения электроэнергии в энергосистему современных тепловых электростанций. Авторами предложено ввести новый параметр – индекс технического состояния на отказ. Оценка технического состояния проводится путем сравнения фактических параметров функциональных узлов с установленными нормами и рекомендациями производителей. Это позволяет определить индекс технического состояния до выхода из строя, что необходимо для планирования ремонтных работ и предотвращения аварийных ситуаций. В статье представлены результаты исследования алгоритмов, которые позволяют сформировать улучшенный подход к планированию ремонтной программы с учетом особенностей эксплуатации оборудования.

Таким образом, можно найти немало количество научных статей, научных публикаций, в которых предлагается какой-то новый подход расчета индекса технического состояния, определяются особенности расчета того или иного параметра. Но мало работ, в которых бы поднимался вопрос оптимизации именно существующей методики расчета ИТС [16, 17], разработанной Минэнерго России. Возможно, при более быстром и удобном способе проведения расчета, эта методика была бы намного эффективной и результативной. В дальнейшем возможно еще большая оптимизация расчета таким образом, что ИТС будет рассчитываться в момент реального времени. Это реализуется путем установки датчиков, измерительных приборов непосредственно на оборудование и данные измерений передаются в какой-то центральный узел. Данная программа осуществляет вычисления, что позволяет в любое время отслеживать индекс технического состояния оборудования. Это значительно упростит процесс мониторинга и диагностики, а также поможет в предотвращении аварий. При внедрении такого метода, он может стать основой для перехода от планово-предупредительных ремонтов в электроэнергетике к ремонту, основанному на фактическом состоянии оборудования.

Материалы и методы (Materials and methods)

При расчете индекса технического состояния выключателей участвуют разное количество параметров в зависимости от вида выключателей в первую очередь на него влияют отличия и конструктивные особенности этих выключателей. В данной статье приводится анализ расчета ИТС элегазовых баковых выключателей.

Основное отличие этих выключателей в среде, используемой для прерывания тока: в элегазовых выключателях для отведения тепла (охлаждения выключателя) и создания изолирующей дугогасящей среды используется элегаз, или шестифтористая сера (SF₆ – гексафторид серы) – неорганическое вещество, при стандартных условиях представляющая собой тяжелый газ.

Электрическая прочность среды, в которой гасится дуга, является одной из

ключевых характеристик выключателей. В частности, элегаз демонстрирует высочайшую диэлектрическую прочность, что особенно важно при напряжении 110 кВ и выше. Другим важным параметром является коммутационный ресурс выключателя, определяющий количество рабочих циклов. Этот ресурс зависит от величины коммутируемых токов: чем выше ток, тем быстрее ресурс выключателя исчерпывается.

Все виды выключателей рассчитаны на заданное количество отключений в зависимости от величины отключаемых токов, будь то номинальные или отключаемые токи вплоть до нескольких десятков кА. По окончании ресурса элегазовый выключатель нуждается в капитальном ремонте, во время которого оценивается его состояние и определяется возможность дальнейшего использования.

Текущая методика определения ИТС включает такие параметры, большинство из которых невозможно выявить в ходе обычной эксплуатации объекта, даже с использованием существующих автоматизированных систем диагностики. Поэтому объекты требуют обследования во время плановых ремонтов на основе данных диагностических осмотров и испытаний. Выключатель ВЭБ-110 отличается высокой устойчивостью к переключениям и механическим нагрузкам. При правильной эксплуатации он имеет длительный срок службы, не требует ремонта до 20 лет. Однако для обеспечения надежной работы в период между ремонтами необходимо проводить техническое обслуживание, включающее регулярный визуальный осмотр и контроль состояния, профилактические мероприятия, не требующие демонтажа опоры, для повышения надежности выключателя. В таблице 1 приведены работы по техническому обслуживанию выключателя и сроки их завершения с момента ввода в эксплуатацию.

Таблица 1

Перечень операций по техническому обслуживанию выключателя

№	Наименование операции	Рекомендуемая периодичность проведения				
		ежемесячно	через 5 лет	через 10 лет	через 15 лет	через 20 лет
1	Контроль давления элегаза	+	-	-	-	-
2	Снятие показаний счетчика операций	-	+	+	+	+
3	Контроль загрязненности и отсутствия повреждений фарфоровых изоляторов	-	+	+	+	+
4	Контроль уплотнений кожуха передаточного устройства	-	+	+	+	+
5	Контроль и подтяжка резьбовых соединений	-	+	+	+	-
6	Осмотр и смазка шарнирных соединений горизонтальной передачи, а также узлов трения отключающего механизма	-	-	+	-	+
7	Контроль влажности элегаза в выключателе	-	-	-	-	+
8	Измерение электрического сопротивления главной цепи токопровода	-	+	+	+	+
8	Измерение электрического сопротивления главной цепи токопровода	-	+	+	+	+
9	Оценка эрозионного износа дугогасительных контактов методом определения момента их замыкания	-	-	+	-	+
10	Измерение собственных времен включения и отключения выключателя	-	-	+	-	+
11	Проведение среднего ремонта с разборкой полюсов выключателя, с заменой уплотнений и изношенных узлов и деталей	-	-	-	-	+
12	Проверка трансформаторов тока	-	-	+	-	+

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

Чтобы обеспечить надежность и безопасность работы оборудования на Казанской ТЭЦ-2, ежегодно проводится техническое обслуживание элегазовых выключателей. По завершении работ составляется протокол с результатами тестов и измерений. Если какие-либо параметры оборудования, выведенного на текущий ремонт, не могут быть обновлены из-за отсутствия необходимых проверок и испытаний, их значения остаются

такими же, как и в предыдущем году при расчете индекса технического состояния (ТС).

Оценка состояния оборудования базируется на следующей информации:

- данные от производителя оборудования (заводские параметры и диапазоны их изменений);
- результаты технической диагностики в процессе входного контроля (до монтажа, после монтажа, в ходе монтажа, до и после технического воздействия);
- испытательные данные (пусковые, режимные и наладочные после монтажа и технического воздействия, предремонтные, режимно-эксплуатационные);
- данные мониторинга и диагностики, собранные в процессе эксплуатации (данные обходов и осмотров, дефектные журналы, суточные ведомости, результаты технических освидетельствований и автоматизированные системы управления процессом).

Согласно нормативным документам, оценка технического состояния основывается на данных, а его конфигурация учитывает структуру устройства. На основе этого формируется база данных для оценки с учетом влияния различных характеристик на высоковольтные газовые выключатели. Это позволяет создавать заказы на оценку технического состояния и определение технического воздействия. Одной из основных задач является определение интегрального показателя состояния (ИТС) для принятия решений в области технического воздействия на коммутационные аппараты в зависимости от его состояния [16].

Результатами оценки технического состояния элегазового выключателя являются:

- ИТС функциональных узлов;
- ИТС элегазового выключателя.

Все оборудование разделяется на функциональные блоки, каждый из которых представляет собой основную сборочную единицу и оказывает влияние на общую производительность системы. Для каждого блока определяется набор параметров, характеризующих его техническое состояние. Это состояние оценивается путем сравнения фактических значений с установленными стандартами и рекомендациями производителя. Для вычисления индекса состояния (ИС) оборудования рассматривается индекс состояния каждого функционального блока, который составляется из различных параметров, учитывающих их влияние на надежность блока в целом. Возможно использование диагностических параметров, определяющих состояние нескольких функциональных единиц оборудования.

Идентификацией параметров состояния и их допустимых значений занимаются эксперты в области техники, опираясь на ранее предоставленные данные и классификационные критерии, разработанные компанией. Для каждого функционального блока составляется предварительный список параметров, который может корректироваться экспертной комиссией с учетом специфики применения.

Каждый параметр состояния функционального блока оценивается по балльной шкале, которая указывает на степень отклонения фактических значений от максимально допустимых, определенных нормативно-технической документацией (НТД). Эта шкала служит для качественной оценки состояния функционального блока и оборудования в целом, отражая уровень соответствия выполняемым функциям.

«4» – отсутствует отклонение измеренных параметров от требований НТД, оборудование выполняет требуемые функции в полном объеме;

«3» – измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных в НТД, но появилась тенденция ухудшения значения такого параметра;

«2» – измеренные параметры находятся в пределах значений, определенных в НТД, но возникает угроза наступления отказов;

«1» – измеренные параметры находятся на уровне предельно-допустимых значений, определенных в НТД, оборудование выполняет требуемые функции не в полном объеме;

«0» – измеренные параметры находятся за пределами предельно-допустимых значений, определенных в НТД.

Для определения технического состояния конкретного функционального узла или сборочной единицы оборудования применяется следующее выражение:

$$ИТСУ = 100 \times \sum \frac{i(KB_i \times ОГП_i)}{4} \quad (1)$$

где:

KB_i – значение весового коэффициента для i -ой группы параметров технического

состояния;

$ОГП_i$ – балльная оценка i -ой группы параметров технического состояния.

Балльная оценка группы параметров ТС определяется как минимальная оценка технических параметров, входящих в данную группу. Для определения технического состояния всего оборудования применяется аналогичное выражение, где суммируются произведения весовых коэффициентов ($КВУ_i$) и индексов технического состояния ($ИТСУ_i$) каждого функционального узла или обобщенного узла:

$$ИТСУ = \sum (КВУ_i \times ИТСУ_i) \quad (2)$$

где:

$КВУ_i$ – значение весового коэффициента для i -го функционального узла или обобщенного узла;

$ИТСУ_i$ – индекс технического состояния i -го функционального узла или обобщенного узла.

В случае наличия у оборудования нескольких функциональных узлов одного вида для расчета ИС оборудования используется минимальный ИС среди таких функциональных узлов.

При эксплуатации могут появляться дефекты, которые незначительно влияют на индекс состояния и не учитываются по причине того, что дата расчета еще не наступила, признаки дефектов незначительные или произошли неожиданные события с высокими рисками, например, отказ оборудования. Однако попытка преждевременно устранить такие дефекты может привести к выходу оборудования из строя.

Для решения этой проблемы требуется внедрение дополнительных правил для определения ИС:

- если индекс ИС функционального узла превышает значение 0,25, но оценка 1 из параметров, влияющих на снижение ИС оборудования таких узлов, равна 0, то ИС таких узлов присваивается значение 0,25 (критическая и неудовлетворительная граница ТС).

- если общий индекс технического состояния оборудования превышает 0,50, а индекс технического состояния любого из его функциональных блоков не превышает 0,25, индекс технического состояния оборудования устанавливается равным 0,50, что соответствует пограничному состоянию неудовлетворенности и удовлетворения.

- если какой-либо из методов, используемых компанией для определения параметров транспортного средства, указывает на критическое состояние оборудования, независимо от значения ИС, в техническом описании этого метода такие параметры могут также включать показатели, отражающие состояние расходных материалов).

Приведенная выше модель может быть адаптирована при использовании для определения ИС сложных объектов электросетевого хозяйства (таких как подстанции), но это является предметом работы, которую можно рассмотреть в дальнейших статьях.

Газовые выключатели марки ВЭБ-110ИВ-40/2500-УХЛ1 относятся к классу группы «Электрооборудование», к классу оборудования «выключатели». Функциональными компонентами коммутационного аппарата являются работа контактных систем, систем изоляции, других коммутационных устройств и обобщенных узлов. Эти узлы содержат несколько групп параметров функциональных узлов и состоят из множества параметров, по которым оценивается состояние коммутационного аппарата.

В качестве примера был взят элегазовый выключатель марки ВЭБ-2-110ИВ-40/2500-УХЛ1, установленный на Казанской ТЭЦ-1.

Преимущества выключателя ВЭБ-2-110ИВ-40/2500-УХЛ1:

- использование элегаза (SF_6) в качестве дугогасительной среды, что обеспечивает высокую надежность и эффективность отключения дуги.

- компактная конструкция, упрощающая интеграцию в существующие системы.

- высокая степень автоматизации и совместимость с интеллектуальными системами управления.

- долговечность и низкие эксплуатационные расходы благодаря минимальному техническому обслуживанию.

Кроме того, в таблице 2 приведен расширенный ручной расчет показателя технического состояния для этого коммутатора.

Расчет индекса технического состояния ВЭБ-110IV-40/2500-УХЛ1

Функциональный узел	Составляющие	Параметр технического состояния	Расчетный индекс технического состояния
1	2	3	4
Контактная система	Состояние контактной системы	Аномальный локальный нагрев поверхности в зоне дугогасящей камеры камеры/верхнего фланца выключателя по результатам тепловизионного контроля	0,45
		Максимальное сопротивление контактной системы	0,33
		Тенденция изменения максимального сопротивления контактной системы от предыдущего измерения $\Phi_{пред}$	0,45
		Время включения выключателя	0,45
		Тенденция времени включения	0,45
		Время отключения выключателя	0,45
		Тенденция времени отключения	0,45
	Состояние внешних контактных соединений (кроме высоковольтных вводов)	Степень развития дефекта контактных соединений по результатам тепловизионного контроля	0,275
		Загрязнение контактных соединений	0,275
		Окисление контактных соединений	0,275
		Неисправность контактных соединений	0,275
	Ресурс	Механическая износостойкость (механический ресурс)	0,275
		Коммутационная износостойкость (коммутационный ресурс)	0,275
Изоляционная система	Состояние внешней изоляции подвижных частей	Трещина фарфоровой покрывки	0,5
		Сколы фарфоровой покрывки/внешней изоляции	0,5
	Состояние элегаза (или смеси элегаза)	Срабатывание датчика плотности элегаза 1 ступени	0,5
		Пониженное давление элегаза в полюсе (более чем на 5%) по сравнению с другими полюсами	0,5
		Повышенное давление элегаза (более чем на 5%)	0,5
		Неисправность сигнализатора плотности %	0,5
Прочее оборудование	Неисправности «механической части»	Неисправность заводного устройства	0,5
		Неисправность механизма включения/отключения	0,5
		Недопустимая деформация металлоконструкций	0,5
		Неисправность указателя положения	0,5
		Разрушение сварных швов положения	0,5
		Сквозная коррозия	0,5
		Неисправность денсиметра	0,5
	Неисправности «электрической части»	Неисправность блок- контактов	0,5
		Неисправность обогрева полюсов выключателя	0,5
		Неисправность обогрева привода выключателя	0,5
		Нарушение заземления выключателя	0,5
		Повреждение пусковых электромагнитов управления	0,5
		Срок службы (за исключением высоковольтных вводов)	0,5
Обобщенный узел			

ИТС элегазового выключателя ВЭБ-110 согласно формулам 1 и 2 составил: 87,7875

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

В ходе исследования произведен «ручной» расчет ИТС выключателя ВЭБ-110. ИТС выключателя составил 87,7875, что соответствует очень хорошему состоянию оборудования. Результаты «ручного» расчета будут эталонными значениями для проверки достоверной работы программы, приведенной в следующей главе.

Определение индекса технического состояния представляет собой сложный процесс, требующий обработки большого объема данных. Исходные данные зачастую задаются человеком, что может привести к субъективным ошибкам. Устранение этих ошибок может существенно повысить точность оценки состояния оборудования.

Основные причины ошибок на этапах оценки состояния оборудования включают:

- многократную передачу данных между различными информационными средами, что может повлечь искажение значений;
- «ручной» расчет параметров, их групп и функциональных узлов;
- округление результатов во время расчета.

В таблице 3 представлены действия специалистов при оценке состояния оборудования и возможные источники ошибок в этих процессах.

Использование современных информационных технологий, включая программное обеспечение и автоматизированные рабочие станции, способствует значительному снижению или даже полному исключению ошибок. Программные разработки эффективно устраняют ошибки, возникающие на этапах от третьего до шестого, так как обработка измерений и их сопоставление с нормативными показателями осуществляется по заранее заданным в программе алгоритмам и формулам. Кроме того, при вычислении индекса состояния с помощью программных средств данные не округляются. Это позволяет получить более точное значение индекса и обеспечивает формирование более надежных управляющих решений.

Таблица 3

Возникновение погрешности на этапах оценки ТС		
Этапы	Операции	Факторы возникновения погрешности
1	Считывание данных с измерительных приборов	Ошибка считывания (разрядность, «зависание» прибора, недостающие данные)
2	Внесение данных в журнал	Ошибка фиксации (неверная запись считанного значения)
3	Перевод единиц измерения (при необходимости)	Ошибка перевода
4	Приведение измеренных значений к стандартным условиям	Ошибка приведения к стандартным условиям, округление значений
5	Сравнение приведенных значений с нормативными параметрами	Ошибка сравнения
6	Заключение оценки технического состояния	Формирование ложного заключения

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

Вероятность возникновения погрешности на 2 этапе остается и обусловлена необходимостью переноса человеком данных измерений, зафиксированных в журнале на месте установки оборудования, в программу. В дальнейшем можно исключить появление этой погрешности, если еще больше оптимизировать расчет таким образом, что ИТС будет рассчитываться в момент реального времени. Как уже говорилось ранее, это реализуется путем установки датчиков, измерительных приборов непосредственно на оборудование и данные измерений передаются в какой-то центральный узел, откуда автоматически «сажаются» на ячейки программы. Тем самым программа проводит расчет, и в каждый момент времени можем наблюдать индекс технического состояния оборудования. В этом случае, не будет неточностей при вводе исходных данных в программу и при переносе данных с журнала, так как данные автоматически будут считываться из измерительных приборов.

Разработка программы для расчета ИТС выключателей имеет потенциал существенно снизить количество возникающих ошибок, связанных с оценкой их состояния. Этот шаг не только минимизирует вероятность неточностей, но и создаёт основу для дальнейшего развития и улучшения системы мониторинга и диагностики технического состояния выключателей. Автоматизация данного процесса открывает новые перспективы для более точного и надежного анализа, что, в свою очередь, окажет положительное влияние на эффективность всей электрической сети. Инновационные технологии и алгоритмы, заложенные в программе, будут способствовать не только улучшению текущих показателей, но и позволят адаптироваться к будущим изменениям и требованиям в области энергетики. Таким образом, создание и внедрение этой программы станет важным шагом на пути к расширенной цифровизации и модернизации технических процессов в энергетике.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Программа для автоматизированного расчета Индекса Технического Состояния (ИТС) была создана в среде программирования Delphi7. Ее принцип работы можно описать следующим образом:

1. Оператор вводит в программу первоначальные данные, которые получены из

протоколов диагностики и испытаний оборудования.

2. Программа определяет ИТС и предлагает соответствующие меры управления, такие как:

- Вывод оборудования из эксплуатации, его техническое перевооружение или реконструкция;
- Проведение дополнительного технического обслуживания и ремонта, усиление контроля за техническим состоянием, обновление оборудования;
- Усиление контроля за состоянием, проведение капитального ремонта или реконструкции;
- Действия на основе результатов планового диагностирования;
- Проведение планового диагностирования.

3. Оператору предоставляется окно с индексами технического состояния всех единиц оборудования, сгруппированными по уровню их важности. Здесь учитывается значимость оборудования на объектах, таких как подстанции и электростанции, поскольку сбои в работе ключевых элементов могут привести к значительным финансовым потерям и серьезным авариям в энергосистеме. Таким образом, необходимо на каждом объекте определять индекс важности оборудования.

Схематичное изображение работы программы представлено на рисунке 1.

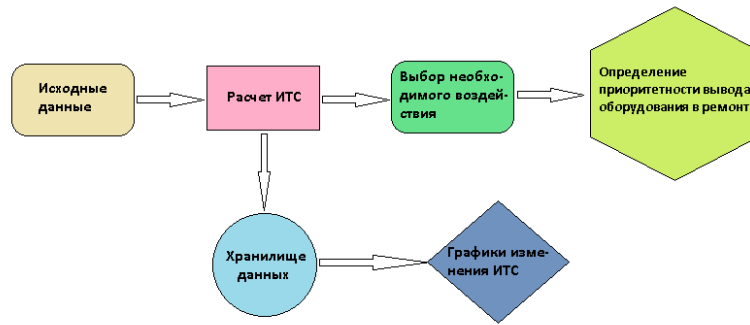


Рис. 1. Алгоритм работы программы

Fig. 1. Program operation algorithm

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

Таким образом, исходя из информации о важности оборудования, а также о его индексе технического состояния и категории приоритетности оборудования осуществляется ранжирование оборудования по первоочередности включения в план ТОиР.

Окно работы программы выглядит следующим образом (рис. 2):

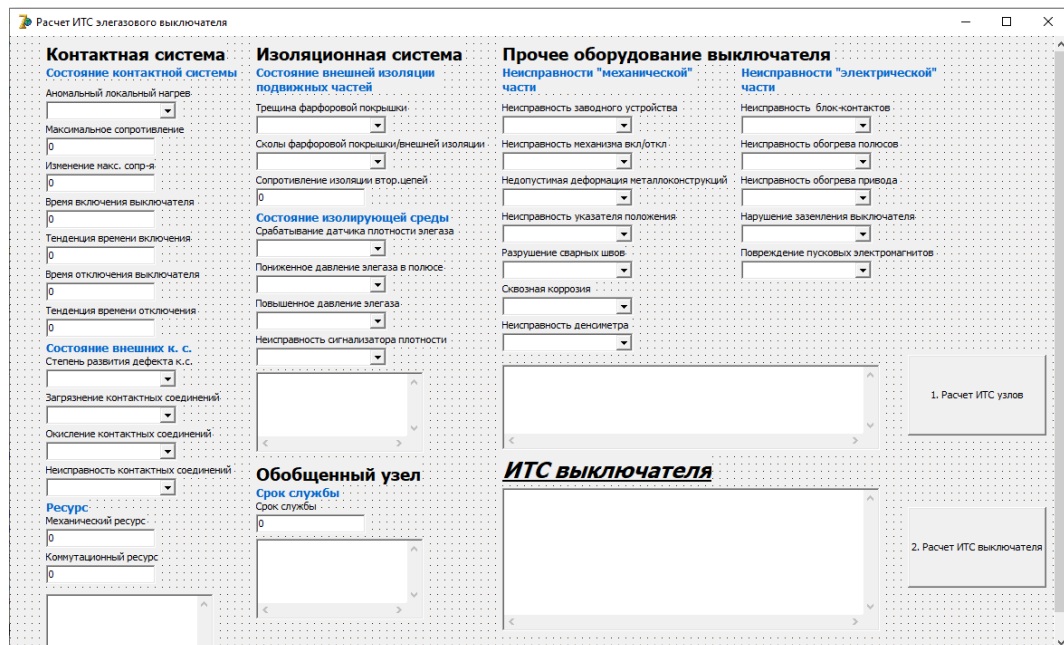


Рис. 2. Окно работы программы

Fig. 2. Program window

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

После ввода оператором всех исходных данных, нажимаем кнопку «Расчет ИТС узлов» для расчета индекса каждого функционального узла и вывода этих значений в поля мемо. Далее нажатием кнопки «Расчет ИТС выключателя» рассчитывается ИТС выключателя и выводится в поле мемо результат расчета и рекомендации по дальнейшей эксплуатации выключателя.

Результаты расчета ИТС элегазового выключателя ВЭБ-110 показаны на рисунке 3. Значение ИТС выключателя получилось в точности таким же, как и при «ручном» расчете, что говорит о том, что программа работает достоверно. Для визуального восприятия дополнительно в поле мемо применяется заливка.

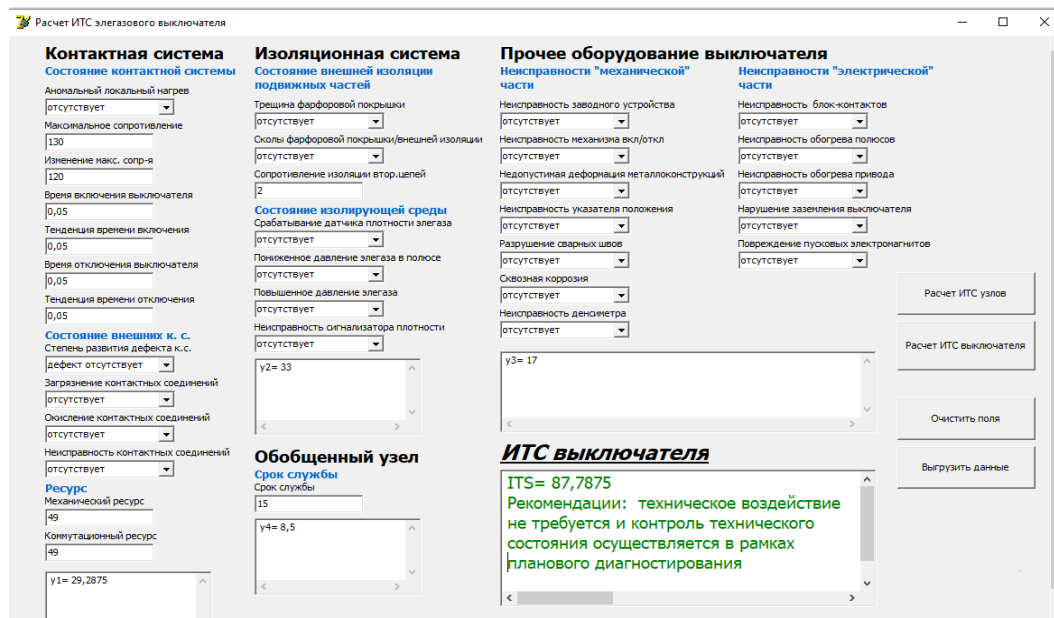


Рис. 3. Пример расчета ИТС выключателя ВЭБ-110 Fig. 3. Example of calculation of the ITS of the VEB-110 circuit breaker

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

Программа расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей – это важный инструмент для обеспечения надлежащей работы электрооборудования. Для создания такой программы необходимо определить набор параметров, которые будут влиять на оценку состояния выключателей, а также разработать математические модели и алгоритмы для проведения расчетов.

Часть кода представлена на рисунке 4.

```

if m/10000>=1 then x12:=0;
if (m/10000<0.9) or((m/10000>=0.9) and (m/10000<1)) then x12:=0.1375;
if m/10000<0.9 then x12:=0.275;
//memo1.Lines.Add('x12 = '+FloatToStr(x12));
k:=strtoint(edit8.Text); //проверить сами условия
if k/5000>=1 then x13:=0;
if (k/5000<0.9) or((k/10000>=0.9) and (k/5000<1)) then x13:=0.1375;
if (k/5000<0.9) then x13:=0.275;
//memo1.Lines.Add('x13 = '+FloatToStr(x13));
//сравниваем
min1:=x1;
if x2<x1 then min1:=x2;
if x3<x2 then min1:=x3;
if x4<x3 then min1:=x4;
if x5<x4 then min1:=x5;
if x6<x5 then min1:=x6;
if x7<x6 then min1:=x7;
//memo1.Lines.Add('min1 = '+FloatToStr(min1));
min2:=x8;
if x9<x8 then min2:=x9;
if x10<x9 then min2:=x10;
if x11<x10 then min2:=x11;
//memo1.Lines.Add('min2 = '+FloatToStr(min2));
min3:=x12;
if x13<x12 then min3:=x13;
//memo1.Lines.Add('min2 = '+FloatToStr(min2));
y1:=(min1+min2+min3)*100*0.33;
memo1.Lines.Add('y1 = '+FloatToStr(y1));
//изоляция система
//внешняя изоляция
if combobox6.ItemIndex=0 then x14:=0.5;
if combobox6.ItemIndex=1 then x14:=0.25;
//memo2.Lines.Add('x14 = '+FloatToStr(x14));
if combobox7.ItemIndex=0 then x15:=0.5;
if combobox7.ItemIndex=1 then x15:=0.375;
//memo2.Lines.Add('x15 = '+FloatToStr(x15));
r1:=strtofloat(edit9.Text); //проверить сами условия
if r1/1>=1 then x16:=0;
if (r1/1=1) or((r1/1>1) and (r1/1<1.1)) or (r1/1=1.1) then x16:=0.25;
if r1/1>1.1 then x16:=0.5;
    
```

Рис. 4. Часть кода программы для расчета ИТС Fig. 4. Part of the program code for calculating ITS

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

Внедрение вышеописанного алгоритма расчета ИТС позволит персоналу намного оперативнее получить информацию по состоянию элегазовых выключателей. Одним из основных преимуществ будет сокращение времени, затрачиваемого на проведение

расчетов индекса технического состояния элегазовых выключателей. Это позволит снизить трудозатраты специалистов и повысить производительность труда.

Для оценки экономического эффекта необходимо провести сравнительный анализ затрат на проведение расчетов до и после внедрения разработанного алгоритма, а также оценить экономические последствия возможных аварийных ситуаций, которые могли бы быть предотвращены благодаря автоматизированному расчету.

Экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 кВ можно рассчитать по следующей формуле:

Экономический эффект = Затраты на трудоемкость расчетов до внедрения программы - Затраты на трудоемкость расчетов после внедрения программы.

К примеру, на Казанской ТЭЦ-2 данный расчет выполняет инженер производственно-технического отдела. Заработная плата в среднем составляет 60000 рублей в месяц. Допустим, среднее количество рабочих часов в месяц составляет 160 часов. Тогда можем определить сколько стоит час работы инженера, который занимается расчетом ИТС, он составит 375 руб./час.

Для расчета индекса технического состояния одного элегазового выключателя необходимо 2 часа рабочего времени. Тогда получим 750 руб. Элегазовых выключателей на напряжение 110 кВ на Казанской ТЭЦ-2 всего 21 штук. Тогда для расчета ИТС 21 выключателя необходимо 15750 руб. в месяц.

После внедрения программы расчета ИТС на проведение расчета понадобится полчаса рабочего времени. Это в 4 раза меньше, чем при ручном расчете ИТС выключателей.

Тогда экономия за месяц составит 11812,5 руб. Учитывая, что расчет индекса технического состояния электрооборудования проводится ежемесячно, полученное значение умножим на количество месяцев в году и получим 141750 руб./год.

Таким образом, приходим к выводу, что при внедрении данной программы на производстве предприятие сэкономит кучу рабочего времени, которую можно направить на решение других важных вопросов, и 141750 рублей в год.

Также здесь стоит учитывать увеличение точности расчетов – экономии, полученную за счет повышения качества и точности расчетов индекса технического состояния. Автоматизация процесса позволяет значительно снизить (практически исключить) погрешности, которые с большей вероятностью могут возникнуть при ручном расчете.

Для оценки экономического эффекта необходимо провести сравнительный анализ затрат на проведение расчетов до и после внедрения разработанного алгоритма, а также оценить экономические последствия возможных аварийных ситуаций, которые могли бы быть предотвращены благодаря автоматизированному расчету. Также следует учитывать стоимость разработки и внедрения алгоритма, обучение персонала, поддержку и обновление системы. После анализа всех этих факторов можно оценить общий экономический эффект от внедрения разработанного алгоритма.

Заключение (Conclusions)

Автоматизация процессов представляет собой разработку специализированного программного обеспечения или инструментов, которые могут значительно ускорить и упростить выполнение задач, ранее требующих участия человека, таких как расчет Индекса Технического Состояния (ИТС). Использование автоматизации в этом контексте позволяет не только оперативно и эффективно вычислять ИТС, но и практически исключает риски возникновения ошибок, которые часто присущи ручным расчетам.

Предлагаемая программа занимается не только расчетом ИТС, но также производит аналитику полученных результатов. Она рекомендует управляющие меры, основываясь на значении индекса. Помимо этого, информация о важности оборудования, его техническом состоянии и приоритетности позволяет системе автоматически ранжировать оборудование по степени необходимости включения в план технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Внедрение подобной программы имеет множество преимуществ. Во-первых, это значительное сокращение времени, необходимого для проведения сложных расчетов. Во-вторых, точность расчетов обеспечивается на самом высоком уровне за счет минимизации человеческого фактора и его ошибок. Наконец, такой подход позволяет оптимизировать затраты, как временные, так и финансовые, что немаловажно в условиях современного бизнеса и производства.

Литература

1. Латыпова, А. А. Разработка алгоритма автоматизированного расчета индекса технического состояния элегазовых выключателей 110 КВ / А. А. Латыпова // Научная деятельность в условиях цифровизации: теоретический и практический аспекты : Сборник статей Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 01 июня 2024 года. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. – С. 46-49.
2. Zhang Y., Wang L., Chen J., et al. Overview of SF6 Circuit Breakers: Development, Diagnosis, and Challenges // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 800–812.
3. Gomes P., Silva R., Santos M., et al. Condition Monitoring of SF6 Circuit Breakers: Parameter Analysis and Practical Implementations // Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 71, No. 3. P. 245–256.
4. Назарычев, А. Н. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования / А. Н. Назарычев, Д. А. Андреев // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : в 2-х книгах, Ташкент, 23–27 сентября 2019 года / Ответственный редактор Воропай Н.И. Том Книга 1, Выпуск 70. – Ташкент: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2019. – С. 316-326. – EDN LKPEPR.
5. Jiang X., Li H., Wu Z., et al. Integration of Multiple Sensors for Condition Assessment of High-Voltage Circuit Breakers // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 193. Article ID 106923.
6. Мезин С.В., Благодичнов А.В., Милитонян Ш.М., Агринская С.А. Разработка нового подхода к оценке технического состояния оборудования для целей создания экспертных систем // Вестник МЭИ. 2023. № 4. С. 146—154. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-4-146-154
7. Хальясмаа, А. И. Разработка системы оценки технического состояния электросетевого оборудования на основе нейро-нечеткого логического вывода: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / А. И. Хальясмаа. – Екатеринбург : [б. и.], 2015. – 24 с.
8. Лукьянов, М. Р. Алгоритм программно-технического комплекса для расчета индекса технического состояния электрооборудования и выбора управляющего воздействия / М. Р. Лукьянов // НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ студентов и УЧАЩИХСЯ: сборник статей Международной научно-практической конференции в 2 частях, Пенза, 30 мая 2021 года. Том Часть 1. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 41-44. – EDN AUFHQI.
9. Liu H., Zhao Y., Wei X., et al. Machine Learning Applications in Condition Monitoring of High Voltage Equipment // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 41401–41411.
10. Fernandez R., Torres D., Alvarez S., et al. IoT-based Monitoring and Diagnostics for High Voltage Equipment: A Case Study on SF6 Breakers // Energy Informatics. 2022. Vol. 5, No. 1. Article ID 9.
11. Zhang, Xihai & Zhang, Fangfang & Junhe, Wan & Kou, Lei & Ke, Wende. (2022). Review on Evolution of Intelligent Algorithms for Transformer Condition Assessment. Frontiers in Energy Research. 10. 10.3389/fenrg.2022.904109.
12. Сташко Василий Иванович, Белицын Игорь Владимирович, Побединский Георгий Александрович АКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ // European research. 2020. №1 (37).
13. Mendoza J., Fernandez P., Morales A., et al. Automated Monitoring Systems for High-Voltage SF6 Breakers // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 129. Article ID 109911.
14. Chen L., Zhou Q., Huang B., et al. Smart Diagnostic Techniques for Extending the Life of HV Circuit Breakers // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 3612–3623.
15. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical Model of the Processes of Restoration of Power Equipment in Power Systems by Criterion of the Index of Technical Condition. J. Phys.: Conf. Series. 2020;1683:040241.
16. Виноградов А. В., Лансберг А. А. АНАЛИЗ ПАРКА И ОЦЕНКА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 10 КВ ФИЛИАЛА ПАО "РОССЕТИ ЦЕНТР" - "ОРЕЛЭНЕРГО" // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2022. №5.
17. Балобанов Руслан Николаевич, Булатова Венера Михайловна, Крючков Никита Сергеевич, Шафиков Ильмир Ильдарович ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2024. №4.

Авторы публикации

Балобанов Руслан Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции им В.К. Шибанова», Казанский государственный технический университет, E-mail: rassel_ipek@mail.ru

Латыпова Алсу Алмазовна – инженер ПТО, Филиал АО «Татэнерго» Казанская ТЭЦ-2

References

1. Latypova, A. A. Razrabotka algoritma avtomatizirovannogo rascheta indeksa tekhnicheskogo sostoiانيا elegazovykh vykliuchatelei 110 KV / A. A. Latypova // Nauchnaia deiatelnost v usloviakh tsifrovizatsii: teoreticheskii i prakticheskii aspekty : Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Ekaterinburg, 01 iunia 2024 goda. – Ufa: OOO "Aeterna", 2024. – S. 46-49.
2. Zhang Y., Wang L., Chen J., et al. Overview of SF6 Circuit Breakers: Development, Diagnosis, and Challenges // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. Vol. 34, No. 2. P. 800–812.
3. Gomes P., Silva R., Santos M., et al. Condition Monitoring of SF6 Circuit Breakers: Parameter Analysis and Practical Implementations // Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 71, No. 3. P. 245–256.
4. Nazarychev, A. N. Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya / A. N. Nazarychev, D. A. Andreev // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki : v 2-h knigah, Tashkent, 23–27 sentyabrya 2019 goda / Otvetstvennyj redaktor Voropaj N.I. Tom Kniga 1, Vypusk 70. – Tashkent: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie nauki Institut sistem energetiki im. L.A. Melent'eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk, 2019. – S. 316-326. – EDN LKPEPR.
5. Jiang X., Li H., Wu Z., et al. Integration of Multiple Sensors for Condition Assessment of High-Voltage Circuit Breakers // Electric Power Systems Research. 2021. Vol. 193. Article ID 106923.
6. Mezin S.V., Blagochinnov A.V., Militonian S.H.M., Agrinskaya S.A. Razrabotka novogo podhoda k ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya dlya celej sozdaniya ekspertnykh sistem // Vestnik MEI. 2023. № 4. S. 146—154. DOI: 10.24160/ 1993-6982-2023-4-146-154
7. Hal'yasmaa, A. I. Razrabotka sistemy ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrossetevogo oborudovaniya na osnove nejro-nechetkogo logicheskogo vyvoda: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.02 / A. I. Hal'yasmaa. – Ekaterinburg : [b. i.], 2015. – 24 s.
8. Luk'yanov, M. R. Algoritm programmno-tekhnicheskogo kompleksa dlya rascheta indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya i vybora upravlyayushchego vozdeystviya / M. R. Luk'yanov // NAUCHNYE ISSLEDOVANIYA studentov i UCHASHCHIHSYA: sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferentsii v 2 chastyah, Penza, 30 maya 2021 goda. Tom CHast' 1. – Penza: Nauka i Prosveshchenie, 2021. – S. 41-44. – EDN AUFHQI.
9. Liu H., Zhao Y., Wei X., et al. Machine Learning Applications in Condition Monitoring of High Voltage Equipment // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 41401–41411.
10. Fernandez R., Torres D., Alvarez S., et al. IoT-based Monitoring and Diagnostics for High Voltage Equipment: A Case Study on SF6 Breakers // Energy Informatics. 2022. Vol. 5, No. 1. Article ID 9.
11. Zhang, Xihai & Zhang, Fangfang & Junhe, Wan & Kou, Lei & Ke, Wende. (2022). Review on Evolution of Intelligent Algorithms for Transformer Condition Assessment. *Frontiers in Energy Research*. 10. 10.3389/fenrg.2022.904109.
12. Stashko Vasilij Ivanovich, Belicyn Igor' Vladimirovich, Pobedinskij Georgij Aleksandrovich AKTUAL'NYE TEKHNologii CIFROVIZACII ELEKTROSETEVYH OB"EKTOV // European research. 2020. №1 (37).
13. Mendoza J., Fernandez P., Morales A., et al. Automated Monitoring Systems for High-Voltage SF6 Breakers // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 129. Article ID 109911.
14. Chen L., Zhou Q., Huang B., et al. Smart Diagnostic Techniques for Extending the Life of HV Circuit Breakers // IEEE Transactions on Smart Grid. 2021. Vol. 12, No. 4. P. 3612–3623.
15. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical Model of the Processes of Restoration of Power Equipment in Power Systems by Criterion of the Index of Technical Condition. *J. Phys.: Conf. Series*. 2020;1683:040241.
16. Vinogradov A. V., Lansberg A. A. ANALIZ PARKA I OCENKA KOMMUTACIONNOGO RESURSA VYKLYUCHATELEJ 10 KV FILIALA PAO "ROSSETI CENTR" - "ORELENERGO" // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2022. №5.
17. Balobanov Ruslan Nikolaevich, Bulatova Venera Mihajlovna, Kryuchkov Nikita Sergeevich, SHafikov Il'mir Il'darovich OPTIMIZACIYA SISTEM MONITORINGA SILOVYH KABEL'NYH LINIJ // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2024. №4.

Authors of the publication

Ruslan N. Balobanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: rassel_ipek@mail.ru

© Балобанов Р.Н., Латыпова А.А.

Alsu A. Latypova – Branch of JSC «Tatenergo» Kazan CHPP-2, Kazan, Russia. E-mail: alsuu_es@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено **18.09.2024 г.**

Отредактировано **02.10.2024 г.**

Принято **11.11.2024 г.**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 620.9

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-147-156

УТИЛИЗАЦИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ТЭЦ

Зверева Э.Р., Марьин Г.Е., Ишалин А.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

belvira6@list.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка технических решений для утилизации пара вторичного вскипания для снижения потерь тепловой энергии, пара и конденсата ТЭЦ. *МЕТОДЫ.* Были проведены сравнительные исследования вариантов утилизации, предложено несколько схем по конденсации низкопотенциальных источников энергии. Рассчитан экономический эффект от предложенных технических решений по утилизации паровых выбросов установок ТЭЦ. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Для определения технических характеристик вспомогательного оборудования были проведены расчеты по количеству охлаждающей жидкости. В зимний период работы установки – источнике паровых выбросов, при минимальном расходе выпара 2,5 т/ч – для охлаждения и последующей конденсации пара необходимо порядка 10,99 т/ч охлаждающей воды (сетевой воды); при максимальном расходе выпара 5 т/ч – 21,99 т/ч охлаждающей воды (сетевой воды) соответственно. По результатам расчетов выбран кожухотрубчатого теплообменник ОВА-16, площадь поверхности теплообмена, которого равна 16 м². При реализации предложенных технических решений по утилизации выпара рассчитан экономический эффект, который составил: – при минимальном расходе выпара 2,5 т/ч на нагрев сетевой воды, в течение отопительного периода (в среднем 245 дней) 82320-98020 рублей; при максимальном расходе выпара 5 т/ч 164640-184044 рублей соответственно.

Ключевые слова: модернизация; тепловая электрическая станция; энергоэффективность; КПД; утилизация низкопотенциальной энергии; паровые выбросы; теплообменник.

Для цитирования: Зверева Э.Р., Марьин Г.Е., Ишалин А.В. Утилизация низкопотенциальных источников энергии ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 147-156. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-147-156.

UTILIZATION OF LOW-POTENTIAL THERMAL POWER PLANT ENERGY SOURCES

Zvereva E.R., Marin G.E. Ishalin A.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

belvira6@list.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Development of technical solutions for the utilization of secondary boiling steam to reduce losses of thermal energy, steam and condensate of CHP plants. *METHODS.* Comparative studies of disposal options were conducted, and several schemes for condensation of low-potential energy sources were proposed. The economic effect of the proposed technical solutions for the utilization of steam emissions from CHP plants is calculated. *RESULTS.* To determine the technical characteristics of the auxiliary equipment, calculations were carried out on the amount of coolant. During the winter period of operation of the installation - a source of steam emissions, with a minimum evaporation rate of 2.5 t/h - about 10.99 t/h of cooling water (mains water) is needed for cooling and subsequent condensation of steam; with a maximum evaporation rate of 5 t/h - 21.99 t/h of cooling water (mains water),

respectively. According to the calculation results, the OVA-16 shell-and-tube heat exchanger was selected, the heat exchange surface area of which is 16 m². When implementing the proposed technical solutions for the disposal of evaporation, the economic effect was calculated, which amounted to: - with a minimum evaporation consumption of 2.5 t/h for heating mains water, during the heating period (on average 245 days) 82320-98020 rubles; with a maximum evaporation consumption of 5 t/h) 164640-184044 rubles, respectively.

Keywords: modernization; thermal power plant; energy efficiency; efficiency; utilization of low-potential energy; steam emissions; heat exchanger.

For citation: Zvereva E.R., Marin G.E. Ishalin A.V. Utilization of low-potential thermal power plant energy sources. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (6): 147-156. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-147-156.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature review)

Энергоемкость является одним из ключевых показателей состояния развития промышленности стран. По данным Мирового энергетического агентства (МЭА), по уровню энергоемкости Россия располагается на 136 месте среди 146 стран мира [1-2]. Важнейшими причинами высокой энерго- и материалоемкости экономики России являются структура российской экономики с преобладанием в ней сырьевых отраслей, сильной изношенности основных фондов, их технологической отсталостью и др. Значительное снижение энергоемкости предприятия возможно при внедрении энергосберегающих мероприятий. По расчетам Института энергетической стратегии общий суммарный потенциал только технологического и организационного энергосбережения равняется в России 40–45 % [3] от всего энергопотребления.

Большой проблемой в настоящее время для промышленных предприятий и для предприятий энергетики являются устаревшие технологии и оборудование. Однако, в результате внедрения энергосберегающих технологий, на энергетических предприятиях существует возможность выработки дополнительной электроэнергии за счет собственных ресурсов.

Экологическую угрозу теплового загрязнения окружающей среды создают источники паровых выбросов ТЭЦ в атмосферу, несущие огромные потери тепла и конденсата, поэтому проблема утилизации паровых выбросов является актуальной [4-6].

В настоящее время на предприятиях большое количество низкопотенциального пара выбрасывается в атмосферу, что значительно повышает энергоемкость производства, ухудшает экологическую безопасность генерирующих предприятий [7].

Паровые выбросы [3] образуются с пролетным паром (например, при создании паровой подушки в баках-аккумуляторах систем теплоснабжения и горячего водоснабжения), либо в результате вскипания перегретых жидкостей (при сбросе горячего конденсата в конденсатный бак), а также могут являться комбинацией обоих случаев (продувочная пароводяная смесь паровых котлов). Выброс низкопотенциального пара в атмосферу. Образовавшийся в технологических процессах низкопотенциальный водяной пар, зачастую сбрасывается в атмосферу. При этом, содержащиеся в паре тепло и дорогостоящая химически очищенная вода теряются, что приводит к снижению технико-экономических показателей тепловой электростанции, а также разрушаются конструкции сооружений в зоне сброса выпаров [8-9].

Таким образом, утилизация тепла и конденсата паровых выбросов является важной составляющей современного энергетического и промышленного производства. Отходы, образованные в процессе выработки пара, могут быть возвращены в цикл для снижения энергоемкости производства и снижения его экологического ущерба окружающей среде [10].

Технология утилизации паровых выбросов должна разрабатываться индивидуально, с учетом конкретных условий и на основе комплексного подхода.

Материалы и методы (Materials and methods)

В настоящее время на производстве наибольшее распространение получили следующие способы утилизации тепла и конденсата паровых выбросов:

1. Утилизация тепла паровых выбросов.

Один из наиболее распространенных способов утилизации тепла паровых выбросов – использование систем теплового насоса, который позволяет извлечь тепло из паровых выбросов и передать его в другую систему, например, для обогрева воды или помещений.

Такой подход позволяет значительно увеличить энергоэффективность производства и снизить затраты на энергию [11-12].

Кроме того, тепло паровых выбросов может быть использовано для генерации электроэнергии. Такое решение особенно актуально для крупных промышленных предприятий, где происходит выработка большого количества пара.

2. Утилизация конденсата паровых выбросов.

Конденсат, образующийся при охлаждении паровых выбросов, также является ценным ресурсом, который можно использовать повторно: конденсат может быть возвращен в систему парообразования или использован для нагрева воды. Одним из методов утилизации конденсата является его возвращение в систему подпитки, что позволяет сэкономить на пресной воде и снизить затраты на обработку сточных вод. Конденсат также может быть использован для предварительного нагрева входящей в процесс сырьевой жидкости, что позволяет снизить затраты на нагрев воды.

Таким образом, утилизация тепла и конденсата паровых выбросов является способом повышения эффективности, снижения энергоемкости и экологического воздействия предприятия на окружающую среду. Утилизация тепла позволяет извлечь тепловой потенциал из паровых выбросов и использовать его для различных производственных процессов. Конденсат паровых выбросов также может быть использован повторно, что позволяет сэкономить на химически очищенной воде и снизить затраты на обработку сточных вод.

Результаты (Results)

В настоящее время утилизация низкопотенциального тепла является перспективным направлением в энергетике. Целью данной работы является разработка системы утилизации тепла паровых выбросов установок предприятий.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- разработка схемы утилизации пара;
- выбор оборудования;
- оценка экономической выгоды от внедрения данной системы утилизации.

В данной работе рассмотрена проблема утилизации выпара из расширителей конденсата, и здесь предложено несколько вариантов:

1 – это способы утилизации, связанные с покупкой дорогостоящего оборудования и усложнением цикла при утилизации. Примером могут служить тепловые насосы, АБХМ (абсорбционно-холодильные машины), при этом важно отметить, что использование дополнительной энергии и усложнение цикла приводит к увеличению затрат на собственные нужды [13-17].

2 – это способы утилизации выпара с помощью различного теплообменного оборудования.

Важно отметить что в течении года количество низкопотенциального пара для утилизации меняется, это обусловлено тем что в зимний период пар может является пароспутником. В летний период расходы пара будут минимальны.

Для теплообменного оборудования важно наличие двух контуров, греющего и нагреваемого. В качестве охлаждающих жидкостей на тепловой станции могут выступать техническая, сетевая, подпиточная вода.

Выпар предлагается конденсировать с помощью теплообменного оборудования, и в качестве охлаждающей среды использовать сетевую или техническую воду. Сконденсированный пар, в виде конденсата предлагается возвращать в цикл.

Была разработана технологическая схема, позволяющая работать на двух видах рабочего тела: в зимний период использовать сетевую воду, а в летний период переходить на техническую воду для охлаждения. При охлаждении будет получена дополнительная тепловая энергия, которая в зимний период будет сохранена в сетевой воде, в летний период она будет потеряна (при переходе на техническую воду).

В данной работе рассмотрена система охлаждения паровых выбросов баков запаса конденсата на действующей ТЭЦ.

Исходными данными для разработки методов утилизации выпара являются:

1. Расход выпара в летний период – 2,5т/ч;
2. Расход выпара в зимний период – 2,5-5 т/ч;
3. Температура выпара – 105⁰С;
4. Температура технической воды в летний период – 25⁰С;
5. Температура обратно сетевой воды принята – 55⁰С.

Для определения технических характеристик вспомогательного оборудования были проведены расчеты по количеству охлаждающей (сетевой) жидкости. Физические параметры теплоносителей определялись при их средних температурах [18].

1. В зимний период работы установки – источнике паровых выбросов, при минимальном расходе выпара 2,5 т/ч.

Средняя температура выпара составит:

$$t_{p,вп} = 0,5(t_1 + t_2) = 87,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_1 = 105^\circ\text{C}$ – температура выпара на входе в теплообменник;

$t_2 = 70^\circ\text{C}$ – температура конденсата на выходе из теплообменника (данная температура выбрана как минимально возможная для возврата в бак запаса конденсата, исключающая гидроудары).

Средняя температура воды составит:

$$t_{в,ср} = 0,5(t_3 + t_4) = 60 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_3 = 50^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей воды на входе в теплообменник;

$t_{в,ср} = 60^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей воды на выходе из теплообменника.

Тепловая нагрузка теплообменника:

$$Q = G_p * C_{рп}(t_1 - t_2) = 192500 \text{ Вт},$$

где G_p – расход пара (т/ч); $C_{рп}$ – теплоемкость пара (Дж/(кг* $^\circ\text{C}$)).

Расход охлаждающей воды:

$$G_в = Q / C_p * (t_4 - t_3),$$

где C_p – теплоемкость воды (Дж/(кг* $^\circ\text{C}$));

t_3 – температура охлаждающей воды на входе в теплообменник;

t_4 – температура охлаждающей воды на выходе теплообменника.

$$G_в = 3,05 \text{ кг/с} = 10,99 \text{ т/ч}$$

Таким образом, для охлаждения и последующей конденсации пара необходимо порядка 10,99 т/ч охлаждающей воды (сетевой воды).

2. В зимний период работы установки – источнике паровых выбросов, при максимальном расходе выпара 5 т/ч.

Средняя температура выпара:

$$t_{p,вп} = 0,5(t_1 + t_2) = 87,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_1 = 105^\circ\text{C}$ – температура выпара на входе в теплообменник;

$t_2 = 70^\circ\text{C}$ – температура конденсата на выходе из теплообменника (данная температура выбрана как минимально возможная для возврата в бак запаса конденсата, исключающая гидроудары).

Средняя температура воды:

$$t_{в,ср} = 0,5(t_3 + t_4) = 60 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t_3 = 50^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей воды на входе в теплообменник;

$t_{в,ср} = 60^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей воды на выходе из теплообменника.

Тепловая нагрузка теплообменника:

$$Q = G_p * C_{рп}(t_1 - t_2) = 385000 \text{ Вт},$$

где G_p – расход пара (т/ч),

$C_{рп}$ – теплоемкость пара (Дж/(кг* $^\circ\text{C}$)).

Расход охлаждающей воды составит:

$$G_в = Q / C_p * (t_4 - t_3),$$

где C_p – теплоемкость воды (Дж/(кг* $^\circ\text{C}$)),

t_3 – температура охлаждающей воды на входе в теплообменник,

t_4 – температура охлаждающей воды на выходе теплообменника.

$$G_в = 6,11 \text{ кг/с} = 21,99 \text{ т/ч}$$

Таким образом, для охлаждения и последующей конденсации пара необходимо порядка 21,99 т/ч охлаждающей воды (сетевой воды).

Важно отметить, что при реализации такой схемы будет получена дополнительная тепловая энергия и конденсат. В зависимости от температурного графика теплосети, средний период в течении которого может работать данная схема составляет от 210 до 245 дней. При отключении теплосети необходимо рассмотреть вариант с использованием технической воды в качестве охлаждающей жидкости.

Для охлаждения выпара должна использоваться охлаждающая (сетевая) вода, удовлетворяющая требованиям по эксплуатации оборудования (табл. 1, 2).

Эффективность охлаждения напрямую зависит от количества загрязнений на внутренней поверхности стенок теплообменника. В таблице 1 представлены средние значения тепловой проводимости в зависимости от качества используемой воды.

Таблица 1

Table 1

Среднее значение тепловой проводимости загрязнений стенок
The average value of the thermal conductivity of wall contamination

№ п/п	Теплоноситель	Тепловая проводимость минимальная, Вт/(м ² К)	Тепловая проводимость максимальная, Вт/(м ² К)
1	Вода среднего качества	1400	1860
2	Вода хорошего качества	1860	2900
3	Вода очищенная	2900	5800

*Источник: [19] Павлов К. Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие. Изд. 10-е, перераб. и доп.- М.: Альянс, 2019. 576 с. – ISBN 978-5-91872-031-8.

Source: [19] Pavlov K. F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and tasks in the course of processes and devices of chemical technology. A study guide. 10th edition, revised. and additional.- M.: Alliance, 2019. 576 p. – ISBN 978-5-91872-031-8.

В зависимости от качества воды при нагреве в теплообменнике могут образоваться различные загрязнения. Для долгосрочной работы теплообменного оборудования необходимо применение системы водоподготовки. В таблице 2 показаны нормативные значения охлаждающей воды.

Таблица 2

Table 2

Нормативные значения охлаждающей воды в подогревателях
Standard values of cooling water in heaters

№ п/п	Данные по анализу для воды оборотных охлаждающих систем	Добавочная	Оборотная
1	Запах, баллы	< 3	< 3
2	Жесткость, мг-экв/л:		
	карбонатная	0,5-0,8	< 3
	общая	45323,00	< 7
3	Окисляемость перманганатная, мг О ₂ /л:	1-2	< 10
4	Щелочность, мг-экв/л	0,5-1,0	2-4
5	Общее солесодержание, мг/л	150-250	800-1200
6	ХПК, мг О ₂ /л	15-30	< 70
7	БПК, мг О ₂ /л	1-5	5-10
8	Содержание, мг/л:		
	ионов тяжелых металлов	отсутствие	отсутствие
	масел и смолообразующих веществ	отсутствие	отсутствие
	ПАВ	отсутствие	отсутствие
	фосфора (в пересчете на P ₂ O ₅)	< 1	< 5
	растворенного кислорода	—	6-8
	сульфатов	70-120	350-500
	азота (общ.)	< 30-35	< 150
остаточного активного хлора	1	1	
9	pH	6,5-8,5	6,5-8,5
10	Содержание взвешенных веществ, мг/л	2-4 (желат.отсутствие)	10-20
11	Содержание хлоридов, мг/л	30-70	150-300

*Источник: Нормы качества сетевой и подпиточной воды водогрейных котлов, организация водно-химического режима и химического контроля // [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://docs.cntd.ru/document/1200031800>. Дата доступа: 03.07.2024

Source: Quality standards of network and make-up water of hot water boilers, organization of water-chemical regime and chemical control // [Electronic resource]. Access mode <https://docs.cntd.ru/document/1200031800>. Date of access: 07.03.2024

Для охлаждения пара мы выбрали кожухотрубчатый теплообменник. Теплообменные кожухотрубчатые аппараты представляют собой горизонтальную или вертикальную емкость диаметром от 159 до 1200 мм и площадью теплообмена до 973 м².

Внутри в теплообменниках располагаются неподвижные трубные решетки с жестко закрепленными в них трубами и температурные компенсаторы (в моделях типа ТК). Принцип работы теплообменных аппаратов заключается в процессе теплообмена между рабочими средами, двигающимися по трубным решеткам и межтрубному пространству (рис. 1).

Одним из главных преимуществ данных теплообменников является их высокая надежность. Благодаря своей конструкции, они могут выдерживать высокие значения

давления и температуры. Кожухотрубчатый теплообменники имеют длительный срок эксплуатации и требуют минимального обслуживания.

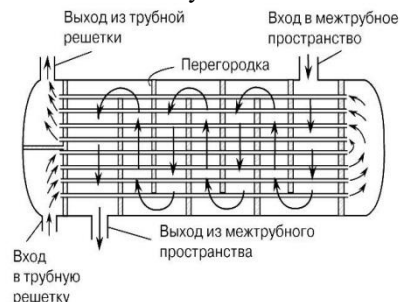


Рис. 1. Принцип работы кожухотрубчатого теплообменника

Fig. 1. The principle of operation of the shell-and-tube heat exchanger

*Источник: Кожухотрубчатый теплообменник: устройство и принцип работы // [Электронный ресурс]. Режим доступа https://nnto.ru/o-predpriyatii/stati/princip_raboty_i_tipy_kozhuhotrubbyh_teploobmennikov/ Дата доступа: 11.11.2024

Source: Shell-and-tube heat exchanger: device and principle of operation // [Electronic resource]. Access mode https://nnto.ru/o-predpriyatii/stati/princip_raboty_i_tipy_kozhuhotrubbyh_teploobmennikov/ Date of access: 11.11.2024

Трубный пучок теплообменника выполнен из гладких латунных или нержавеющей трубок наружным диаметром от 16 до 22 мм. На рисунке 2 показана разработанная технологическая схема утилизации выпара с помощью кожухотрубчатого теплообменника.

Выпар из расширителя 2 направляется в теплообменник 3, далее сконденсированный пар в виде конденсата поступает в бак для сбора сконденсированного выпара 4 и перекачивается насосом 5 в бак запаса конденсата 1. Охлаждение выпара происходит в теплообменнике с трубной системой из нержавеющей стали AISI 304 (08X18H10) с помощью сетевой воды (ОСВ), сетевая вода нагревается и будет направлена в сетепровод.

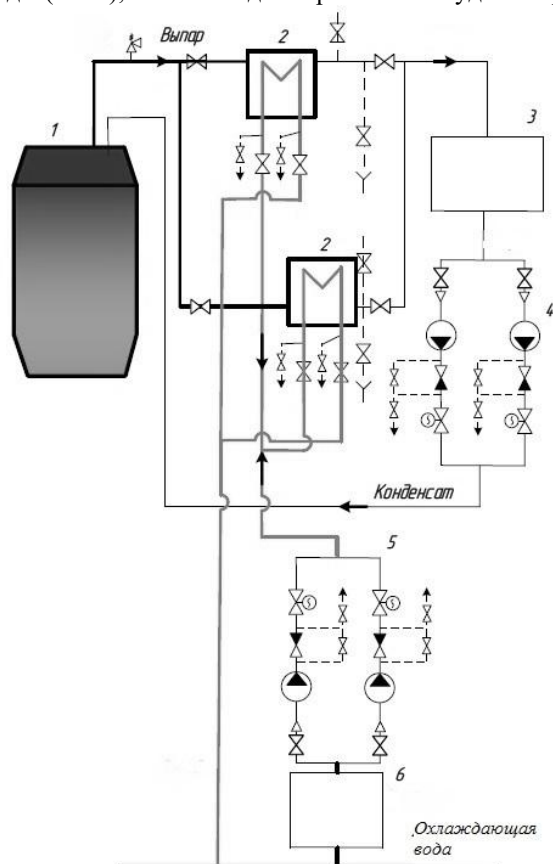


Рис. 2. Схема процесса конденсации выпара охлаждающей водой: 1 – бак запаса конденсата; 2 – расширитель; 3 – теплообменник резерва; 4 – насосная группа для перекачки конденсата; 5 – насосная группа для перекачки охлаждающей воды; 6 – система предварительной очистки охлаждающей воды

Fig. 2. The scheme of the evaporation condensation process with cooling water: 1 – condensate reserve tank; 2 – heat exchanger; 3 – condensate collection tank; 4 – pumping group for pumping condensate; 5 – pumping group for pumping cooling water; 6 – cooling water pretreatment system

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

Количество теплоты, переданное теплообменником охлаждающей воде составит:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) = 192,5 \text{ кДж/с,}$$

где m – масса пара, кг;

c – удельная теплоемкость пара, кДж/(кг*°C);

t_1, t_2 – температура пара на входе и на выходе, °C.

Выпар с температурой 105⁰C поступает в теплообменник, где охлаждается до температуры 70⁰C.

Температура на выходе из теплообменника составила:

$$T_{\text{вых}} = Q / (m \cdot c) + t_2 = 62,4 \text{ } ^\circ\text{C,}$$

Площадь поверхности теплообмена:

$$F = Q / \Delta t \cdot k,$$

где Δt – среднелогарифмическая температура, °C;

k – коэффициент теплопередачи, ккал/м²*ч*°C.

Среднелогарифмическая температура находится:

$$\Delta t = \frac{T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}}{2,3 \cdot \lg \frac{t_{\text{п}} - T_{\text{вх}}}{t_{\text{п}} - T_{\text{вых}}}} = 62,4 \text{ } ^\circ\text{C,}$$

где $T_{\text{вых}}$, $T_{\text{вх}}$ – температуры воды и конденсата до и после охладителя выпара.

Коэффициент теплопередачи определили по следующему соотношению [18]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{п}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}},$$

где $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент теплоотдачи пара к стенке трубки ккал/м²*°C;

δ – толщина стенок трубной доски теплообменника, м;

$\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности металла трубок теплообменника, ккал/м*ч*°C;

$\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи стенок трубок к охлаждающей воде трубки ккал/м²*°C.

Практически все теплообменники имеют стандартные размеры трубок: внутренний диаметр 16мм, толщина стенок $\delta = 2$ мм. При охлаждении важно выдерживать скорость движения среды (w) во внутренней полости теплообменника. Для латунных трубок w равна 2,5 м/с, для нержавеющей стали – 4м/с соответственно.

Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубы составит:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{F}{Q \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{с}})},$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м²;

Q – тепловой поток передаваемый от пара к стенке трубы, Вт;

$t_{\text{н}}$ – температура насыщения пара, °C;

$t_{\text{с}}$ – температура поверхности стенки, °C.

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к охлаждающей воде:

$$\alpha_{\text{в}} = z \cdot \frac{w}{d_{\text{н}}},$$

где z – коэффициент, зависящий от температуры охлаждающей воды;

w – скорость охлаждающей воды в трубной системе теплообменника, м/с;

$d_{\text{н}}$ – внутренний диаметр трубок теплообменника, м.

По результатам расчетов $k=3225$, тогда площадь поверхности теплообмена равна $F=9,54 \text{ м}^2$.

По результатам вычислений выбрали теплообменник ОВА-16, площадь поверхности теплообмена, которого равна 16 м².

Для стабильного охлаждения выпара рассчитали необходимое количество охлаждающей воды, здесь следует отметить, что на входе в теплообменник должно быть постоянное значение температуры охлаждающей воды:

$$G_{\text{в}} = 2,5 \text{ кг/с} = 9 \text{ т/ч.}$$

При охлаждении выпара происходит нагрев обратно сетевой воды, при расходе 10,99 т/ч дополнительный нагрев сетевой воды составит 0,0165 Гкал/ч, при средней цене сетевой воды на ТЭЦ от 850 до 950 рублей за 1 Гкал/ч экономический эффект от нагрева сетевой воды может составить от 14 до 16,67 рублей в час, при расходе 21,99 т/ч дополнительный нагрев сетевой воды составит 0,033 Гкал/ч, следовательно, экономический эффект от нагрева сетевой воды может составить от 28 до 31,3 рублей в час.

Таким образом, в качестве экономии ($\Delta \text{Э}$) принимаем:

– при минимальном расходе выпара 2,5 т/ч на нагрев сетевой воды, в течении отопительного периода (в среднем 245 дней) 82320–98020 рублей;

– при максимальном расходе выпара 5 т/ч на нагрев сетевой воды, в течении отопительного периода (в среднем 245 дней) 164640–184044 рублей.

Отдельно стоит отметить экономию на подготовку химически очищенной воды (ХОВ) на ТЭЦ. На данный момент подготовка ХОВ обходится от 45 до 60 рублей, таким образом, в течение года можно, сэкономив на ХОВ от 2,5 до 5 т/ч воды. При минимальном расходе выпара 2,5 т/ч экономия на подготовке воды составит от 112,5 до 150 рублей в час, а при максимальном расходе выпара 5 т/ч экономия составит уже 225 и 300 рублей в час соответственно.

Таким образом, суммарная экономия от предложенного мероприятия составит: при минимальном расходе выпара 2,5 т/ч – 730 320 – 962 020 рублей в год; при максимальном расходе выпара 5 т/ч – 1 460 640 – 2 812 044 рублей в год.

Заключение (Conclusions)

Наиболее важной частью реализации электрической энергии как товара является достижение максимальной компенсации (минимизации) топливной составляющей на производство электрической энергии. Чем ниже удельный расход топлива на выработку электрической и тепловой энергии, тем будет выше процент чистого дохода, созданного в процессе производства и реализации в сфере обращения электрической энергии и мощности, который непосредственно получает предприятие, что в целом положительно влияет на улучшение конечного финансового результата на рынке. Использование низкопотенциальной энергии позволяет снизить затраты собственных нужд на подготовку химически обессоленной воды при расходе выпара 2,5 т/ч экономия на химической подготовке воды может составить до 150 рублей в час, а при расходе выпара 5 т/ч экономия может составить до 300 рублей в час. Экономический эффект от нагрева сетевой воды в течении отопительного периода сможет составить при расходе выпара 2,5 т/ч до 98020 рублей; при расходе выпара 5 т/ч до 184044 рублей в год.

Таким образом, внедрение предложенного мероприятия утилизации выпара из расширителей конденсата будет способствовать снижению выбросов низкопотенциального пара в атмосферу, снижению потерь тепловой энергии, пара и конденсата, что приведет к улучшению технико-экономических показателей ТЭЦ.

Литература

1. Соколов В.А. Энергоемкость экономики России и основные направления по ее сокращению // Энергетическая политика. 2023. №7. С.46-66.
2. МЭА. Key World Statistics. 2020. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.iea.org/reports/key-world-energy=statistics-2020/> Дата доступа: 01.08.2024).
3. Галустов В. С. Утилизация тепла и конденсата паровых выбросов Охрана труда и техника безопасности на промышленных предприятиях. 2010. № 11. С. 14-16.
4. Марьин Г. Е. Сопина Ю. В. Применение технологий нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в цикле ТЭС // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2021. Том 1. С. 252-256.
5. Гафуров А. М. Способ преобразования сбросной низкопотенциальной теплоты ТЭС // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2015. № 4(28). С. 28-32.
6. Шарапов В. И., Кубашов С. Е. Регенерация низкопотенциальных потоков теплоты тепловых электрических станций // Труды Академэнерго. 2009. № 2. С. 81-97.
7. Клыков Н. Д. Выбор варианта утилизации теплоты пара низких параметров // Энергетика теплотехнологий. 2019. № 1(5). С. 2-6.
8. Плотников В. П. Исследование разрушения бетона в лаборатории отрывом импульсами давления воды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 10. С. 44-52.
9. Федосов О. С. В., Румянцева В. Е., Хрунов В. А. О некоторых проблемах технологии безопасности и долговечности зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 8-11.
10. Хвостиков А. С. Сокращение тепловых выбросов электростанций // Дальневосточная весна – 2020. 18-я Международная научно-практическая конференция по проблемам экологии и безопасности. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2020. С. 40-42.
11. Трещева М. А., Аникина И. Д., Трещев Д. А. Перспективы снижения объемов водопользования ТЭС России вследствие применения тепловых насосов // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 18-31. – DOI 10.1134/S0040363621110060.
12. Аникина И. Д., Трещева М. А., Скулкин С. В. Применение тепловых насосов для энерго- и ресурсосбережения на ТЭС // Санкт-Петербург: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2021. 118 с. – ISBN 978-5-7422-7305-9.

13. Менделеев Д. И., Марьин Г. Е., Галицкий Ю. Я., Ахметшин А. Р. Исследование влияния условий эксплуатации на эффективность использования абсорбционно-холодильной машины в цикле газотурбинных и парогазовых установок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 4(153). С. 821-831. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-4-821-831.

14. Догадин Д. Л., Анохин А. Б., Латыпов Г. Г. Применение абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин в производственном цикле электрических станций // Электрические станции. 2014. № 10(999). С. 40-46.

15. Бартевев А. И. Оценка эффективности применения АБТТ на ТЭЦ и ЦТП в системах теплоснабжения // Энергосбережение - теория и практика. Девятая Международная школа-семинар молодых ученых и специалистов. Москва: МЭИ, 2018. С. 163-166.

16. Зверев Л. О., Злобин В. Г., Липатов Д. В., Зверева Э. Р. Применение блочного дожигающего устройства в котлах-утилизаторах ПГУ // Современные проблемы теории машин. 2023. № 15. С. 78-80.

17. Аминов Р.З., Новичков С.В. Использование абсорбционной бромисто-литиевой холодильной машины для повышения эффективности работы воздушно-аккумулирующей газотурбинной электростанции. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. № 19 (11-12). С. 62-72.

18. Липин А.А., Романенко Ю.Е., Шибашов В. А., Липин А.Г. Расчет теплообменных аппаратов. Кожухотрубчатые теплообменники. Учебное пособие. Иваново, 2017. – 76 с.

19. Павлов К. Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие. Изд. 10-е, перераб. и доп.- М.: Альянс, 2019. 576 с. – ISBN 978-5-91872-031-8.

Авторы публикации

Зверева Эльвира Рафиковна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия. *E-mail: belvira6@list.ru.*

Марьин Георгий Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

Ишалин Александр Вениаминович – аспирант кафедры «Энергетическое машиностроение» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ), г. Казань, Россия.

References

1. Sokolov V.A. Energy intensity of the Russian economy and the main directions for its reduction // Energy policy. 2023. No.7. pp.46-66.

2. IEA. Key World Statistics. 2020. [electronic resource]. Access mode <http://www.iea.org/reports/key-world-energy=statistics-2020/> Access date: 01.08.2024).

3. Galustov V. S. Utilization of heat and condensate of steam emissions Labor protection and safety at industrial enterprises. 2010. No. 11. pp. 14-16.

4. Maryin G. E. Sopina Yu. V. Application of technologies of non-traditional and renewable energy sources in the TPP cycle // Improving the efficiency of energy production and use in Siberia. All-Russian scientific and practical conference with international participation. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, 2021. Volume 1. pp. 252-256.

5. Gafurov A.M. A method for converting low-potential waste heat from thermal power plants // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2015. No. 4 (28). pp. 28-32.

6. Sharapov V. I., Kubashov S. E. Regeneration of low-potential heat fluxes of thermal power plants // Proceedings of Akademenergo. 2009. No. 2. pp. 81-97.

7. Klykov N. D. The choice of a low-parameter steam heat utilization option // Energetics of thermal technologies. 2019. No. 1(5). pp. 2-6.

8. Plotnikov V. P. Investigation of concrete destruction in the laboratory by separation by pulses of water pressure // Mining information and analytical bulletin. 2006. No. 10. pp. 44-52.

9. Fedosov O. S. V., Rumyantseva V. E., Khrunov V. A. On some problems of safety technology and durability of buildings, structures and engineering infrastructure // Building materials. 2015. No. 3. pp. 8-11.

10. Khvostikov A. S. Reduction of thermal emissions from power plants //Far Eastern spring 2020. The 18th International Scientific and Practical Conference on Environmental and Safety Issues. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University, 2020. pp. 40-42.

11. Treshcheva M. A., Anikina I. D., Treshchev D. A. Prospects for reducing the volume of water use of thermal power plants in Russia due to the use of heat pumps // Thermal power engineering. 2022. No. 1. pp. 18-31. – DOI 10.1134/S0040363621110060.
12. Anikina I. D., Treshcheva M. A., Skulkin S. V. The use of heat pumps for energy and resource saving at thermal power plants // St. Petersburg: St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2021. 118 p. - ISBN 978-5-7422-7305-9.
13. Mendeleev D. I., Maryin G. E., Galitsky Yu. Ya., Akhmetshin A. R. Investigation of the influence of operating conditions on the efficiency of using an absorption refrigerating machine in the cycle of gas turbine and combined-cycle gas installations // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2020. Vol. 24. No. 4 (153). pp. 821-831. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-4-821-831.
14. Gadadin D. L., Anokhin A. B., Latypov G. G. Application of absorption lithium bromide refrigerating machines in the production cycle of electric power plants // Electric stations. 2014. No. 10(999). pp. 40-46.
15. Bartenev A. I. Evaluation of the effectiveness of the use of ABTT at CHP and TSTP in heat supply systems // Energy saving - theory and practice. The Ninth International School is a seminar for young scientists and specialists. Moscow: MEI, 2018. pp. 163-166.
16. Zverev L. O., Zlobin V. G., Lipatov D. V., Zvereva E. R. The use of a block afterburning device in CCGT recovery boilers // Modern problems of machine theory. 2023. No. 15. pp. 78-80.
17. Aminov R.Z., Novikov S.V. The use of an absorption lithium bromide refrigerating machine to increase the efficiency of an air-accumulating gas turbine power plant. News of higher educational institutions. Energy problems. 2017. No. 19 (11-12). pp. 62-72.
18. Lipin A.A., Romanenko Yu.E., Shibanov V. A., Lipin A.G. Calculation of heat exchangers. Shell-and-tube heat exchangers. A study guide. Ivanovo, 2017. – 76 p.
19. Pavlov K. F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and tasks in the course of processes and devices of chemical technology. A study guide. 10th edition, revised. and additional. - M.: Alliance, 2019. 576 p. – ISBN 978-5-91872-031-8.

Authors of the publication

Elvira R. Zvereva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: *belvira6@list.ru*.

George E. Marin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexander V. Ishalin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **13.08.2024 г.**

Отредактировано **12.11.2024 г.**

Принято **20.11.2024 г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 66.061.3

DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ БИОАКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ФЛЮИДНЫМИ РАСТВОРИТЕЛЯМИ

Сабирова Л.Ю.¹, Яруллин Л.Ю.¹, Хабриев И.Ш.¹, Корепанова Я.Ю.¹,
Шинкевич Т.О.²

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
yarul.lenar@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование процессов экстракции растительного сырья, обладающих широким спектром биологически активных свойств, сверхкритическим диоксидом углерода, используемым в качестве растворителя, а также с добавлением этанола, используемого в качестве соразтворителя, к сверхкритическому диоксиду углерода в соотношении 5% к общему расходу при температуре 313 К и давлении 30 МПа. *МЕТОДЫ.* Исследование процессов экстракции осуществлялось методом сверхкритической флюидной экстракции, являющимся эффективным и экологичным по сравнению с традиционными методами получения экстрактов. Экспериментальная установка, оснащенная двумя плунжерными насосами, позволила реализовать динамический метод экстракции, как сверхкритическим диоксидом углерода, так и диоксидом углерода с добавлением этанола. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Получены итоговые значения выхода экстракта для *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia* при температуре 313 К и давлении 30 МПа с использованием в качестве растворителя чистого диоксида углерода и смеси диоксид углерод/этанол. По результатам экспериментальных данных построены зависимости массового выхода экстракта от времени экстракции. Тем самым определена скорость экстракции каждого образца. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что для каждого из образцов растительного сырья использование сверхкритического диоксида углерода, модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно, ведет к увеличению выхода экстракта. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению энергетических затрат при реализации процесса экстракции предложенным методом в промышленных масштабах.

Ключевые слова: экстракция; растительные экстракты; сверхкритический диоксид углерода; энергосбережение; *Valeriana officinalis*; *Hypericum*; *Matricaria*; *Salvia*.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 29.12.2022 г. № 075-01508-23-00 (Сверхкритические флюидные технологии в переработке полимеров (FZSG-2023-0007)) с использованием аналитического оборудования центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Для цитирования: Сабирова Л.Ю., Яруллин Л.Ю., Хабриев И.Ш., Корепанова Я.Ю., Шинкевич Т.О. Энергосберегающие аспекты процесса экстракции биоактивных соединений из растительного сырья сверхкритическими флюидными растворителями // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 157-165. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165.

ENERGY-SAVING ASPECTS OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF BIOACTIVE COMPOUNDS FROM PLANT RAW MATERIALS WITH SUPERCRITICAL FLUID SOLVENTS

Sabirova L.Yu.¹, Yarullin L.Yu.¹, Khabriev I.Sh.¹, Korepanova Ya.Yu.¹, Shinkevich T.O.²

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

yarul.lenar@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* Study of extraction processes of plant raw materials with a wide range of biologically active properties, supercritical carbon dioxide used as a solvent, as well as with the addition of ethanol, used as a co-solvent, to supercritical carbon dioxide in a ratio of 5% to the total consumption at a temperature of 313 K and pressure 30 MPa. *METHODS.* The study of extraction processes was carried out by the method of supercritical fluid extraction, which is effective and environmentally friendly compared to traditional methods for obtaining extracts. The experimental setup, equipped with two plunger pumps, allowed the implementation of a dynamic extraction method with both supercritical carbon dioxide and carbon dioxide with the addition of ethanol. *RESULTS.* The final extract yields were obtained for Valeriana officinalis, Hypericum, Matricaria and Salvia at a temperature of 313 K and a pressure of 30 MPa using pure carbon dioxide and a carbon dioxide/ethanol mixture as a solvent. Based on the results of experimental data, the dependence of the mass yield of the extract on the extraction time was plotted. This determines the extraction rate of each sample. *CONCLUSION.* The experimental data obtained indicate that for each of the samples of plant raw materials, the use of supercritical carbon dioxide modified with ethanol in a ratio of 95 and 5%, respectively, leads to an increase in the yield of the extract. This, in turn, leads to a reduction in energy costs when implementing the extraction process using the proposed method on an industrial scale.

Keywords: extraction; plant extracts; supercritical carbon dioxide; energy saving; Valeriana officinalis; Hypericum; Matricaria; Salvia.

Acknowledgments: The work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment for the provision of public services (performance of work) dated December 29, 2022, no. 075-01508-23-00 (supercritical fluid technologies in polymer processing (FZSG-2023-0007)) using the analytical equipment of the Center for Collective Use "Nanomaterials and Nanotechnologists" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Kazan National Research Technological University.

For citation: Sabirova L.Yu., Yarullin L.Yu., Khabriev I.Sh., Korepanova Ya.Yu., Shinkevich T.O. Energy-saving aspects of the process of extraction of bioactive compounds from plant raw materials with supercritical fluid solvents. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 157-165. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-157-165.

Введение (Introduction)

В современном мире большое внимание уделяется здоровому образу жизни и правильному питанию. Известно, что некоторые хронические заболевания – это следствие использования продуктов питания, содержащие различные пищевые добавки. Включение натуральных пищевых добавок в состав широкого спектра продуктов питания является одной из наиболее важных тенденций в современной пищевой промышленности [1-4]. Использование биологически активных компонентов из природных источников представляет интерес не только применительно к пищевым технологиям, но и в первую очередь к медицине, поскольку многочисленные научные исследования показывают и доказывают благоприятное влияние целевых молекул растительного сырья против широкого спектра заболеваний. Установлено, что многие биологические соединения, извлеченные из природных источников растительного происхождения, обладают широким спектром биологически активных свойств, такими как противомикробные, антибактериальные, противогрибковые, противовирусные, противовоспалительные, противоопухолевые и антиоксидантные.

Для достижения эффективного извлечения ценных компонентов представляющих биологический интерес необходимо соблюдать ряд условий, в которые, помимо анализа полученной пробы, также входит качественный и количественный сбор получаемых компонентов в экстрактах растительного сырья. Безусловно, стоит отметить то, что на качество получаемого экстракта влияют такие факторы как география собранного растительного материала, сезон сбора урожая, климат и экология. Кроме того, нарушение условий правильного сбора, хранения и подготовки также могут негативно повлиять на качество выделенных биологически активных веществ.

Качество экстрактов зависит не только от описанных выше факторов. Природа растворителя, тип экстракции, время проведения процесса экстракции, температура и соотношение растворителя к образцу влияют на количество и состав экстракта. Для правильного подбора растворителя необходимо принять во внимание количество экстрагируемых соединений, скорость экстракции и уровень токсичности.

Для выделения полезных биологических соединений из растительного сырья используются многочисленные химические и механические процессы, такие как экстракция растворителем и паровая дистилляция [5]. Обычные методы экстракции, такие как метод Сокслета и мацерация с использованием токсичных жидких растворителей (дихлорметан и метанол) требуют много времени и приводят к получению разбавленных экстрактов. Органические растворители имеют свою специфику и не всегда положительно сказывающуюся для полученных экстрактов. Во-первых, многие органические растворители не в полной мере обеспечивают извлечение полного комплекса биологически активных компонентов. Во-вторых, возникает проблема, связанная с разделением экстракта от остатков растворителя. Решение этой проблемы часто ведет к потере ценных компонентов на этапе разделения. Это связано с технологическими параметрами процесса разделения. Идеальный метод экстракции должен быть быстрым, обеспечивать количественное извлечение целевого растворенного вещества без разложения, а растворитель должен легко отделяться от растворенного вещества. Разработка альтернативных экологически привлекательных методов экстракции с меньшими затратами энергии, с использованием безопасных растворителей и обеспечивающих получение безопасных и высококачественных экстрактов является, безусловно, актуальной задачей.

В последние годы инновационным и перспективным направлением для повышения качества производимой продукции, энергосберегающего характера технологического процесса и экологической безопасности является использование сверхкритических флюидных сред в различных отраслях [6-13], и в том числе в рамках переработки и экстракции растительного сырья.

Предположение об энергосберегающем характере сверхкритического флюидного экстракционного процесса основывается на сравнении величины работы, затрачиваемой на получение сверхкритического флюидного состояния с традиционным подходом – величиной энергопотребления на этапе, например, регенерации, но связанной в этом случае с испарением органического растворителя в процессе дистилляции. К примеру, работа сжатия диоксида углерода в диапазоне давлений от 6 до 20 МПа составляет 54 кДж/кг, тогда как при 293 К и давлении насыщения теплота парообразования жидких диоксида углерода, хладона-11, аммиака и изобутана равна соответственно 155,20; 183,17; 1189,0 и 335,7 кДж/кг [14]. Энергосберегающий характер сверхкритического флюидного экстракционного процесса в рамках подобной оценки очевиден.

Одним из эффективных путей технико-экономической оптимизации сверхкритических экстракционных технологий является модификация сверхкритических флюидных растворителей посредством добавления к ним ограниченного количества (до 15%; ещё чаще от 0,1 до 5,0%) соразтворителя, выполняющего функции модификатора и формирующей или усиливающей селективность процесса экстракции. В подавляющем большинстве случаев роль соразтворителя заключается в увеличении растворимости того или иного вещества, а также усилении зависимости последней от параметров состояния. И то, и другое способствует снижению рабочих давлений и температур, а вместе с этим и энергозатрат на осуществление процесса.

Привлекательность метода сверхкритической флюидной (СКФ) экстракции заключается в использовании небольшого количества растворителя по сравнению с традиционными методами и проведении процесса при низких энергетических затратах [15].

Сверхкритическая флюидная экстракция диоксидом углерода представляется более привлекательным по сравнению с другими растворителями, поскольку диоксид

углерода является инертным, дешевым, нетоксичным и экологически чистым растворителем. Критическая температура диоксида углерода 304,1 К, а критическое давление 7,38 МПа. Эти условия позволяют проводить экстракцию при низких температурах и сравнительно низких давлениях, что, в свою очередь, позволяет избежать термического разложения получаемого экстракта. Кроме этого, диоксид углерода без внешнего воздействия легко испаряется из получаемого экстракта.

Цель исследований в данной работе заключается в получении экстрактов растительного сырья как с чистым диоксидом углерода в сверхкритическом состоянии при параметрах $T = 313$ К и $P = 30$ МПа, так и с добавлением этанола к сверхкритическому диоксиду углерода при тех же параметрах. Сравнение полученных экспериментальных данных.

Практическая значимость исследований в рамках данной работы заключается в разработке нового комплексного подхода по экстракции биоактивных соединений из растительного сырья с использованием сверхкритических флюидных технологий.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объектов исследования в рамках данной работы по экстракции использовали корень валерианы (*лат. Valeriana officinalis*), зверобой (*лат. Hypericum*), ромашка (*лат. Matricaria*) и шалфей (*лат. Salvia*). Все эти растения обладают широким спектром лечебных свойств и могут использоваться для профилактики различных заболеваний.

В качестве сверхкритического флюидного растворителя использовали диоксид углерода (CO_2) с чистотой 99,0 % и в качестве дополнительного соразтворителя этанол с чистотой 98%.

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1, помимо баллона (1) с CO_2 , состояла из следующих основных узлов. Система создания и поддержания давления включала в себя плунжерный насос для CO_2 (2). Сжатие жидкого CO_2 происходило в двух рабочих камерах насоса, по этой причине к камерам по специальным гибким трубкам подводилась охлаждающая жидкость из холодильника (11). В качестве охлаждающей жидкости использовался тосол. В холодильнике задавалась температура охлаждения тосола до 268 К. Такой температуры было достаточно для перевода CO_2 в жидкое состояние.

При необходимости добавления дополнительных соразтворителей к основному растворителю – CO_2 в процессе экстракции, применялся плунжерный насос (3). В настоящей работе в качестве дополнительного соразтворителя использовали этанол в соотношении 5% к общему расходу потока CO_2 . Каждый из насосов оснащался электронной системой управления, позволяющей задавать расход потока как CO_2 , так и этанола. Это позволяло с высокой точностью установить процентное соотношение между ними. Расход CO_2 в процессе проведения эксперимента задавался 10 гр/мин. При использовании этанола расход составлял 0,5 гр/мин.

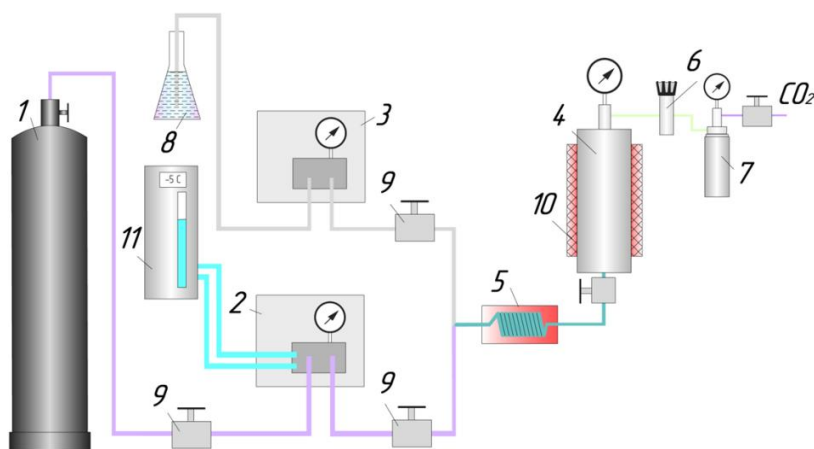


Рис. 1. Схема экспериментальной экстракционной установки: 1 – баллон CO_2 ; 2 – насос для CO_2 ; 3 – насос для соразтворителя; 4 – экстракционный сосуд; 5 – теплообменник; 6 – регулятор давления; 7 – сепаратор; 8 – емкость с соразтворителем; 9 – вентили высокого давления; 10 – нагревательная рубашка; 11 – холодильник

Fig. 1. Scheme of the experimental extraction installation: 1 – CO_2 cylinder; 2 – pump for CO_2 ; 3 – pump for co-solvent; 4 – extraction vessel; 5 – heat exchanger; 6 – pressure regulator; 7 – separator; 8 – container with co-solvent; 9 – high pressure valves; 10 – heating jacket; 11 – refrigerator

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

Объекты исследований помещались в экстрактор (4) объемом 1 литр. Известно, что интенсивность процесса экстракции зависит от степени измельчения исходного сырья. В связи с этим, перед проведением экспериментов, сырье размалывали на лабораторной мельнице до фракций размером 0,2-2 мм. Перед загрузкой измельченное сырье взвешивали на электронных весах. Экстрактор оснащался специальными микронными фильтрами для предотвращения механического уноса исследуемых образцов растительного сырья в процессе экстракции.

Нагрев потока CO₂, либо потока CO₂ с этанолом, поступающего в экстрактор с исследуемым сырьем, предварительно нагревался теплообменником (5). Для поддержания необходимой температуры процесса экстракции, экстрактор был оснащен нагревательной рубашкой (10). Поддержание и сброс давления в экстракторе осуществлялось регулятором давления (6).

После регулятора давления поток CO₂ с извлеченным экстрактом, либо поток CO₂ с этанолом и извлеченным экстрактом поступал в сепаратор (7), в котором происходило разделение экстракта от растворителя за счет снижения давления и температуры. Давление в сепараторе в процессе экстракции поддерживалось в диапазоне 0,5 до 0,7 МПа., а температура составляла 298 К. После проведения эксперимента давление в сепараторе сбрасывали до атмосферного. Извлеченный из сепаратора экстракт взвешивали на электронных весах.

Результаты и обсуждения (Results and Discussions)

С изменением температуры и давления растворяющая способность сверхкритического CO₂ меняется и это безусловно влияет на конечный выход той или иной компоненты. Выбор параметров экстракции (температуры и давления) в основном исходит от содержания целевых компонентов исследуемого сырья. Основной диапазон температур, при котором проводят экстракцию диоксидом углерода от 308 до 333 К, в редких случаях используют температуру выше этого интервала. Проведение экстракции при более высоких температурах может негативно сказаться на полученном экстракте, т.е. есть вероятность разрушения и потери фармакологической активности веществ под действием высокой температуры. В настоящей работе экстракции проводили при температуре 313 К., эта температура считается наиболее предпочтительной для осуществления экстракции большинства видов растительного сырья сверхкритическим CO₂.

Повышение давления до определенного значения ведет к повышению растворяющей способности и соответственно улучшению выхода экстракта, однако более высокое давление не всегда положительно сказывается на экстракции, так как более высокая сольватирующая способность снижает селективность растворителя. В связи с этим в данной работе экспериментальное давление составляло 30 МПа.

Дополнительным фактором, позволяющим повысить выход экстракта, является использование различных соразтворителей в процессе СКФ экстракции. Наиболее часто используемым соразтворителем в процессах экстракции растительного сырья являются этанол. Этот растворитель в основном используются в качестве соразтворителя для изменения полярности сверхкритического флюида и повышения его сольватирующей способности по отношению к целевым биологически активным соединениям.

В результате проведения экспериментов по экстракции чистым CO₂ и CO₂ с добавлением этанола 5% массовых от общего расхода получены экстракты *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria* и *Salvia*. Каждый из полученных экстрактов имеет свой цвет и специфичный запах характерный для каждого исследуемого образца. На рисунке 2 представлена фотография образцов экстрактов.



Рис. 2. Фотография полученных экстрактов (слева на право): шалфея (*Salvia*); зверобоя (*Hypericum*); валериана (*Valeriana officinalis*); ромашки (*Matricaria*)

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

Новые экспериментальные данные представляют собой зависимость выхода экстракта в процентах от времени проведения экстракции. В таблице 1 приведены итоговые значения выхода экстракта для *Valeriána officinális*, *Hypericum*, *Matricăria* и *Salvia* при температуре 313 К и давлении 30 МПа с использованием в качестве растворителя чистого CO₂ и смеси CO₂/этанол.

Для каждого из образцов, как видно из данных, использование CO₂ модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно ведет к увеличению выхода экстракта. Например, для *Hypericum* использование этанола в качестве сорастворителя позволило увеличить выход с 4,8% до 6,5%. Для *Valeriána officinális* эта разница не столь очевидна, вероятно, это связано с элементарным составом сырья, в котором преобладают компоненты слабо растворимые в этаноле.

Таблица 1

Экспериментальные данные СКФ экстракции			
сырье	параметры эксперимента	растворитель	выход экстракта, %
шалфей (<i>Salvia</i>)	T = 313 К; P = 30 МПа	CO ₂ (100%)	7,1
		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	8,3
ромашка (<i>Matricăria</i>)		CO ₂ (100%)	4,5
		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	5,5
зверобой (<i>Hypericum</i>)		CO ₂ (100%)	4,8
		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	6,5
корень валериана (<i>Valeriána officinális</i>)		CO ₂ (100%)	2,4
		CO ₂ (95 %) + этанол (5%)	2,7

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

Динамика выход экстракта связана со скоростью извлечения компонентов из растительного сырья. Как видно из рисунка 3, экстракция начинается быстро (в течение 200 мин), а затем следует область, в которой выход экстракта стабилизируется и, в конце концов, выходит на стационар. Для *Hypericum*, *Matricăria* и *Salvia*. начальный период быстрой экстракции легкодоступных растворенных веществ можно легко отличить от заключительного периода с гораздо более медленной экстракцией. Для *Valeriána officinális* скорость экстракции меняется не так очевидно как у других исследуемых образцов и по этой причине экстракция проводилась в течение 10 часов для получения итоговых данных выхода экстракта.

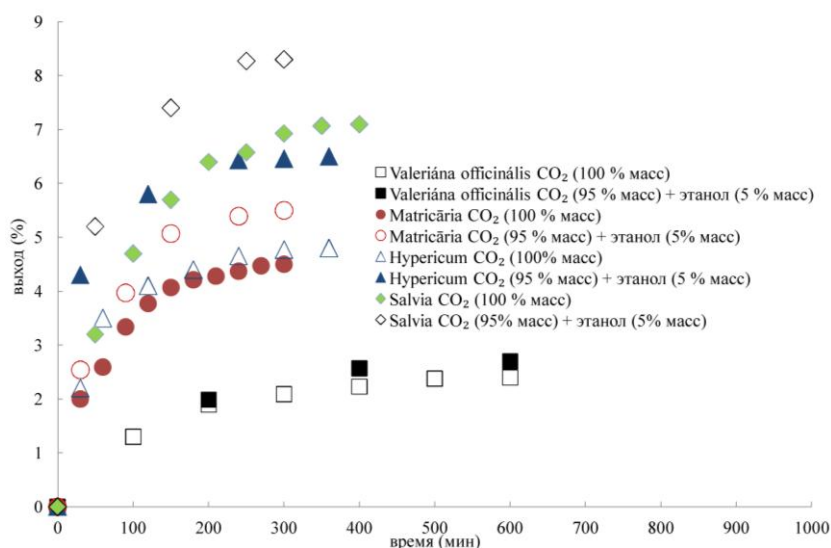


Рис. 3. Зависимость выход экстракта от времени Fig. 3. Dependence of extract yield on experiment time

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

Подтверждение факта энергосбережения можно подкрепить показателями реального технологического процесса. Согласно расчетам, проведенным в работе [16] при классическом способе экстракции (ремацерация) количество тепла, затрачиваемое на проведение процесса, составляет 0,347 Гкал, при водно-вакуумной экстракции – 0,106 Гкал. В случае СКФ экстракции, предложенной в данной работе, для получения 1 кг

экстракта необходимо 0,043 Гкал (из них на нагрев – 0,009 Гкал, на сжатие CO₂ – 0,034 Гкал). В случае классической экстракции все затраты энергии в виде тепла расходуются на нагрев и выпаривание растворителя (воды): нагрев 1 тонны воды до 80 °С и выпаривание половины её массы. В случае СКФ экстракции затраты энергии включают нагрев диоксида углерода (0,009 Гкал характеризует количество электрической энергии, затрачиваемой электронагревателями на нагрев диоксида углерода за 1 цикл (10 часов)), а также работу насоса, осуществляющего сжатие и циркуляцию диоксида углерода (0,034 Гкал – суммарная величина электрической энергии, затрачиваемой насосом, также за 1 цикл).

Калории в качестве размерности энергетических затрат СКФ экстракции выбраны осознанно для возможности наглядно сравнить величины затрат разных методов.

Заключение (Conclusions)

По результатам проведенных исследований получены новые экспериментальные данные по экстракции *Valeriana officinalis*, *Hypericum*, *Matricaria*, *Salvia* сверхкритическим CO₂, а также с использованием сверхкритического CO₂, модифицированного с этанолом в соотношении 95 и 5%.

Итоговые значения массового выхода экстракта для всех исследуемых видов растительного сырья свидетельствуют о том, что для каждого из образцов использование сверхкритического диоксида углерода, модифицированного этанолом в соотношении 95 и 5% соответственно, ведет к увеличению выхода экстракта. Таким образом, можно сделать вывод, что использование соразтворителей, в частности этанола, при экстракции растительного сырья сверхкритическим диоксидом углерода ведет к уменьшению энергетических затрат при реализации процесса СКФ экстракции в промышленных масштабах, что безусловно является еще одним достоинством использования сверхкритических флюидных технологий в пищевой и фармацевтической промышленности.

Литература

1. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry // *Gases in Agro-Food Processes*. 2019. pp. 483–509.
2. Zhou J., Gullón B., Wang M., Gullón P., Lorenzo J. M., Barba F. J. The Application of Supercritical Fluids Technology to Recover Healthy Valuable Compounds from Marine and Agricultural Food Processing By-Products: A Review // *Processes*, 2021. Vol. 9. № 2.
3. Majid A., Naz F., Phull A.R., Abbasi S., Khaskheli A.H., Sirohi M.H., Ahmed I., Ahmed W., Narejo G.F. Extraction and quantification of tocopherols from edible oils using high performance liquid chromatography // *International Journal of Biosciences*. 2019. Vol. 14. № 4. pp. 181-187.
4. Martinez J.L., editor. *Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds*. CRC Press. 2008. 383 p.
5. Shirsath S., Sonawane S., Gogate P. Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations – a review of current status // *Chem Eng Proc Proc Intens*. 2012. Vol. 53. pp. 10–13.
6. Paulaitis M.E., Penninger J.M.L., Gray R.D., Davidson P. *Chemical engineering at supercritical fluid conditions*. Ann. Arbor Science Publishers. 1983. 543p.
7. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials // *Molecules*. 2020. Vol. 25. № 17.
8. Kubra O., Yuksel B., Salih K., Ayse K., Osman S. Extraction of bioactive compounds from saffron species // *Saffron*. 2021. pp. 99-141.
9. Хайрутдинов В.Ф., Гумеров Ф.М. Нефтяные шламы и битуминозный песчаник как важный источник нефтепродуктов и проблемный экологический фактор // *Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2017. Т.19. № 3-4. С. 10-19.
10. Хазипов М.Р., Сагдеев К.А., Сагдеев А.А., Галимова А.Т., Хайрутдинов В.Ф., Гумеров Ф.М. Регенерация ионнообменного катализатора с использованием сверхкритического флюидного экстракционного процесса // *Известия вузов. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2018. Т. 20. № 1-2. С. 111-112.
11. Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Габитова А.Р., Зарипов З.И., Варфоломеев С.Д., Вольева В.Б., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. Часть I. Способы получения // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т.24. № 4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.
12. Мазанов С.В., Зарипов З.И., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. ЧАСТЬ II. теплофизические свойства систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива с использованием рабочих сред в сверхкритическом флюидном состоянии // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2022. Т.24. № 5. С. 35-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-35-60.

13. Мазанов С.В., Гумеров Ф.М., Курдюков А.И., Габитова А.Р., Усманов Р.А., Сафиуллина Л.Х., Зарипов З.И., Шаповалов Ю.А. Биодизельное топливо. Часть III. Квантово-химическое исследование и моделирование процесса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 1. С. 24-44. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44.

14. Банашек В.Э., Бугаева О.П., Солодков В.В. и др. Экстракция липидов из растительного и микробиологического сырья сжиженными и сжатыми газами. Обзорная информация. 1989. Вып. 5. 36с.

15. Liza M.S, Abdul Rahman R.A, Mandana B, Jinap S, Rahmat A, Zaidul I, Hamid A. Supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid from *Strobilanthes crispus* (*Pecah Kaca*) // Food Bioprod Process. 2010. Vol. 88. pp. 319–326.

16. Губернаторов В.В., Сафина А.В. Водно-вакуумная экстракция березового гриба чага. Казань: Издательство РИЦ Школа, 2022. 130 с.

Авторы публикации

Сабирова Людмила Юрьевна – аспирант кафедры ТОТ, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Яруллин Ленар Юлдашевич – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет. *E-mail: yarul.lenar@gmail.com*.

Хабриев Ильнар Шамилович – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Корепанова Ярослава Юрьевна – магистр кафедры ТОТ, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Шинкевич Татьяна Олеговна – канд. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Perrut M., Perrut V. Supercritical fluid applications in the food industry // Gases in Agro-Food Processes. 2019. pp. 483–509.

2. Zhou J., Gullón B., Wang M., Gullón P., Lorenzo J. M., Barba F. J. The Application of Supercritical Fluids Technology to Recover Healthy Valuable Compounds from Marine and Agricultural Food Processing By-Products: A Review // Processes, 2021. Vol. 9. № 2.

3. Majid A., Naz F., Phull A.R., Abbasi S., Khaskheli A.H., Sirohi M.H., Ahmed I., Ahmed W., Narejo G.F. Extraction and quantification of tocopherols from edible oils using high performance liquid chromatography // International Journal of Biosciences. 2019. Vol. 14. № 4. pp. 181-187.

4. Martinez J.L., editor. Supercritical Fluid Extraction of Nutraceuticals and Bioactive Compounds. CRC Press. 2008. 383 p.

5. Shirsath S., Sonawane S., Gogate P. Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations – a review of current status // Chem Eng Proc Proc Intens. 2012. Vol. 53. pp. 10–13.

6. Paulaitis M.E., Penninger J.M.L., Gray R.D., Davidson P. Chemical engineering at supercritical fluid conditions. Ann. Arbor Science Publishers. 1983. 543p

7. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. Recent Advances in Supercritical Fluid Extraction of Natural Bioactive Compounds from Natural Plant Materials // Molecules. 2020. Vol. 25. № 17.

8. Kubra O., Yuksel B., Salih K., Ayse K., Osman S. Extraction of bioactive compounds from saffron species // Saffron. 2021. pp. 99-141.

9. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M. Neftyanye shlamy i bityminoznoi peshhanik kak vazhnyi istotschnik nefteproduktov i problemnyi ekologicheskii faktor // Izvestiya vyzov. Problem Energetiki. 2017. Т.19. №3-4. С. 10-19.

10. Hazipov M.R., Sagdeev K.A., Sagdeeva A.A., Galimov A.T., Khairutdinov V.F., Gumerov F.M. Peregneraciya ionnoobmennogo katalizatora s ispolzovaniem sverhkpititscheskogo flyuidnogo ekstrakcionnogo procesa // Izvestiya vyzov. Problem Energetiki. 2018. Т.20. №1-2. С. 111-112.

11. Mazanov S.V., Gumerov F.M., Ysmanov R.A., Gabitova A.S., Zarirov Z.I., Varfolomeev S.D., Voleva V.B., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J1 Sposoby polyjeniya // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2022. Т.24. №4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

12. Mazanov S.V., Zarirov Z.I., Gumerov F.M., Ysmanov R.A., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J2. Teplofizicheskie osnova system, yschtvyuyuchih v processe polyscheniya biodizilnogo topliva s

ispolzovaniem raboschih sred v sverhkritoscheskom flyuidnom sostiyanii // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2022. T.24. №4. С. 16-49. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-16-49.

13. Mazanov S.V., Gumerov F.M., Kyrdyukov A. I., Gabitova A.S., Ysmanov R.A., Safiyllina L.H., Zaripov Z.I., Shapovalov Yu. A. Biodizilnoe toplivo. J3. Kvantovo-himicheskoe issledovanie i modelirovanie processa // Izvestiya vyshyh ytshebnyh zavedeni. Problem Energetiki. 2023. T.25. № 1. С. 24-44. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-1-24-44.

14. Banashek V.E., Bygaev O.P., Solodkov V.V. i td. Ekstrakciya lipidov iz rastitelnogo I mikrobiologicheskogo cyrya szhizhennymi o szhatymi gazami. Obzornaya informaciya. 1989. Vyp. 5. 36с.

15. Liza M.S, Abdul Rahman R.A, Mandana B, Jinap S, Rahmat A, Zaidul I, Hamid A. Supercritical carbon dioxide extraction of bioactive flavonoid from *Strobilanthes crispus* (Pecah Kaca) // *Food Bioprod Process*. 2010. Vol. 88. pp. 319–326.

16. Governors V.V., Safina A.V. Water-vacuum extraction of birch chaga mushroom. Kazan: RIC SHKOLA; 2022. (In Russ).

Authors of the publication

Lyudmila Yu. Sabirova – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Lenar Yu. Yarullin – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. E-mail: yarul.lenar@gmail.com.

Ilnar Sh. Khabriev – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Yaroslava Yu. Korepanova – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Tatyana O. Shinkevich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **27.04.2024 г.**

Отредактировано **13.09.2024 г.**

Принято **19.09.2024 г.**



АЛГОРИТМ РАСЧЕТА МНОГОСЛОЙНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ТЕПЛООВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Чадаев А.Н.¹, Дмитриев А.В.², Зинуров В.Э.², Мугинов А.М.², Павлов Г.И.³

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический университет,
г. Казань, Россия
vadd_93@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Управление избытком и дефицитом выработки электрической энергии, способствующее стабилизации энергетической системы и повышению ее надежности, является актуальной задачей. Одним из решений является разработка и внедрение тепловых накопителей энергии в системы распределенной энергетики. Важной задачей при их разработке является создание эффективной системы теплоизоляции. **ЦЕЛЬ.** Разработка алгоритма для эффективного проектирования системы теплоизоляции тепловых накопителей энергии с высокотемпературным рабочим телом. **МЕТОДЫ.** Исследования проводятся с использованием теоретических методов, включая теплотехнический расчет слоев теплоизоляции и анализ теплопроводности. Используются методы математического моделирования для определения толщины системы теплоизоляции теплового накопителя энергии. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработана конструкция теплового накопителя энергии. На основе разработанного алгоритма определено, что толщина системы теплоизоляции должна составлять 151 мм (толщина первого теплоизоляционного контура – 135 мм, толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты – 16 мм), обеспечивая минимальные тепловые потери при температуре теплоаккумулятора равной 2000 °С. Выявлено, что в слоях, ближайших к графиту, преобладает лучистый тепловой поток, составляющий около 70% от общего потока. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследование подтвердило эффективность предложенной многослойной системы теплоизоляции для теплового накопителя энергии. Разработанный алгоритм позволяет проводить расчёт систем теплоизоляции теплового накопителя энергии, который учитывает различные параметры и условия эксплуатации.

Ключевые слова: тепловой накопитель энергии; система теплоизоляции; система распределенной энергетики; теплоаккумулятор; аккумулятор энергии.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061.

Для цитирования: Чадаев А.Н., Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Мугинов А.М., Павлов Г.И. Алгоритм расчета многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 166-179. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

CALCULATION ALGORITHM FOR A MULTILAYER THERMAL INSULATION SYSTEM OF A THERMAL ENERGY STORAGE DEVICE WITH A HIGH-TEMPERATURE WORKING FLUID

Chadaev A.N.¹, Dmitriev A.V.², Zinurov V.E.², Muginov A.M.², Pavlov G.I.³

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia
vadd_93@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Managing the surplus and deficit of electric power generation, which contributes to the stabilization of the energy system and enhances its reliability, is a pressing issue. One of the solutions is the development and implementation of thermal energy storage systems within distributed energy systems. An important task in their development is creating an effective insulation system. **THE PURPOSE.** To develop an algorithm for the effective design of insulation systems for thermal energy storages with high-temperature working bodies. **METHODS.** The research is carried out using theoretical methods, including thermal engineering calculation of thermal insulation layers and thermal conductivity analysis. Mathematical modeling methods were used to determine the thickness of the thermal insulation system of a thermal energy storage device. **RESULTS.** The design of a thermal energy storage device has been developed. Based on the developed algorithm, it was determined that the thickness of the thermal insulation system should be 151 mm (the thickness of the first thermal insulation circuit is 135 mm, the thickness of the second thermal insulation layer made of mineral wool is 16 mm), ensuring minimal heat loss at a temperature of the heat accumulator equal to 2000 °C. It was revealed that the radiant heat flux prevails in the layers closest to graphite, accounting for about 70% of the total flux. **CONCLUSION.** The study confirmed the effectiveness of the proposed multi-layer insulation system for thermal energy storage. The developed algorithm allows for the calculation of insulation systems of thermal energy storage, taking into account various parameters and operating conditions.

Keywords: thermal energy storage; Insulation system; distributed energy system; heat accumulator; energy storage.

Acknowledgments: the study was carried out with the financial support of the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20061.

For citation: Chadaev A.N., Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Muginov A.M., Pavlov G.I. Calculation algorithm for a multilayer thermal insulation system of a thermal energy storage device with a high-temperature working fluid. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 166-179. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-166-179.

Введение (Introduction)

В последнее десятилетие актуальным направлением в энергетической сфере является повышение эффективности использования электрической и тепловой энергий с сокращением углеродных выбросов. Одним из перспективных решений данной задачи является применение накопителей энергии, что позволит перейти к созданию устойчивых энергетических систем. Они представляют собой устройства, способные аккумулировать избыточную энергию и отдавать ее при возникновении потребности в ней, что является критически важным для балансировки сети и повышения ее эффективности [1-3].

Накопители энергии классифицируют по основным 4 группам: механические, электрохимические, электромагнитные и тепловые. Каждая из них имеет свои преимущества и ограничения, определяющие области их наиболее эффективного применения [4].

Механические накопители энергии, например, гидроаккумулирующие станции, характеризуются высокой мощностью и долговечностью, используют физические принципы накопления потенциальной или кинетической энергии. Они могут быть особенно полезны в масштабах, требующих значительного накопления мощности, но ограничены географическим расположением и требуют существенных начальных инвестиций [5].

Электрохимические накопители энергии, включая различные типы аккумуляторов, обеспечивают высокую плотность энергии и быстрый отклик на изменения в потреблении, что делает их идеальными для использования в качестве резервных источников питания и для сглаживания пиков нагрузки. Их главным недостатком является ограниченный срок службы и уменьшение емкости со временем, что требует регулярной замены и повторного использования или переработки отработанных элементов [6].

Электромагнитные накопители энергии, например, сверхпроводящие магнитные накопители и конденсаторы, представляют собой устройства, которые используют магнитное поле для хранения энергии в электрическом виде, обеспечивая практически мгновенный доступ к накопленной энергии. Они являются крайне актуальными при

потребности в высокой мощности в краткосрочном периоде времени, например, стабилизация частоты и качества электроэнергии в энергетических системах. Однако, электромагнитные накопители сталкиваются с рядом вызовов, включая высокую стоимость сверхпроводящих материалов и ограниченный срок службы конденсаторов [7].

Тепловые накопители энергии, использующие различные физические процессы для хранения тепла, представляют собой одно из наиболее перспективных направлений в контексте устойчивой энергетики. Эти устройства позволяют сохранять тепловую энергию, полученную от различных источников: мини-ТЭС, возобновляемыми источниками (солнечные коллекторы, панели, ветрогенераторы и др.) и использовать её для отопления, генерации электроэнергии в необходимый момент времени или других целей. Преимуществами тепловых накопителей являются их высокая эффективность, долговечность и способность к работе в широком диапазоне температур. Это способствует повышению эффективности энергосистемы в целом и уменьшению воздействия на окружающую среду [8]. Особое внимание уделяется выбору материалов для хранения тепловой энергии, поскольку от их свойств зависят наиболее важные характеристики системы: емкость, скорость заряда и разряда, стабильность работы в условиях высоких температур [9, 10].

Таким образом, тепловые накопители энергии играют важную роль в создании устойчивых и эффективных энергетических систем, способствуя интеграции возобновляемых источников энергии, сокращению углеродных выбросов и повышению энергетической безопасности.

В литературе представлено множество работ посвященных исследованию тепловых накопителей энергии, используемых в различных практических приложениях. Как отмечалось, одними из ключевых компонентов в тепловых накопителях энергии являются теплоаккумулятор, теплоноситель и система теплоизоляции, каждый из которых играет важную роль процесса хранения и передачи энергии. Теплоаккумулятор представляет собой материал или композит, способный накапливать тепловую энергию. В качестве таких материалов выступают органические соединения (парафины, жирные кислоты, этиленгликоль и др.), неорганические соединения (соли, гидраты солей, графит и др.), полимерные материалы. В исследовании [11] Pielichowska и Pielichowski рассматривали материалы с фазовым переходом, которые накапливают и отдают тепловую энергию путем изменения фазы, обеспечивая высокую плотность хранения при относительно небольшом перепаде температур. В работе [12] Асем и др. изучали материалы на основе графита и соли ($KNO_3/NaNO_3$) для теплового накопления при высоких температурах. Представлена методика изготовления таких композитов и анализируются их термические свойства. Опыты показали, что добавление графита значительно улучшает теплопроводность солей, что может быть полезно для систем теплового накопления, используемых, например, в солнечной энергетике. Badenhorst [13] рассматривал углеродные материалы, включая натуральный и синтетический графит, в качестве потенциальных компонентов для тепловых накопителей, используемых в солнечной тепловой энергетике. Углеродные материалы могут улучшить теплопроводность фазоизменяющих материалов, что критически важно для повышения эффективности систем теплового накопления.

Для передачи тепла к теплоаккумулятору используются различные теплоносители. В солнечных энергосистемах и большинстве промышленных применений обычно используется вода или масло из-за их высокой теплоемкости и теплопроводности. Однако в недавних исследованиях рассматриваются и альтернативные теплоносители [14, 15], такие как жидкие металлы, которые перемещаются с помощью магнитогидродинамического насоса (МГД), не имеющего движущих частей. В работе [16] Zhang и др. рассмотрели использование порошковых циркуляционных контуров для улучшения теплообмена в тепловых накопителях энергии.

Эффективная теплоизоляция может значительно повысить общую эффективность системы за счёт уменьшения потерь накопленной энергии. В последние годы значительное внимание уделяется разработке и применению аэрогелей для теплоизоляции в различных отраслях промышленности. В работе [17] Cuse и др. рассмотрено применение аэрогелей из диоксида кремния, которые известны высокими теплоизоляционными свойствами, но теряют их при температурах выше 600 °С. Современные разработки позволяют создавать аэрогели, способные выдерживать температуры свыше 1000 °С, что расширяет их потенциальные области применения. В статье [18] исследовано применение термостойких аэрогелей, которые могут функционировать при температурах выше 800 °С. Волокнистые материалы, такие как

оксидные волокна (базальтовые, кварцевые, кремнеземные), традиционно используются в промышленности, т. к. отличаются стойкостью к высоким температурам до 1000 °С. Однако для условий, требующих более высоких температур, используются волокна из более тугоплавких материалов, таких как оксид алюминия и муллит, которые выдерживают температуры до 1700 °С и выше. В статье [19] рассмотрено применение волокон оксида циркония, которые могут эксплуатироваться при температурах до 2200 °С. Кроме того, существуют различные керамические материалы с пористой структурой, которые также могут применяться для теплоизоляции в условиях высоких температур. Керамические материалы, такие как карбид кремния (SiC), нитрид кремния (Si₃N₄), оксид алюминия (Al₂O₃) и диоксид циркония (ZrO₂), могут использоваться в аккумуляторах теплоты благодаря их высокой температуре плавления [20].

Таким образом, разработка эффективных тепловых накопителей энергии требует комплексного подхода, включающего выбор подходящего теплоаккумулятора, теплоносителя и системы теплоизоляции. Учет всех этих составляющих является актуальной задачей для устойчивого развития в энергетической сфере, способствуя повышению энергетической эффективности и снижению углеродных выбросов.

Целью работы является разработка алгоритма для эффективного проектирования системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом.

Научная значимость исследования состоит в разработке алгоритма для расчёта многослойной системы теплоизоляции теплового накопителя энергии с высокотемпературным рабочим телом.

Практическая значимость исследования заключается в повышении эффективности и надёжности тепловых накопителей энергии, что способствует стабилизации энергетических систем и снижению эксплуатационных затрат.

Авторским коллективом был разработан накопитель тепловой энергии (рис. 1). В качестве теплоаккумулятора из твердого высокотемпературного рабочего тела 3 выступает графитовый порошок, т. к. он обладает высокой теплопроводностью, термической стабильностью (сохранение физических и химических свойств при высоких температурах, например, его плавление происходит при температуре около 3650 °С) и является относительно недорогим материалом. Передача или отвод тепловой энергии к графиту или от него осуществляется посредством жидкометаллического высокотемпературного теплоносителя, в качестве которого использовалось олово 1. Его выбор был обусловлен низкой температурой плавления, составляющей около 232 °С, высокой теплопроводностью, химической стабильностью и относительно невысокой стоимостью. В накопителе энергии олово 1 перекачивается через цилиндрический канал 2. В качестве которого был выбран вольфрам, т. к. он обладает высокой температурой плавления, составляющей около 3420 °С, прочностью и жесткостью при высоких температурах. По этой же причине графитовый порошок (теплоаккумулятор) 3 размещен в цилиндрической емкости 4, выполненной из вольфрама. Ввиду высоких рабочих температур, соответственно, и тепловых потерь, теплоизоляция накопителя тепловой энергии состоит из вольфрамового экранирования 5 и минеральной ваты 7. Для повышения прочности конструкции накопителя энергии между ними размещен цилиндрический металлический корпус 6. Цилиндрическая емкость хранения теплоаккумулятора 4 в накопителе энергии размещается на опорах 9. В верхней части теплового накопителя энергии располагается патрубок 8, предназначенный для выкачки воздуха и закачки аргона внутрь емкости. При температурах выше 400 °С графит в присутствии воздуха начинает окисляться, что приводит к его постепенному разрушению и потере теплопроводных свойств. При окислении графита образуется углекислый газ CO₂. В результате уменьшается количество активного теплоаккумулирующего материала и возникает вероятность нарушения герметичности и структурной целостности накопителя энергии. Использование аргона, являющегося инертным газом, позволяет предотвратить химическую реакцию между графитом и кислородом. Таким образом, обеспечивается стабильность и долговечность работы накопителя тепловой энергии. К достоинствам аргона можно отнести невысокую стоимость относительно, например, ксенона или криптона.

Разработанный накопитель (рис. 1) предлагается использовать в системе распределенной энергетики в качестве устройства управления избытком и дефицитом выработки электрической энергии. В периоды избыточной генерации, например, солнечными панелями, ветрогенераторами, мини-ТЭС и др., ее избыток может быть использован для нагрева высокотемпературного теплоносителя (олово) посредством

трубчатого электронагревателя (ТЭН) до температуры 2000-2500 °С. Стоит отметить, что при температуре около 2600 °С олово начинает испаряться, что существенно влияет на теплопередачу. При температуре ниже 232 °С олово находится в твердом агрегатном состоянии. Ввиду этого классические насосы для его перекачки не могут быть использованы. Поэтому применяются магнетогидродинамические (МГД) насосы. Таким образом, нагретый до высокой температуры теплоноситель перекачивается через тепловой накопитель энергии, в котором отдает тепловую энергию высокотемпературному рабочему телу (графиту), нагреваемому до температуры 2000-2500 °С. В периоды дефицита электрической энергии осуществляется обратный цикл. Олово нагревается до изменения агрегатного состояния, далее в жидком состоянии перекачивается через тепловой накопитель, отбирая тепловую энергию от графита. Далее олово перекачивается через линию, включающую МГД генератор, который преобразует тепловую энергию в электрическую.

Актуальной задачей повышения эффективности работы накопителя тепловой энергии (рис. 1) является снижение тепловых потерь. Очевидно, что при высоких температурах применение классических теплоизоляционных материалов не представляется возможным, т. к. температура их плавления ниже 2000 °С. Также при высоких температурах теплотери в большей мере обусловлены лучистым теплообменом. Ввиду данных обстоятельств первый контур теплоизоляции представлен вольфрамовым экранированием, выполненным в несколько слоев, второй теплоизоляционный слой представлен минеральной ватой. Для обеспечения функционирования накопителя тепловой энергии, уменьшения его габаритных размеров и экономической стоимости необходима разработка расчетной методики для определения толщины теплоизоляционных слоев.

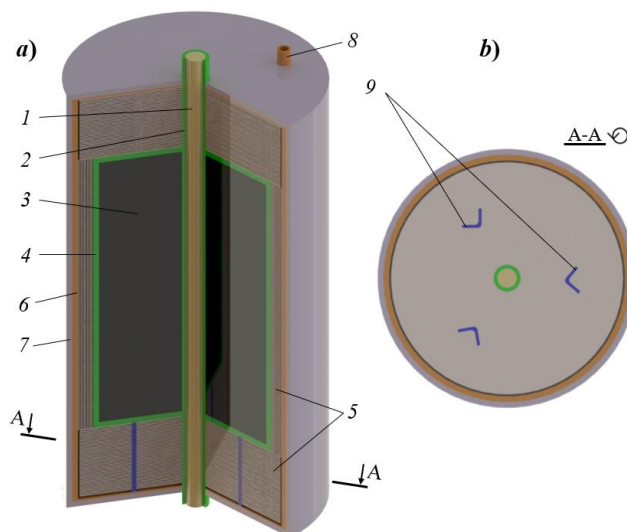


Рис. 1. Трехмерная модель накопителя тепловой энергии переодического действия: 1 – жидкометаллический высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – цилиндрический канал из тугоплавкого материала (вольфрам); 3 – теплоаккумулятор из твердого высокотемпературного рабочего тела (графит); 4 – цилиндрическая емкость из вольфрама для хранения теплоаккумулятора; 5 – вольфрамовое экранирование; 6 – цилиндрический металлический корпус; 7 – теплоизоляционный материал (минеральная вата); 8 – патрубок; 9 – опоры. а) вид со сложным разрезом; б) вид с наклонным разрезом начальной модели (без разрезов) секущей плоскостью в сечении А-А

Fig. 1. Three-dimensional model of a periodic action thermal energy storage: 1 – liquid metal high-temperature heat transfer fluid; 2 – cylindrical channel made of refractory material; 3 – heat accumulator made of solid high-temperature working substance; 4 – cylindrical container for storing the heat accumulator; 5 – shielding; 6 – cylindrical casing; 7 – thermal insulation; 8 – nozzle; 9 – supports. a) the view with a complex section; b) the view with an inclined section of the initial model (without sections) with a secant plane in section A-A

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

Для ее разработки модель накопителя тепловой энергии (рис. 1) была упрощена. Схема которой представлена на рисунке 2, состоящая из 5 основных зон: 1 –

высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – нагретый графит, 3 – первый теплоизоляционный контур (вольфрамовое экранирование), представляющий собой множество дискретных вольфрамовых слоев, между которыми находится аргон, 4 – второй теплоизоляционный слой из минеральной ваты, 5 – внешняя среда.

Материал и методы (Material and methods)

В качестве исходных данных принималось, что к теплоаккумулятору – графиту 2 радиусом $r = 125$ мм подводится тепловой поток $Q = 800$ Вт высокотемпературным теплоносителем (олово) 1. В рамках допущения принималось, что тепловой поток через графит 2 распределяется равномерно в осесимметричном направлении. Процесс стационарный. Температура на наружной поверхности графита $t_{1,0}$ принималась 2000 °С. Количество слоев первого теплоизоляционного контура 3, общая его толщина δ_1 и толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 рассчитывались на основании следующих условий: 1) температура внешней среды t_f составляет 20 °С; 2) температура на стыке между вольфрамовым слоем и минеральной ватой $t_{1,i}$ составляет менее 900 °С, что исключает вероятность ее плавления; 3) температура наружной поверхности минеральной ваты t_2 составляет от 50 до 350 °С (обоснование данного условия будет представлено ниже).

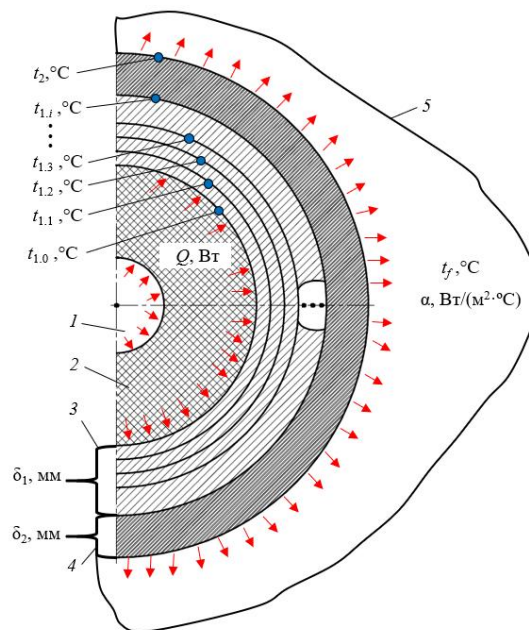


Рис. 2. Упрощенная схема распределения тепловых потерь в тепловом накопителе энергии: 1 – высокотемпературный теплоноситель (олово); 2 – нагретый графит, 3 – первый теплоизоляционный контур; 4 – второй теплоизоляционный слой из минеральной ваты, 5 – внешняя среда

Fig. 2. Simplified diagram of heat loss distribution in a thermal energy storage system: 1 – high-temperature heat transfer fluid (tin); 2 – heated graphite; 3 – first thermal insulation contour; 4 – second thermal insulation layer made of mineral wool; 5 – external environment

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

В рамках расчета принималось, что толщина каждого слоя теплоизоляционного контура составляет 1 мм, состоящего из тонкого гофрированного вольфрама $0,1$ мм и прослойки аргона $0,9$ мм. Ввиду малой толщины стенки гофрированного вольфрама и относительно высокой рабочей температуры, расчетом теплового потока через нее пренебрегалось. Таким образом, общий тепловой поток $Q_{1,i}$, Вт, проходящий через каждый i -ый слой теплоизоляционного контура 3 (рис. 2), а именно через прослойку аргона без учета вольфрамовой стенки, представляет собой сумму лучистого $Q_{R(1,i)}$, Вт, кондуктивного $Q_{T(1,i)}$, Вт, и конвективного $Q_{C(1,i)}$, Вт, потоков, рассчитывался по формуле (1):

$$Q_{1,i} = Q_{R(1,i)} + Q_{T(1,i)} + Q_{C(1,i)}, \quad (1)$$

где i – номер слоя в теплоизоляционном контуре 3 (рис. 2).

Лучистый тепловой поток $Q_{R(1,i)}$ рассчитывался по закону Стефана-Больцмана (2):

$$Q_{R(1,i)} = C_{i-i+1} F_i \left[\left(\frac{T_{1,i}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{1,i+1}}{100} \right)^4 \right] \varphi, \quad (2)$$

где C_{i-i+1} – коэффициент взаимного излучения, Вт/(м²·К⁴); F_i – площадь излучающей поверхности, м²; $T_{1,i}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки i -ого слоя, К; $T_{1,i+1}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя, К; φ – средний угловой коэффициент, определяемый формой и размерами участвующих в теплообмене поверхностей, их взаимным расположением и расстоянием между ними.

При расчете первого слоя теплоизоляционного контура 3, согласно рисунку 2, в формуле (2), $T_{1,i} = t_{1,0} + 273,15$ и $T_{1,i+1} = t_{1,1} + 273,15$.

Коэффициент взаимного излучения C_{i-i+1} рассчитывался по выражению (3), которое применяется при условии, что излучающее тело заключено внутри другого. По этой же причине средний угловой коэффициент φ принимался равным 1.

$$C_{i-i+1} = \frac{1}{\frac{1}{C_i} + \frac{F_i}{F_{i+1}} \left(\frac{1}{C_{i+1}} - \frac{1}{C_0} \right)}, \quad (3)$$

где C_i и C_{i+1} – коэффициент излучения вольфрамовой стенки i -ого и $(i+1)$ -го слоя соответственно, Вт/(м²·К⁴); F_{i+1} – площадь излучающей поверхности, м²; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютного черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Параметры C_i и C_{i+1} рассчитываются по выражениям (4) и (5) соответственно.

$$C_i = C_0 \varepsilon_i, \quad (4)$$

где ε_i – коэффициент излучения вольфрамовой стенки i -ого слоя.

$$C_{i+1} = C_0 \varepsilon_{i+1}, \quad (5)$$

где ε_{i+1} – коэффициент излучения вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя.

Кондуктивный тепловой поток $Q_{T(1,i)}$ рассчитывался по выражению (6):

$$Q_{T(1,i)} = \frac{2\pi h \lambda_f (t_{1,i} - t_{1,i+1})}{\ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}, \quad (6)$$

где h – высота вольфрамовой стенки, м; λ_f – коэффициент теплопроводности аргона, Вт/(м·°С); $t_{1,i}$ – абсолютная температура вольфрамовой стенки i -ого слоя, °С; $T_{1,i+1}$ – температура вольфрамовой стенки $(i+1)$ -го слоя, °С, r_i и r_{i+1} – радиус вольфрамовой стенки i -ого и $(i+1)$ -го слоя соответственно, м.

Ввиду того, что теплообмен происходит в замкнутом ограниченном пространстве, расчет конвективного теплообмена рассматривают условно, по формуле (6), как перенос тепла только теплопроводностью, вводя в расчет эквивалентный коэффициент теплопроводности λ_e , Вт/(м·°С), который вычисляется по выражению (7).

$$\lambda_e = \varepsilon_k \lambda_f, \quad (7)$$

где ε_k – коэффициент конвекции, который принимается 1 при GrPr < 1000 или рассчитывается по выражению (8) при GrPr > 1000.

$$\varepsilon_k = 0,18(\text{Gr Pr})^{0,25}, \quad (8)$$

где Gr – число Грасгофа, рассчитываемое по формуле (9); Pr – число Прандтля.

$$\text{Gr} = \frac{g h^3 \beta (t_{1,i} - t_{1,i+1})}{\nu^2}, \quad (9)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – температурный коэффициент объемного расширения, рассчитываемый по выражению (10), 1/К; ν – коэффициент кинематический вязкости, м²/с.

$$\beta = \frac{1}{273 + t_{1,i+1}}, \quad (10)$$

Таким образом, выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$Q_{1,i} = Q_{R(1,i)} + \varepsilon_k Q_{T(1,i)}, \quad (11)$$

Общий тепловой поток Q_2 , Вт, проходящий через второй теплоизоляционный слой 4 из минеральной ваты (рис. 2), очевидно, равен кондуктивному тепловому потоку. По аналогии с выражениями (1) и (6) можно записать:

$$Q_2 = \frac{2\pi h \lambda (t_{1,i} - t_2)}{\ln \frac{r_m}{r_{1,i}}}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности минеральной ваты, Вт/(м·°C); r_m – наружный радиус стенки минеральной ваты, м.

Общий тепловой поток Q_3 , Вт, от наружной стенки теплового накопителя энергии во внешнюю среду 5 (рис. 2) равен конвективному тепловому потоку, который рассчитывается по выражению (13):

$$Q_3 = F_m \alpha (t_2 - t_f), \quad (13)$$

где F_m – площадь наружной стенки из минеральной ваты, м²; α – коэффициент теплоотдачи от наружной стенки накопителя энергии к внешней среде, Вт/(м²·°C); t_f – температура внешней среды, °C.

При расположении исследуемого объекта в закрытом помещении коэффициент теплоотдачи α определяется по эмпирическому выражению (14). Стоит отметить, что оно применимо к следующему температурному диапазону: $50 < t_2, \text{ °C} < 350$. Поэтому при расчете толщины теплоизоляции теплового накопителя энергии температура наружной поверхности минеральной ваты t_2 должна составлять от 50 до 350 °C, как указывалось ранее.

$$\alpha = 9,3 + 0,058t_2, \quad (14)$$

Отметим, что толщина каждого теплоизоляционного слоя рассчитывалась через общеизвестное выражение (15):

$$\delta_i = r_{i+1} - r_i, \quad (15)$$

Анализ выражений (1-15) показывает, что для определения толщины, как первого теплоизоляционного контура, так и второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты необходимо рассчитать распределение температурного поля в тепловом накопителе энергии с учетом требований к температурам на границах различных слоев, рассмотренных выше.

В случае несоответствия расчетных температур установленным их значениям на некоторых границах, представленных выше, необходимо увеличить толщину теплоизоляции. Ввиду этого в ходе итерационных расчетов проводилось увеличение толщины первого теплоизоляционного контура δ_1 или толщины второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 с шагом – 0,1 мм. Также для решения выражений (1-15) необходимо задать ориентировочное значение разницы температур между соседними слоями теплоизоляционного контура 3 (рис. 2) $\Delta T = T_{1,i} - T_{1,i+1} = t_{1,i} - t_{1,i+1}$. Критерием сходимости было достижение тепловыми потоками $Q_{1,i}$ и Q_3 заданного значения $Q = 800$ Вт. В ходе итерационных расчетов ΔT задавался с шагом 0,1 °C (0,1 K).

Таким образом, для определения толщины теплоизоляционного контура δ_1 , толщины теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 и получения температурного поля в тепловом накопителе энергии был разработан алгоритм из выражений (1-15) в виде программного кода, упрощенная блок-схема которого представлена на рисунке 3. Рассмотрим основные этапы. 1. Ввод числовых значений известных параметров. В том числе температуры на наружной поверхности графита $t_{1,0} = 2000$ °C и теплового потока $Q = 800$ Вт. 2-8. Расчет температур на слоях теплоизоляционного контура. 2-4. Итерационный цикл. 3-4. Ввод ориентировочной разницы температур между соседними слоями теплоизоляционного контура 3 первого слоя (рис. 2) $\Delta T_j = 0,1$ K. 5-6. Расчет теплового потока в первом слое контура $Q_{1,1}$ по выражениям (1-11) и его сравнение с заданным Q . Если расхождение более 1%, то переход к следующей итерации через шаг 7. Если расхождение менее 1%, переход к шагу 8, далее к шагу 9, на котором выполняется проверка – температура наружного слоя теплоизоляционного контура менее или более 900 °C. Если более, то осуществляется переход к шагу 10, т. е. прибавляется добавочный i -ый слой в теплоизоляционном контуре. Таким образом, определяется сколько слоев должен содержать теплоизоляционный контур. Если менее, то переход к шагу 11. 11-14. Определение толщины теплоизоляционного слоя из минеральной ваты δ_2 . Расчет по формулам (11) и (15). 12. Ввод ориентировочного значения $\delta_2 = 0,1$ мм. 13. Расчет наружной температуры теплоизоляционного слоя из минеральной ваты t_2 . 14. Проверка соответствия t_2 диапазону от 50 до 350 °C. Если нет, то переход к шагу 15 – увеличение толщины δ_2 на 0,1 мм. Если да, то переход к шагу 16 – расчет коэффициента теплоотдачи от накопителя тепловой энергии к внешней среде α , Вт/(м²·°C) и Q_3 , Вт по выражениям (13) и (14) соответственно. 17. Сравнение рассчитанного Q_3 с заданным Q . Если расхождение более 1%, то возврат к шагу 14. Если расхождение менее 1%, осуществляется расчет и вывод искомым параметров (шаги 17 и 18).

В ходе расчётов все теплофизические параметры были определены как функции, аппроксимируемые по температуре. Таким образом, значения параметров обновлялись

при каждой итерации и при переходе к расчёту следующего слоя теплоизоляционного контура.

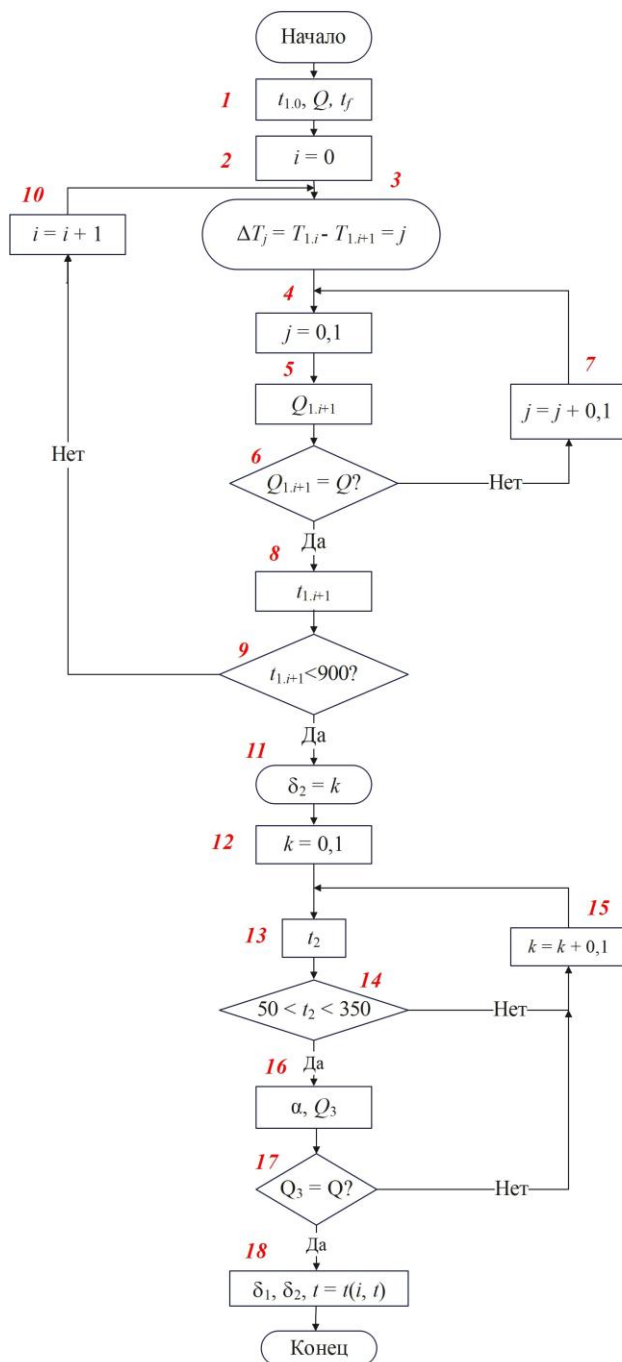


Рис. 3. Упрощенная блок-схема для определения температур в системе теплоизоляции теплового накопителя энергии

Fig. 3. Simplified flowchart for determining temperatures in the thermal insulation system of a thermal energy storage device

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

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Результаты исследования показали, что предлагаемая система теплоизоляции, состоящая из первого теплоизоляционного контура, включающего вольфрамовое экранирование и прослойки аргона, и второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты, является эффективной для снижения теплопередачи от центрально расположенного теплоаккумулятора, нагретого до 2000 °С, во внешнюю среду, температура которой составляет 20 °С, при постоянном тепловом потоке 800 Вт, через нее. Получено, что общая толщина системы теплоизоляции теплового накопителя энергии δ должна составлять 155 мм (рис. 4). В ходе исследования проанализировано в качественном и количественном соотношении различные виды тепловых потоков (лучистый,

кондуктивный и конвективный) от общего теплового потока на различном удалении от теплоаккумулятора в тепловом накопителе энергии. При высоких температурах, т. е. ближе к графиту ($R < 263$ мм или $\delta < 138$ мм), преобладает тепловой поток излучением. По мере падения температуры в слое теплоизоляции наблюдается увеличение доли конвективного теплового потока в связи с уменьшением вязкости газа. Стоит отметить, что она оценивалась на основе вклада коэффициента конвекции ϵ_k при расчете общего теплового потока $Q_{1,i}$ по выражению (11). Можно предположить, что конвекция в закрытом пространстве имеет место быть ввиду большого градиента температур. Во втором теплоизоляционном слое из минеральной ваты тепловая энергия полностью передается за счет теплопроводности (рис. 5).

Первый теплоизоляционный контур должен состоять из 135 вольфрамовых экранов ($\delta_1 = 135$ мм). При данных геометрических размерах температура наружной поверхности теплоизоляционного контура будет снижена до 877 °С, что позволит использовать в качестве второго теплоизоляционного слоя более дешевый классический теплоизоляционный материал, например, минеральную вату. При таком подходе минимальная толщина второго теплоизоляционного слоя δ_2 должна составлять 16 мм. Температура наружной поверхности минеральной ваты будет снижена до 129 °С (рис. 4) согласно алгоритму расчета (рис. 3). При температурах более 900 °С применение тепловых экранов является одним из наиболее эффективных методов теплоизоляции.

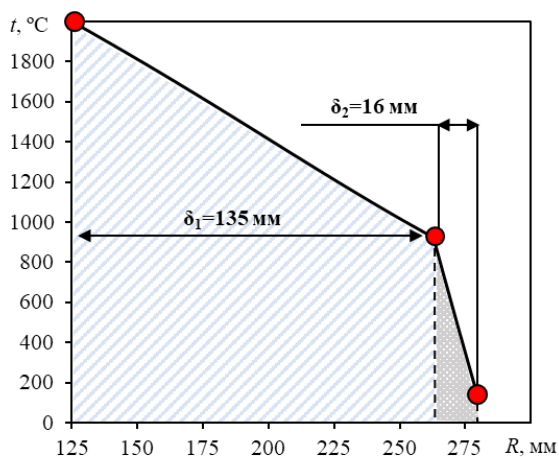


Рис. 4. Зависимость температуры от радиуса в цилиндрическом слое теплоизоляции теплового накопителя энергии

Fig. 4. Temperature dependence on radius in the cylindrical layer of thermal insulation of a thermal energy storage

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

Общий заданный тепловой поток Q , Вт разбивается на три тепловых потока (лучистый, кондуктивный и конвективный) в слоях теплоизоляционного контура. По мере удаления от теплоаккумулятора доля лучистого теплового потока в первом теплоизоляционном контуре постепенно уменьшается, т. к. температура на границах слоев снижается (рис. 5).

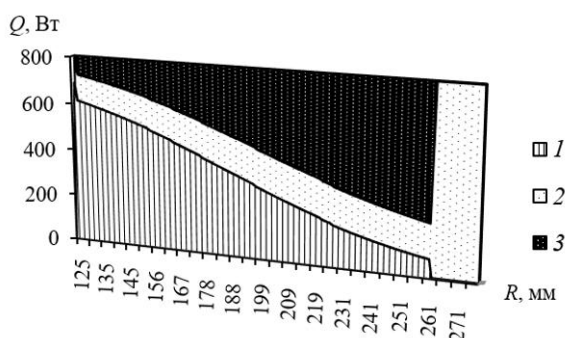


Рис. 5. Распределение различных видов тепловых потоков в зависимости от расстояния от центра теплового накопителя энергии: 1 – лучистый; 2 – кондуктивный; 3 – конвективный

Fig. 5. Distribution of different types of heat fluxes depending on the distance from the center of the thermal energy accumulator: 1 – radiant; 2 – conductive; 3 – convective

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

Проведенное исследование подтверждает, что использование многослойной системы теплоизоляции, включающей как вольфрамовое экранирование с аргоновыми прослойками, так и минеральную вату, позволяет значительно снизить теплопередачу от горячего теплоаккумулятора к внешней среде. Это не только увеличивает эффективность системы хранения тепловой энергии, но и снижает потери энергии, делая систему более экономически выгодной и экологически устойчивой. Зная значения температур в каждом слое, становится возможным в качестве материалов экранов использовать не только вольфрам, но и другие материалы, например сталь. Это становится возможным сделать там, где температура экранов становится ниже температуры использования стали.

Разработанный алгоритм представляет собой универсальный инструмент для расчёта систем теплоизоляции, адаптируемый к широкому спектру температур, тепловых потоков и различных типов теплоизоляционных материалов. Благодаря своей гибкости алгоритм может быть эффективно применён для проектирования теплоизоляции в самых разнообразных условиях, от высокотемпературных промышленных процессов до систем хранения энергии, где критичны как сохранение тепла, так и его равномерное распределение.

В перспективе планируется значительное расширение функционала разработанного алгоритма за счёт включения экономических параметров, таких как стоимость материалов, эксплуатационных расходов и др. Это позволит интегрировать в алгоритм критерий стоимости, благодаря которому можно будет определить наиболее эффективный тип теплоизоляции и оптимальную толщину слоёв. Такой подход обеспечит не только технически обоснованный выбор, но и экономически выгодное решение для конкретных условий.

Выводы (Conclusions)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложена конструкция теплового накопителя энергии, которая может быть эффективно интегрирована в систему распределённой энергетики. Устройство позволяет управлять избытком и дефицитом выработки электрической энергии, что способствует стабилизации энергосистемы и повышению её надёжности.

2. Разработан универсальный алгоритм для расчёта систем теплоизоляции теплового накопителя энергии, который учитывает различные параметры и условия эксплуатации.

3. Общая толщина системы теплоизоляции теплового накопителя энергии должна составлять 151 мм (толщина первого теплоизоляционного контура из вольфрамовых экранов – 135 мм, толщина второго теплоизоляционного слоя из минеральной ваты – 16 мм), что обеспечивает эффективное снижение теплопередачи от теплоаккумулятора к внешней среде до заданного при расчете теплового потока 800 Вт.

4. Установлено, что в слоях системы теплоизоляции, расположенных в непосредственной близости к теплоаккумулятору, преобладает лучистый тепловой поток, который составляет около более 70% от общего теплового потока. По мере удаления от теплоаккумулятора увеличивается доля кондуктивного и конвективного теплового потока

Литература

1. Pimm, A.J., Palczewski, J., Barbour, E.R. et. al. Using electricity storage to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Energy*. 2021; 282:116199. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116199.
2. Alva G., Lin Y., Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018;144:341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037
3. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. 2020 Ural Smart Energy Conference. 2020. pp. 68-71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236
4. Baker J. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*. 2008;36(12):4368-4373. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.040.
5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A.G. et. al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;210:112670. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112670.
6. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
7. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
8. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.

9. Han G. G. D., Li H., Grossman J. C. Optically-controlled long-term storage and release of thermal energy in phase-change materials. *Nature communications*. 2017;8(1):1446. doi: 10.1038/s41467-017-01608-у.
10. Jamekhorshid A., Sadrameli S. M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:531-542. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
11. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*. 2014;65:67-123. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2014.03.005.
12. Acem Z., Lopez J., Del Barrio E. P. KNO₃/NaNO₃ – Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I.–Elaboration methods and thermal properties. *Applied thermal engineering*. 2010;30(13):1580-1585. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.03.013.
13. Badenhorst H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage. *Solar Energy*. 2019;192:35-68. doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.01.062.
14. Pacio J., Wetzel T. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems. *Solar Energy*. 2013;93:11-22. doi: 10.1016/J.SOLENER.2013.03.025.
15. Niedermeier, K., Mueller-Trefzer, F. Theoretical and experimental studies of dual-media thermal energy storage with liquid metal. In: Daubner, M., Marocco, L., Weisenburger, A. et. al. editors. AIP Conference Proceedings. Solarpaces 2020: 26th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems; 28 September – 2 October 2020; Freiburg, Germany. AIP Conf. Proc. 2022;2445(1): 160011.
16. Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G. et. al. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;53:1-40. doi: 10.1016/j.pecs.2015.10.003.
17. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. et. al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;34:273-299. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.017.
18. Hu, P., Liu, L., Zhao, M. Design, synthesis, and use of high temperature resistant aerogels exceeding 800 °C. *ES Materials & Manufacturing*. 2021;15:14-33. doi: 10.30919/esmm5f459.
19. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., Gil, P. Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of Thermophysics and heat transfer*. 2019;33(1):271-284. doi: 10.2514/1.T5420.
20. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Шакурова П.З. Обзор современных керамических ячеистых материалов и композитов, применяемых в теплотехнике. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2023;25(1):82-104. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>

Авторы публикации

Чадаев Алексей Николаевич – аспирант Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-3180-5933>, ac312@mail.ru.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» (АТПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com.

Зинуров Вадим Эдуардович – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» (ИГ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru.

Мугинов Арслан Маратович – студент Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0008-2914-6923>, aqwewerr@gmail.com.

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Специальные технологии в образовании» Казанского национального исследовательского технического университета (КНИТУ). *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, pavlov16@mail.ru.

References

1. Pimm, A.J., Palczewski, J., Barbour, E.R. et. al. Using electricity storage to reduce greenhouse gas emissions. *Applied Energy*. 2021; 282:116199. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116199.

2. Alva G., Lin Y., Fang G. An overview of thermal energy storage systems. *Energy*. 2018;144:341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037
3. Zinurov V., Nikandrova M., Kharkov V. Assessment of thermal storage technologies in energy sector. *2020 Ural Smart Energy Conference*. 2020. pp. 68-71. doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281236
4. Baker J. New technology and possible advances in energy storage. *Energy Policy*. 2008;36(12):4368-4373. doi: 10.1016/j.enpol.2008.09.040.
5. Mahmoud, M., Ramadan, M., Olabi, A.G. et. al. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;210:112670. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112670.
6. Soloveichik G. L. Battery technologies for large-scale stationary energy storage. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*. 2011;2:503-527. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
7. Morandi, A., Breschi, M., Ribani, P., et. al. Superconducting magnetic energy storage. *Energy Storage for Power Systems*. 2020. doi: 10.1049/pbpo063e_ch11.
8. Yuan K., Shi, J., Aftab, W., et. al. Engineering the thermal conductivity of functional phase-change materials for heat energy conversion, storage, and utilization. *Advanced Functional Materials*. 2020;30(8):1904228. doi: 10.1002/adfm.201904228.
9. Han G. G. D., Li H., Grossman J. C. Optically-controlled long-term storage and release of thermal energy in phase-change materials. *Nature communications*. 2017;8(1):1446. doi: 10.1038/s41467-017-01608-y.
10. Jamekhorshid A., Sadrameli S. M., Farid M. A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;31:531-542. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
11. Pielichowska K., Pielichowski K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*. 2014;65:67-123. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2014.03.005.
12. Acem Z., Lopez J., Del Barrio E. P. KNO₃/NaNO₃ – Graphite materials for thermal energy storage at high temperature: Part I.–Elaboration methods and thermal properties. *Applied thermal engineering*. 2010;30(13):1580-1585. doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.03.013.
13. Badenhurst H. A review of the application of carbon materials in solar thermal energy storage. *Solar Energy*. 2019;192:35-68. doi: 10.1016/J.SOLENER.2018.01.062.
14. Pacio J., Wetzel T. Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems. *Solar Energy*. 2013;93:11-22. doi: 10.1016/J.SOLENER.2013.03.025.
15. Niedermeier, K., Mueller-Trefzer, F. Theoretical and experimental studies of dual-media thermal energy storage with liquid metal. In: Daubner, M., Marocco, L., Weisenburger, A. et. al. editors. *AIP Conference Proceedings. Solarpaces 2020: 26th International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems; 28 September – 2 October 2020; Freiburg, Germany*. AIP Conf. Proc. 2022;2445(1): 160011.
16. Zhang, H., Baeyens, J., Cáceres, G. et. al. Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016;53:1-40. doi: 10.1016/j.peccs.2015.10.003.
17. Cuce, E., Cuce, P. M., Wood, C. J. et. al. Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;34:273-299. doi: 10.1016/j.rser.2014.03.017.
18. Hu, P., Liu, L., Zhao, M. Design, synthesis, and use of high temperature resistant aerogels exceeding 800 °C. *ES Materials & Manufacturing*. 2021;15:14-33. doi: 10.30919/esmm5f459.
19. Tychanicz-Kwiecień, M., Wilk, J., Gil, P. Review of high-temperature thermal insulation materials. *Journal of Thermophysics and heat transfer*. 2019;33(1):271-284. doi: 10.2514/1.T5420.
20. Soloveva O. V., Solovev S.A., Shakurova R.Z. Review of modern ceramic cellular materials and composites used in heat engineering. *Power Eng. Res. equipment, Technol.* 2023;25(1):82-104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-1-82-104>

Authors of the publication

Aleksey N. Chadaev – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0009-0004-3180-5933>, ac312@mail.ru.

Andrey V. Dmitriev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, ieremiada@gmail.com.

Vadim E. Zinurov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru.

Arslan M. Muginov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2914-6923>, aqwewerr@gmail.com.

Grigory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, pavlov16@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **21.05.2024 г.**

Отредактировано **06.11.2024 г.**

Принято **11.11.2024 г.**



ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ

Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В.

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и
дизайна. Высшая школа технологии и энергетики. Санкт-Петербург, Россия.

ryzhikov_vladimir@bk.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** В данной работе приводятся исследования физико-химических характеристик комбинированных топливных брикетов, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, полученных по инновационной технологии. **ЦЕЛЬЮ** исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов 2-го поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой. Снижение до минимума вреда для экологической составляющей и повышение максимальной энергетической и экономической эффективности. **МЕТОДЫ.** Для реализации поставленной цели, в работе были использованы следующие методы исследования: изучение термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности полимерных компонентов древесины в процессе формирования брикета, определение эмпирическим путем оптимальной композиции комбинированного брикета, для получения высокой теплотворной способности топлива, низкой концентрации вредных выбросов, высокой прочности и плотности готового продукта, определение низшей теплоты сгорания полученного брикета с помощью калориметрической установки, а так же, конечной зольности с использованием муфельной печи. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье представлены результаты проведенных исследований и экспериментов, в частности, полученных значений плотности, прочности и теплотворной способности полученного брикета при различных композициях исходного сырья. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные, в ходе проведения работы, топливные брикеты имеют высокие показатели по плотности, прочности и теплотворной способности топлива. Помимо этого, инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность. Использование полученного топлива и технологии его производства, даст возможность снизить нагрузку на полигоны с ныне не утилизируемыми отходами и использовать полученную энергию топлива на собственные нужды.

Ключевые слова: целлюлоза; топливные брикеты; биотопливо; синтетические полимеры; промышленные отходы; отходы деревообработки; экология.

Для цитирования: Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В. Исследование физико-химических характеристик альтернативного топлива, содержащего синтетические полимеры // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 180-194. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194.

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF ALTERNATIVE FUEL CONTAINING SYNTHETIC POLYMERS

Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V.

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of

Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

ryzhikov_vladimir@bk.ru

Abstract: *RELEVANCE.* This paper presents the research of physical and chemical characteristics of combined fuel briquettes consisting of solid wood waste and laminated paper production waste obtained by innovative technology. *THE GOAL* of the research is to develop a technology for processing and utilization of pulp and paper industry waste containing synthetic polymers by their joint use in the form of combined fuel briquettes of the 2nd generation, consisting of solid wood waste and laminated paper production waste, with subsequent utilization in a boiler plant with a low-temperature vortex furnace. Minimizing harm to the environmental component and maximizing energy and economic efficiency. *METHODS.* To realize the set goal, the following research methods were used in the work: study of thermoplasticity of synthetic polymers and moisture plasticity of polymeric components of wood in the process of briquette formation, determination empirically of the optimal composition of the combined briquette to obtain high calorific value of fuel, low concentration of harmful emissions, high strength and density of the finished product, determination of the lower heat of combustion of the obtained briquette with the help of calorimetric installation. *RESULTS.* The paper presents the results of the conducted research and experiments, in particular, the obtained values of density, strength and calorific value of the obtained briquette at different compositions of feedstock. *CONCLUSION.* The fuel briquettes obtained in the course of work have high indicators of density, strength and calorific value of fuel. In addition, the innovative technology of processing wood waste and waste packaging laminated paper will minimize the harm to the environmental component and increase the maximum energy and economic efficiency. The use of the obtained fuel and the technology of its production will make it possible to reduce the load on landfills with currently unutilized waste and use the obtained fuel energy for own needs.

Keywords: cellulose; fuel briquettes; biofuels; synthetic polymers; industrial waste; wood waste; ecology.

For citation: Ryzhikov V.A., Erokhina O.A., Akim E.L., Lukanin P.V. Research of physical and chemical characteristics of alternative fuel containing synthetic polymers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 180-194. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-180-194.

Введение (Introduction)

Актуальность данной работы основывается на том, что в России и мире, на данный момент, активно идет обсуждение перехода к углеродной нейтральности, что означает сокращение до нуля выбросов углекислого газа в процессе производственной деятельности или их компенсацию за счет углеродно-отрицательных проектов [1-2]. Процесс минимизации техногенного влияния на окружающую среду и переход на чистые технологии стал уже не трендом, а неизбежной реальностью [3-5]. В России в июле 2020 года, был подписан Указ Президента о национальных целях развития России на период до 2030 года. Новый документ существенно усиливает значимость экологической повестки. В соответствие с ним в ближайшие десятилетия страна будет двигаться по «зеленому» направлению. В числе главных целей станет создание устойчивой системы обращения с твердыми коммунальными отходами, снижение вдвое вредных выбросов в воздух, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Помимо этого, должны быть ликвидированы наиболее опасные объекты накопленного вреда природе и проведено экологическое оздоровление водных объектов.

В связи с проблемой перехода к низкоуглеродной циркулярной биоэкономике на сегодняшний день актуальна задача переработки отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры [6]. В настоящее время, при производстве ламинированной бумаги, не всегда есть возможность утилизировать эти отходы (обрезки, брак), и их чаще всего захоранивают на полигонах, что не только увеличивает площади свалок (полигонов), но и приводит при их гниении к дополнительным выбросам диоксида углерода без получения полезной энергии. Таким образом, эти, достаточно крупнотоннажные отходы целлюлозно-бумажной промышленности, ни в России, ни в мире пока что не нашли своего места в процессе переработки с целью получения полезной энергии или топлива [6-7].

Объем потребления бумаги и картона в мире - свыше 430 млн тонн, а объем потребления крупнотоннажных синтетических полимеров в мире - свыше 360 млн тонн. Основным сырьем для производства синтетических полимеров является нефть, мировая добыча которой составляет около 4,5 млрд тонн в год (сернистых соединений в различных видах нефтей может быть более 10-ти процентов, хотя обычно этот показатель не превышает шести процентов). Таким образом, на переработку в синтетические полимеры расходуется лишь 8% нефти, а 92% прямо или косвенно сжигается как топливо с выделением не только углекислого газа, но и сернистых соединений [8-11].

Синтетические полимеры, в обиходе называемые пластиком - один из самых распространенных материалов, используемых в современной жизни. Самым большим использованием пластика является упаковка (около 30% мирового объема производства пластика в год), так как они очень функциональны в качестве упаковочного материала. Далее следует их использование в строительстве и на транспорте, на которые приходится примерно 17% и 14% соответственно (ЮНЕП, 2018а). Производство синтетических полимеров («пластика») в 2018 году составило около 360 млн тонн, из них повторно перерабатывается из-за высоких затрат, связанных с переработкой менее 10% пластиковых отходов. Прогнозируется, что к 2045 году объем пластиковых отходов будет превышать 340 млн тонн в год [12-14]. Эта тенденция прямо противоречит высокому уровню вторичной переработки бумаги - в целом по миру использование вторичного волокна уже свыше 10 лет назад превысило уровень использования первичного волокна. Одним из путей уменьшения пластикового загрязнения мира является создание биоразлагаемой упаковки, однако анализ всего жизненного цикла такой упаковки показывает целесообразность утилизации и биоразлагаемой упаковки как одного из компонентов биотоплива [15].

4 октября 2022 ФАО ООН опубликовала «Глобальный прогноз развития лесного сектора до 2050 года», важнейшим разделом которого является раздел «Древесина для производства энергии». В нем указывается, что в 2020 году 2,3 миллиарда человек по-прежнему полагались на древесное топливо в качестве основного источника энергии для приготовления пищи и отопления. Учитывая, что в ноябре 2022 года население Земли превысило 8 миллиардов человек, четверть населения Земли зависят от древесного топлива.

В прогнозе указывается, что древесное топливо останется основным источником энергии для многих домохозяйств в странах с развивающейся экономикой до 2050 года, но многие сценарии предполагают, что темпы роста потребления замедлятся. Мировое потребление топливной древесины из лесов в 2050 году может составить от 2,1 до 2,7 миллиарда кубометров по сравнению с 1,9 миллиарда кубометров в 2020 году, увеличившись на 11-42 процента [6].

Четверть века назад в мире и в России стало производиться биотопливо второго поколения – древесные пеллеты и брикеты; за эти годы их производство в мире достигло 50 млн тонн [6-7]. Благодаря своим специфическим свойствам и эффективным системам сжигания они нашли широкое применение и в быту – для отопления индивидуальных домов, и на электростанциях, для совместного сжигания с каменным углем. Мировая добыча каменного угля составляет около 7,5 млрд тонн в год; содержание общей серы в углях колеблется в основном от 0,2 до 10%. При этом совместное сжигание каменного угля с древесными пеллетами рассматривается как один из важнейших путей уменьшения углеродного следа угольных электростанций.

В 2020 году Россия экспортировала 2,32 млн тонн древесных пеллет – 6% от мирового объема производства пеллет. (ФАО 2019 - Древесные пеллеты и прочие агломераты – 46 миллионов тонн). В первом полугодии 2021 года производство топливных пеллет увеличилось на 19%, цены на гранулы прибавили 17%. Мировым центром производства и потребления топливных древесных гранул является регион ЕЭК, на долю которого приходится 80 % мирового производства пеллет; а доля стран ЕЭК в ее мировом экспорте составляет 90 %.

В 2019 году в регионе ЕЭК было произведено 36,7 млн т топливных древесных гранул (+8,8 %), при этом показатель их потребления является самым высоким в Европейском субрегионе в то время, как Северная Америка подтвердила свою лидирующую позицию в качестве крупнейшего мирового экспортёра этой продукции [8-10].

Целью исследования является разработка технологии переработки и утилизации отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, путем их совместного использования в виде топливных комбинированных брикетов 2-го поколения, состоящих из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующей утилизацией в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой [16-17]. Снижение до минимума вреда для

экологической составляющей и повышение максимальной энергетической и экономической эффективности.

Научная значимость исследования заключается в том, что впервые была показана возможность создания топливных брикетов путем совместной переработки твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры. Была установлена возможность реализации, в процессе экструзии, термо-влагопластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров. При определенных условиях, в процессе формирования брикета, данные композиционные материалы, в частности синтетические полимеры, входящие в состав отходов ламинированной бумаги, переходят из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и, в последствии, возвращаются в исходное стеклообразное состояние через определенный промежуток времени, достигнув температуры стеклования. Этот фактор влечет за собой улучшенные прочностные свойства получаемых брикетов, а также, повышенную плотность готового продукта. Дальнейший процесс предусматривает измельчение топливного комбинированного брикета в дробленку с помощью специализированной мельничной установки и последующим сжиганием в котлоагрегате с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева. В совокупности все это дает высокий энергетический и экономический эффект, а также, значительно повышает экологическое благополучие окружающей среды, и позволяет использовать полученную тепловую энергию, в том числе, и на собственные нужды предприятия.

В связи с нынешней экологической обстановкой по всему миру, в частности по загрязнению планеты отходами производств и вредными выбросами в атмосферу такими как: оксиды азота, серы и двуокиси углерода, данное исследование и разработка имеют высокую **практическую значимость** для предприятий деревообрабатывающей и упаковочной промышленности.

Материалы и методы (Materials and methods)

Проведенные исследования включали в себя следующие этапы и методы:

- Измельчение отходов ламинированной бумаги до мелкой фракции, с помощью мельничной установки;
- Проведение ситового анализа для определения гранулометрического состава сырья;
- Определение влажности исходного сырья и его высушивание с помощью влагомера AND MF-50;
- Формирование навески с различными композициями сырья;
- Пропарка полученной смеси насыщенным паром в течение определенного временного промежутка для достижения необходимой влажности;
- Предварительный нагрев пресс-формы до 100 градусов Цельсия для использования высокой температуры в процессе прессования сырья в топливный брикет;
- Формирование топливного брикета в лабораторных условиях с помощью автоматизированного пресса (INSTRON-1121) и под воздействием высокой температуры с дальнейшим определением плотности, прочности и коэффициента сжатия брикета;
- Исследование упруго-релаксационных свойств смесей древесного компонента и отходов ламинированной бумаги, содержащих синтетические полимеры;
- Определение параметров, обуславливающих экструзируемость смеси;
- Определение конечной влажности и зольности рабочей массы топлива;
- Определение низшей теплоты сгорания (теплотворной способности) топлива с помощью лабораторной установки, состоящей из калориметрической бомбы и калориметра;
- Проведение теплотехнических расчетов, с целью определения энергетической и экологической эффективности.

Перед началом проведения исследования, необходимо подготовить исходное сырье, к которому относится древесная мука опилок лиственницы и отходы производства ламинированной бумаги, представленные на рисунке 1.



Рис. 1 Отходы производства упаковочной ламинированной бумаги Fig. 1 Packaging laminated paper production waste

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

Первым этапом при подготовки исходного сырья – является измельчение материала с помощью лабораторной дисковой мельницы, представленной на рисунке 2.



Рис. 2 Лабораторная дисковая мельница

Fig. 2 Laboratory disk mill

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

Далее, необходимо провести ситовый анализ, полученных измельченных отходов. Для корректного определения гранулометрического состава топлива, используется 20 грамм полученного материала. Данный материал пропускается через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R5000, R2000, R1000, R500.

Следующим шагом подготовки сырья является формирование навески смеси двух видов сырья в различных композициях общей массой – 2 грамма.

Для того, чтобы получить корректные эмпирические данные в процессе проведения эксперимента, необходимо было выровнять влажности двух видов сырья. Для этого использовалось специальное устройство – влагомер ANDMF – 50, представленный на рисунке 3.



Рис. 3 Влагомер ANDMF – 50

Fig. 3 Moisture meter ANDMF-50

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

Древесные отходы и отходы ламинированной бумаги были высушены до 3,3 % влажности.

Дальнейшим этапом эксперимента является пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергается воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка.

Следующий этап экспериментальной части заключался в формировании топливного брикета с различными композициями сырья, из заранее подготовленной смеси, на автоматизированном прессе под воздействием высокой температуры с заранее подготовленной и нагретой до 100 градусов Цельсия цилиндрической пресс-формой.

В качестве автоматизированного пресса был использован прибор Instron1121, представленный на рисунке 4.



Рис. 4 Лабораторная установка для формирования брикета Instron1121 Fig. 4 Laboratory installation for briquette formation Instron1121

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

Данная установка позволяет прессовать брикеты высокой плотности и с высокой силой сжатия. Помимо этого, можно определить упруго-релаксационные свойства смеси древесных полимерных компонентов и синтетических полимеров, а также, параметры, обуславливающие экструдированность смеси. Возможность изучить влагопластичность древесного компонента и термопластичность синтетических полимеров.

Ход проведения опытов состоял из следующих этапов:

1. Полученная смесь в различных композициях сырья (0/100%, 30/70%, 50/50%, 70/30%, 100/0%) засыпается в подготовленную пресс-форму;
2. Формирование брикета производится на установке Instron1121 под давлением 26 МПа до установления стабилизации прямой на графике прибора;
3. В процессе прессования на установке Instron1121 производился замер температуры пресс-формы с помощью термопары;
4. Извлечение пресс-формы с установки Instron1121 и удаление готового брикета;
5. Замер конструктивных параметров брикета (диаметр и высота) для дальнейшего определения плотности полученного брикета до его полной релаксации и после (с промежутком в 3 дня);
6. Анализ влияния температуры и влажности на упруго-релаксационные свойства брикета, которые связаны с переходом из одного релаксационного состояние в другое.

Зольность определяется по результатам технического анализа топлива путём прокаливания навески топлива ($m_T = 2$ грамм) в муфельной печи при температуре 820 °С в течение 25 мин.

Определение теплотворной способности топлива производится при помощи специальной калориметрической установки, состоящей из калориметра и калориметрической бомбы, которые представлены на рисунке 5.



Рис. 5 Лабораторная калориметрическая установка Fig. 5 Laboratory calorimetric setup

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

В заключительный этап проведения исследования входили теплотехнические расчеты, которые включали в себя: материальный процесс горения топлива, тепловой баланс выбранной энергетической установки, тепловой расчет, аэродинамический расчет, расчет вредных выбросов в атмосферу

Для дальнейшего эффективного сжигания полученного комбинированного брикета необходимо выбрать оптимальную энергоустановку, позволяющую использовать данный вид топлива с максимальной экологической, энергетической и экономической эффективностью. В данном случае был выбран котлоагрегат БКЗ 210-140Ф, установленный на Кировской ТЭЦ-4 в Санкт-Петербурге в Кировском районе с низкотемпературной вихревой топкой Померанцева [16]. Котел БКЗ-210-140Ф имеет следующие расчетные параметры: паропроизводительность $D = 210$ т/ч; давление перегретого пара $P_{\text{пн}} = 13,8$ МПа; температура перегретого пара $t_{\text{пн}} = 570$ °С. Данный котлоагрегат представлен на рисунке 6.

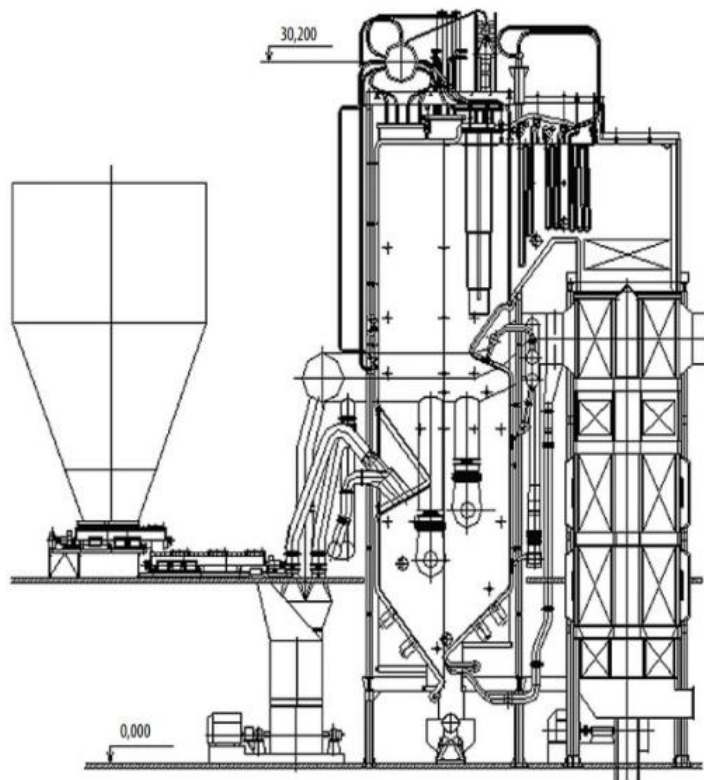


Рис. 6 Котел БКЗ-210-140Ф с низкотемпературной вихревой топкой
*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Способ низкотемпературного вихревого сжигания и топочное устройство было разработано советским ученым-теплоэнергетиком В.В.Померанцевым [16].

В основу данной технологии заложен принцип организации низкотемпературного сжигания груборазмолотого твердого топлива в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке [16-17].

В низкотемпературной вихревой топке организованы две зоны горения: зона активного горения и зона догорания. В отличие от традиционной технологии пылеугольного сжигания [17], где основная часть топлива (до 95 %) сгорает в первой зоне, которая занимает небольшой объем топочной камеры, в вихревой топке вовлечен значительно больший объем топочного пространства. Это приводит к снижению максимальной температуры в вихревой топке (примерно на $100\div 300$ °С), и за счет активной аэродинамики выравнивается уровень температуры в объеме вихревой зоны (рис.7). Как следствие и название – низкотемпературный вихрь [17].

При этом горячий поток поднимается из холодной воронки вдоль фронтального экрана и зажигает факел непосредственно у корня. За счет такой аэродинамики повышается надежность воспламенения и устойчивость топочного процесса, расширяется диапазон регулирования. Область стока вихря смещена к заднему экрану, в ней при развороте потока происходит эффективная сепарация, способствующая многократной циркуляции топлива внутри топки.

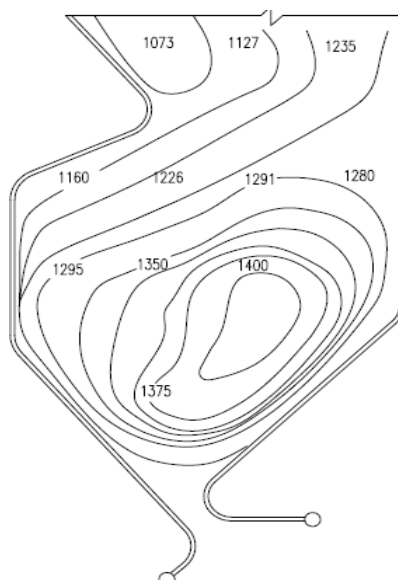


Рис. 7 Температурные поля в топке котла при низкотемпературном сжигании *Fig. 7 Temperature fields in the boiler furnace at low-temperature combustion*

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

Пониженный уровень температуры, ввод окислителя ступенчато, многократная циркуляция частиц топлива и угрубление состава золы в общей сложности обеспечивают улучшенные показатели низкотемпературных вихревых топок по вредным выбросам: оксидам азота и серы, а также улучшают эффективность работы золоулавливающего оборудования котлоагрегата [17].

Важным достоинством НТВ сжигания является невысокая чувствительность к колебаниям характеристик топлива, которая унифицирует топку по топливу и делает возможным сжигание в одном агрегате различных видов твердого топлива.

НТВ технология сжигания прошла апробацию на широкой гамме твердых топлив, таких как бурые и каменные угли, торф, горючие сланцы, отходы деревообработки и микробиологического производства.

Достоинства низкотемпературных вихревых топок позволяют:

- упростить систему подготовки топлива, увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;
- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;
- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15...20 %;
- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30...50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20...40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO -содержащих добавок.

Результаты (Results)

Результаты первого этапа подготовки сырья – измельчение исходного сырья, показывает ситовый анализ с помощью сит с ячейками различных размеров. Материал пропускается через вертикально установленные друг под другом сита с размерами ячеек: R5000, R2000, R1000, R500. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты проведения ситового анализа отходов ламинированной бумаги
Results of sieve analysis of laminated paper waste

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R5000	6,5	1,3
R2000	7,5	1,5
R1000	39	7,8
R500	41	8,2
Остаток на поддоне	6	1,2
Сумма	100	20

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

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что размер большей части полученных частиц ламинированной бумаги, находится в пределах от 1000 до 500 мкм. Размер фракций древесной муки находится в пределах 250 – 500 мкм, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Результаты проведения ситового анализа древесной муки лиственницы
Results of sieve analysis of larch wood flour

Размер ячейки	Остаток на сите, %	Масса остатка на сите, г
R1000	0	0
R500	31,5	5,2
R250	41	8,2
R100	26	6,3
Остаток на поддоне	1,5	0,29
Сумма	100	20

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

Различный размер фракций древесной муки и отходов ламинированной бумаги – не является негативным фактором для проведения эксперимента, наоборот, исходя из литературных данных, различные размеры композиционных материалов, в том числе и различные длины волокон, способствуют улучшению прочностных свойств получаемых композитов.

Дальнейшим этапом эксперимента является пропарка сырья в различных композициях. Смесь подвергается воздействию насыщенного пара в течение определенного временного промежутка. Экспериментальным путем была установлена зависимость повышения влажности смеси от времени пропарки, данные приведены в таблице 3.

Таблица 3
Table 3

Зависимость изменения влажности от времени пропарки сырья
Dependence of moisture content change on raw material steaming time

№	Время пропаривания, с	Влажность, %
1	10	5,1
2	15	7,3
3	20	10,8
4	30	12,6

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

В качестве оптимальной влажности для формирования брикета – была выбрана влажность со значением 7,3 %. При данной влажности полученный образец имеет гладкую форму, высокую прочность и плотность.

После проведения эксперимента по определению плотности, прочности и коэффициента сжатия комбинированных брикетов с различными композициями сырья при заданных параметрах, были получены следующие результаты, приведенные в таблице 4.

Исходные данные:

W = 7,3 % - влажность сырья (древесные отходы, отходы ламинированной бумаги);
 $t_{cp} = 80 \pm 2^{\circ}C$ – средняя температура при формировании брикета;
 P = 26 МПа – давление в процессе прессования;
 v = 100 мм/мин – скорость ленты прибора Instron1121;
 m = 2 грамма – масса исходного сырья для формирования брикета;
 Прочность на сжатие измерялась с давлением на поперечное направление брикета.

Таблица 4
 Table 4

Результаты эксперимента по определению плотности и прочности брикетов
 Experimental results on determination of density and strength of briquettes

Композиция сырья, %	Среднее значение влажности полученного брикета после релаксации W, %	Высота брикета после релаксации, мм	Диаметр брикета после релаксации, мм	Среднее значение плотности брикета после релаксации и ρ_{cp} , кг/м ³	Коэффициент сжатия $k_{сж}$	Прочность на сжатие $\sigma_{сж}$, МПа
0(лам. бум.) /100(древесина)	5,5	12,8	14,5	948	3,6	2
30(лам. бум.) /70(древесина)	4,4	11,8	14,3	1010	-	4
50(лам. бум.) /50(древесина)	3,7	11,5	14,2	1036	2,6	4,5
70(лам. бум.) /30(древесина)	3	11,4	14,3	1048	-	2,5
100(лам. бум.) /0(древесина)	2,2	10,4	14,1	1063	1,9	2

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

В результате проведения экспериментов были выявлены некоторые особенности поведения материалов при их различных композициях и под воздействием таких параметров как влажность и температура, прежде всего – изменение релаксационных состояний [18-19]. Была установлена возможность реализации, в процессе экструзии, термо-пластичности полимерных компонентов древесины и термопластичности синтетических полимеров. При определенных условиях, в процессе формирования брикета, данные композиционные материалы, в частности синтетические полимеры, входящие в состав отходов ламинированной бумаги, переходят из стеклообразного релаксационного состояния в высокоэластическое и, в последствии, возвращаются в исходное стеклообразное состояние через определенный промежуток времени, достигнув температуры стеклования. Этот фактор влечет за собой повышенную плотность готового продукта. В то же время, достаточный процент влажности, за счет гидрофильности древесных компонентов, позволяет брикету сохранять свою форму. Именно по этой причине, решение об использовании отходов ламинированной бумаги, в качестве дополнительного к древесине композиционного материала, является оправданным.

Рассматривая различные варианты значений влажности и температур, в процессе проведения экспериментов, была выявлена оптимальная композиция смеси – 50/50%, при которой полученный брикет способен держать форму и иметь статичные габаритные размеры, не уступая в плотности и, тем более, прочности остальным опытными образцам.

От соотношения отходов производства ламинированной бумаги и древесной муки зависит также и теплотворная способность топлива, что является наиболее важным, с энергетической точки зрения, показателем топлива. Также, не маловажна и экологическая составляющая, т.к. в отходах ламинированной бумаги присутствуют синтетические полимеры, которые влияют на состояние окружающей среды в процессе дальнейшего сжигания. Помимо этого, при термической обработке отходов, содержащих синтетические полимеры – возможны усиленные загрязнения поверхностей нагрева используемого энергетического оборудования из-за плавления полиэтилена. По этой причине

использования слишком большой концентрации отходов данного вида – может крайне негативно отразиться на функционировании оборудования в целом.

В результате была получена и определена оптимальная, по всем параметрам, композиция топливного брикета - 50/50%. В дальнейшем необходимо определить зольность, а также, низшую теплоту сгорания в калориметрической установке.

Состав полученного топливного брикета в композиции 50/50%, соотношений исходного сырья, представлен в таблице 5.

Таблица 5

Table 5

Элементный состав полученного топливного брикета с композицией сырья 50/50%
Elemental composition of the obtained fuel briquette with raw material composition 50/50%

№	Углерод С, %	Водород Н, %	Азот N, %	Кислород О, %	Зольность А, %	Влажность W, %
Комбинированный брикет 50/50 %	50	6,6	0,5	39	0,2	3,7

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

Теплотворная способность топливного брикета в соотношении отходов ламинированной бумаги и древесной муки опилок лиственницы в соотношении 50/50%, по результатам проведенных опытов, представлена в таблице 6.

Таблица 6

Table 6

Теплотворная способность комбинированного топливного брикета 50/50%
Calorific value of combined fuel briquette 50/50%

№	Масса проволки. кг * 10 ⁶	Масса топлива, Кг * 10 ⁵	Темп.нач., °С	Темп.кон., °С	Q ^a _б , КДж/кг	Q ^r _s , КДж/кг	Q ^r _i , КДж/кг
1	53	91	2,5	3,9	25189	21564	19499
2	45	126	3,8	5,1	25796	21832	20157
3	50	116	0,4	1,9	24657	20114	17970
4	40	87	1,25	2,7	23115	21488	19803
5	46	61	2,1	3,2	24485	20322	18001
6	45	95	0,3	1,5	23208	20962	18888
7	47	52	0,4	1,45	23362	21884	19109
8	44	88	1,1	2,3	24777	21367	18857
9	53	76	2,0	2,9	23576	20602	18233
10	43	98	2,65	4,1	24747	21304	19099
11	41	78	3,25	4,15	23104	21897	19439

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

Заключение (Conclusions)

1. В рамках данного исследования были проведены теоретические и экспериментальные исследования, показывающие влияние изменения релаксационных состояний композиционных материалов, при определенных условиях, на физико-химические параметры полученного комбинированного топливного брикета. Также, исследовано взаимодействие термопластичности синтетических полимеров и влагопластичности древесных полимерных компонентов.

2. Данное исследование нацелено на переработку отходов целлюлозно-бумажной промышленности, содержащих синтетические полимеры, в топливный комбинированный брикет, состоящий из твердых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги, с последующим сжиганием в котельной установке с низкотемпературной вихревой топкой. Инновационная технология переработки древесных отходов и отходов упаковочной ламинированной бумаги позволит снизить до минимума вред для экологической составляющей и повысить максимальную энергетическую и экономическую эффективность.

3. Использование полученного нового топлива и технологии его производства, и последующего сжигания в НТВ-топке, даст возможность снизить нагрузку на полигоны с ныне не утилизируемыми отходами, использовать полученную энергию топлива на собственные нужды, упрощает очистку дымовых газов благодаря использованию технологии низкотемпературного вихревого сжигания (низкие показатели концентрации

окислов азота из-за низких температур в зоне активного горения и ступенчатого сжигания, и отсутствие серы).

4. Полученный комбинированный топливный брикет обладает высоким, для своей компоновки, показателем теплотворной способности топлива, равным 19 МДж/кг, что, несомненно, позволяет использовать его в промышленных и бытовых целях с высокой энергетической эффективностью. Также, данное топливо является абсолютно безопасным с точки зрения выбросов дымовых газов в атмосферу при его сжигании, т.к., входящие в его состав синтетические полимеры, не содержат хлора, что означает отсутствие возможности образования хлористых диоксинов [20], которые являются главной причиной невозможности утилизации пластиковых отходов. Полученный комбинированный брикет обладает относительно высокой плотностью – 1036 кг/м³ и является прочным композитом – 4,5 МПа на поперечное сжатие.

5. Проведенное исследование, полученные экспериментальные данные и образцы, целесообразно использовать в качестве основополагающих для внедрения данной технологии в производство. Изложенный в данной статье материал является крайне актуальным на сегодняшний день для Российской Федерации и мира в целом. Перспективы развития описанной инновационной технологии переработки и утилизации отходов крайне велики, поэтому целесообразно развивать её и дальше, не ограничиваясь лишь отходами производства ламинированной бумаги. Это послужит большим шагом к реализации поставленных правительством целей и задач в области композиционных материалов, экологии и энергетики.

Литература

1. Умнов В.А., Коробова О.С., Скрыбина А.А. Углеродный след как индикатор воздействия экономики на климатическую систему // Вестник РГГУ. Серия «Экономика. Управление. Право». 2020. № 2. С. 85–93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.
2. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.
3. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).
4. Перспективы технологии совместного сжигания биомассы и угля на объектах энергетики / Е. С. Дремичева, Э. Р. Зверева, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 119-130. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. – EDN DRPGTC.
5. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm», *Global Environmental Change*, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.
6. Совместная переработка отходов картонно-бумажной макулатуры, содержащих целлюлозу и синтетические полимеры, и твердых древесных отходов, входящих в состав топливного брикета / В. А. Рыжиков, Э. Л. Аким, О. А. Ерохина, А. А. Пекарец // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: Материалы VII Международной научно-технической конференции имени профессора В.И. Комарова, Архангельск, 14–16 сентября 2023 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – RUS: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 65-69.
7. Упруго-релаксационные свойства древесины лиственницы и их роль при получении древесных и древесно-угольных брикетов / А. А. Пекарец, О. А. Ерохина, В. В. Новожилов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2020. – № 1(373). – С. 200-208. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. – EDN WVFHPC.
8. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. *The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects* // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.
9. *Forest Products Annual Market Review 2021-2022*, UNECE, 70 p.; *Forest Products Annual Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber* – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.
10. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2018–2019 годы: Женева: ЕЭК ООН, 2020- 173с. ISBN 978-92-1-004516.
11. *Forest Products Annual Market Review 2023-2024*, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.
12. Луканин П.В., Федорова О.В., Пекарец А.А., Аким Э.Л. Особенности сжигания биотоплива и их взаимосвязь с упруго-релаксационными свойствами исходного сырья и его

химическим составом // Матер. VI Междун. научно-технич. конфер. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов», 09-11 сентября 2021 г. Архангельск, 2021. С. 383-388.

13. Технология полимерных материалов / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов [и др.]. СПб.: Профессия, 2008. 544 с.

14. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.

15. Клинков А.С. Разработка технологии и оборудования по утилизации отходов упаковочных материалов/ А.С. Клинков, М.В. Сколово, И.В. Шашков // IX науч. Конф. ТГТУ: тех. докл. -Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Тех. Ун-та, 2004. -С80.

16. Померанцев, В. В. Топки скоростного горения для древесного топлива [Текст] / канд. техн. наук В. В. Померанцев; М-во тяжелого машиностроения СССР. Главкотлотурбопром. Центр. науч.-исслед. ин-т им. И. И. Ползунова. - Москва; Ленинград: [Ленингр. отд-ние] Машгиза, 1948 (Л.: тип. "Профинтерн"). - 74 с.

17. А.А. Тринченко, А.П. Парамонов. Внедрение низкотемпературного вихревого сжигания для энергетического использования каменных углей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 4(231). 2015.

18. Комплексный метод утилизации золошлаковых отходов тепловых электростанций / Э. Р. Зверева, В. П. Плотникова, Ф. И. Бурганова, Л. О. Зверев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11, № 2(42). – С. 15-26. – EDN ZTECWP.

19. Исследование реологических свойств композиционных суспензионных топлив / Э. Р. Зверева, Г. Р. Мингалеева, Б. Р. Валиуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 143-153. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153. – EDN FPBVXO.

20. Румак В.С., Умнова Н.В. Диоксины и безопасность биосистем: результаты натуральных исследований // Жизнь Земли. 2018. Том 40. № 3. С. 308–320.

Авторы публикации

Рыжиков Владимир Александрович – старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГУПТД ВШТЭ.

Ерохина Ольга Александровна – старший преподаватель кафедры ТЦКМ, зав. лаб. СПбГУПТД ВШТЭ.

Аким Эдуард Львович – д.т.н., профессор, заведующий кафедры ТЦКМ СПбГУПТД ВШТЭ.

Луканин Павел Владимирович – д.т.н., профессор, первый проректор СПбГУПТД.

References

1. Umnov V.A., Korobova O.S., Skryabina A.A. Carbon footprint as an indicator of the impact of the economy on the climate system // Bulletin of Russian State University of Science and Technology. Series “Economics. Management. Law”. 2020. № 2. С. 85-93. DOI: 10.28995/2073-6304-2020-2-85-93.

2. Bengtsson A, Bengtsson J, Olsson C, Sedin M, Jedvert K, Theliander H, Sjöholm E (2018) Improved yield of carbon fibres from cellulose and kraft lignin. *Holzforschung* 72:1007–1016.

3. E. L. Akim, Yu. G. Mandre, and A. A. Pekarets, “Changes in the relaxation state of polymeric components of wood during its high-temperature biorefining,” *Khim. Volokna*, No. 3, 14–18 (2019).

4. Prospects of technology of biomass and coal co-combustion at power engineering facilities / E. S. Dremicheva, E. R. Zvereva, F. I. Borganova, L. O. Zverev // *Izvestiya vysokikh uchebnykh obrazovaniya. Problems of power engineering*. - 2021. - Т. 23, № 1. - С. 119-130. - DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-1-119-130. - EDN DRPGTC.

5. Detlef P. van Vuuren, Elke Stehfest, David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis, Andrzej Tabeau, «Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm»,

Global Environmental Change, Volume 42, 2017, Pages 237-250, ISSN 0959-3780.

6. Joint processing of waste cardboard and paper waste containing cellulose and synthetic polymers and solid wood waste, which is part of the fuel briquette / V. A. Ryzhikov, E. L. Akim, O. A. Erokhina, A. A. Pekarets // Problems of mechanics of cellulose and paper materials: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference named after Professor V. I. Komarov. I. Komarov, Arkhangelsk, September 14-16, 2023 / Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov". - RUS: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2023. - C. 65-69.

7. Elastic-relaxation properties of larch wood and their role in obtaining wood and charcoal briquettes / A. A. Pekarets, O. A. Erokhina, V. V. Novozhilov [et al.] // Izvestia vysokikh uchebnykh uchebnykh uchebnykh vuzdaniya. Forestry journal. - 2020. - № 1(373). - C. 200-208. - DOI 10.37482/0536-1036-2020-1-200-208. - EDN WVFHPC.

8. Hansen E., Panwar R., Vlosky R. The Global Forest Sector: Changes, Practices and Prospects // NY: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2017. P. 462.

9. Forest Products Annual Market Review 2021-2022, UNECE, 70 p.; Forest Products Annual Market Review 2019-2020 - Forestry and Timber – UNECE, 82p. ISBN 978-92-1-117257-7.

10. Annual Forest Products Market Review, 2018-2019: Geneva: UNECE, 2020- 173 pp. ISBN 978-92-1-004516.

11. Forest Products Annual Market Review 2023-2024, UNECE, 53p. ISBN 978-92-1-003184-4.

12. Lukanin, P.V.; Fedorova, O.V.; Pekarets, A.A.; Akim, E.L. Features of biofuel combustion and their relationship with the elastic-relaxation properties of feedstock and its chemical composition // Mater. VI International Scientific and Technical Conference. "Problems of mechanics of cellulose and paper materials", September 09-11, 2021, Arkhangelsk, 2021. C. 383-388.

13. Technology of polymeric materials / A.F. Nikolaev, V.K. Kryzhanovsky, V.V. Burlov [et al. Burlov [et al.] SPb.: Profession, 2008. 544 c.

14. Mikhailin Yu.A. Thermo-stable polymers and polymer materials. SPb.: Profession, 2006. 624 c.

15. Klinkov, A.S. Development of technology and equipment for utilization of packaging materials waste / A.S. Klinkov, M.V. Skolovo, I.V. Shashkov // IX Nau. Conf. TSTU: Tech. docl. - Tambov: Tambov: Izd. University, 2004. -C80.

16. Pomerantsev, V. V. Furnaces of high-speed combustion for wood fuel [Text] / Cand. Sci. (Techn.) V. V. Pomerantsev; Ministry of Heavy Engineering of the USSR. Glavkotlototurboprom. Center. scientific-research institute named after I. I. Polzunov. I. I. Polzunov. - Moscow; Leningrad: [Leningrad Branch] Mashgiza, 1948 (L.: tip. "Profintern"). - 74 c.

17. A.A. Trinchenko, A.P. Paramonov. Implementation of low-temperature vortex combustion for power utilization of hard coal // Scientific and Technical Bulletins of St. Petersburg State Polytechnic University. 4(231). 2015.

18. Integrated method of utilization of ash and slag waste from thermal power plants / E. R. Zvereva, V. P. Plotnikova, F. I. Burganova, L. O. Zverev // Bulletin of Kazan State Power Engineering University. - 2019. - T. 11, № 2(42). - C. 15-26. - EDN ZTECWP.

19. Investigation of rheological properties of composite suspension fuels / E. R. Zvereva, G. R. Mingaleeva, B. R. Valiullin [et al.] // Izvestia vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. Problems of power engineering. - 2023. - T. 25, № 1. - C. 143-153. - DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-143-153. - EDN FPBVXO.

20. Rumak V.S., Umnova N.V. Dioxins and the safety of biosystems: results of field studies // Life of the Earth. 2018. Vol. 40. No. 3. C. 308-320.

Authors of the publication

Vladimir A. Ryzhikov - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

Olga Erokhina A. - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

© Рыжиков В.А., Ерохина О.А., Аким Э.Л., Луканин П.В.

Akim Eduard L. - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

Lukanin Pavel V. - Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
Higher School of Technology and Energy. St. Petersburg, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Получено **28.10.2024 г.**

Отредактировано **12.11.2024 г.**

Принято **15.11.2024 г.**



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ: ПАКЕТ SMATH И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Очков¹ В.Ф., Ахметова² И.Г.

¹Научно-исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

OchkovVF@mpei.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ настоящей работы заключается в создании сертифицированного программного комплекса (СПК), который ориентирован на решение задач, представляющих интерес для теплоэнергетики. Одна из задач, выбранных авторами, посвящена повышению эффективности известного газотурбинного цикла за счет модернизации теплосилового схемы, которая относится к газотурбинной установке (ГТУ). Отметим, что для ТЭЦ и установок ГТУ проблема повышения/улучшения энергетических критериев (Z_1 -электрический КПД, Z_2 -термический КПД и др.) является приоритетной. В статье детально рассмотрен ряд объектов, среди них имеются: а) отечественный математический пакет (МП) SMath, б) пакет функций (ПФ) WaterSteamPro, в) сайты, г) компьютерная среда (КС) Linux. При создании СПК авторы решали вопросы, которые являются актуальными, во-первых, для генерирующих производств, включая ТЭЦ и парогазовые установки (ПГУ); во-вторых, авторы рассмотрели проблемы, которые играют важную роль при модернизации установки ГТУ, которая содержит котел-утилизатор. ЦЕЛИ. Авторами рассматривается несколько целей. Первая связана с разработкой метода I, который должен обеспечивать оптимизацию критериев, характеризующих исследуемую энергоустановку ПГУ-1. Указанная методика опирается, в частности, на Информационные технологии (ИТ); в ней используется ряд открытых интерактивных (OS) алгоритмов. Эти алгоритмы позволяют исследователю вести теплоэнергетические (ТЭ) расчеты, нацеленные на определение энергетических критериев, $Z = (Z_1, Z_2, \dots)$. На основе методики I решается ЗАДАЧА (A), которая связана с поиском оптимальных параметров, $Y_{opt} = (Y_1, Y_2, \dots)$, характеризующих термодинамический цикл ПГУ-1, здесь Y_1 - температура на входе в компрессор, Y_2 - давление на входе в газовую турбину. Вторая цель связана с созданием «Многофакторной технологии формирования OS алгоритмов». Эта технология дает возможность исследователю, который выполняет ТЭ расчеты, привлечь такие инструменты, которые соответствуют мировому уровню ИТ (МП SMath, МП Linux, инструмент «Mathcad Calculation Server» и др.). В соответствии со второй целью решается ряд ЗАДАЧ; среди них задача, нацеленная на комплекс СПК, а также задача по созданию OS алгоритма для ТЭ расчетов, которые ориентированы на ПГУ и МП Linux. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описывается, во-первых, комплекс СПК. Во-вторых, выполнены ТЭ расчеты, в соответствии с поставленными задачами. Так, в задаче (A) анализируется ПГУ-1, содержащая ряд блоков (паровая турбина; часть, нацеленная на внутреннюю теплофикацию ПТУ, котел - утилизатор и др.). В итоге получены численные данные и графические иллюстрации, в том числе сделана оценка критерия $Z_2 = 48.68\%$ для блока ПТУ при условиях Y_{opt} и выбрана теплосиловая схема для ПГУ-1. ВЫВОДЫ. В настоящее время по известным причинам отечественные исследователи переходят от зарубежных программных средств к отечественным разработкам. Анализ результатов, полученных в указанных ТЭ расчетах, позволяет заключить: МП SMath и комплекс СПК дали возможность исследователям успешно отказаться от программного обеспечения, которое опирается на МП Mathcad, МП Maple, МП Mathematica и МП MATLAB.

Ключевые слова: паротурбинные установки; парогазовые установки; теплофикация; парогенератор; математический пакет SMath.

Для цитирования: Очков В. Ф., Ахметова И.Г. Современные информационные технологии

в теплоэнергетических расчетах: пакет Smath и оптимизация термодинамических циклов энергоустановок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 195-213. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-195-213.

MODERN INFORMATION TECHNOLOGIES IN THERMAL POWER CALCULATIONS: SMATH PACKAGE AND OPTIMIZATION OF THERMODYNAMIC CYCLES OF POWER PLANTS

Ochkov V.F., Akhmetova I.G.

¹Scientific Research University "MPEI", Moscow, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

OchkovVF@mpei.ru

Abstract: *RELEVANCE.* The relevance of this work lies in the creation of a certified software package (SEC), which is focused on solving problems of interest to the thermal power industry. One of the tasks chosen by the authors is devoted to improving the efficiency of the well-known gas turbine cycle by modernizing the thermal power circuit, which refers to a gas turbine plant (GTP). It should be noted that for CHP and GTP, the problem of increasing/improving energy criteria (Z1 - electrical efficiency, Z2-thermal efficiency, etc.) is a priority. The article considers in detail a number of objects, among them there are: a) the domestic mathematical package (MP) SMath, b) the package of functions (PF) WaterSteamPro, c) websites, d) the computer environment (CS) Linux. When creating the SEC, the authors solved issues those are relevant, firstly, for generating plants, including thermal power plants and combined cycle gas plants (CCGP); secondly, the authors considered the problems that play an important role in the modernization of the GTP, which includes a recovery boiler. *Purposes.* The authors consider several goals. The first is related to the development of method I, which should ensure the optimization of criteria characterizing the PGU-1 power plant under study. This technique is based, in particular, on Information Technology (IT); it uses a number of open interactive (OS) algorithms. These algorithms allow the researcher to conduct thermal energy (TE) calculations aimed at determining energy criteria, $Z = (Z1, Z2, \dots)$. Based on method I, the PROBLEM (A) is solved, which is related to the search for optimal parameters, $Y_{opt} = (Y1, Y2, \dots)$, characterizing the thermodynamic cycle of PGU-1, here Y1 is the temperature at the inlet to the compressor, Y2 is the pressure at the inlet to the gas turbine. The second goal is related to the creation of a "Multifactor technology for the formation of OS algorithms." This technology makes it possible for a researcher who performs TE calculations to attract such tools that correspond to the world level of IT (SMath MP, Linux MP, Mathcad Calculation Server tool, etc.). In accordance with the second goal, a number of TASKS are being solved; among them is a task aimed at the SEC complex, as well as the task of creating an OS algorithm for TE calculations that are focused on PSU and MP Linux. *Results.* The article describes, firstly, the SEC complex. Secondly, the TE calculations were performed in accordance with the tasks set. So, in task (A), the PGU-1 is analyzed, which contains a number of blocks (a steam turbine; a part aimed at the internal heating of a vocational school, a heat recovery boiler, etc.). As a result, numerical data and graphical illustrations were obtained, including an assessment of the criterion $Z2 = 48.68\%$ for the vocational training unit under Y_{opt} conditions and a thermal power scheme for PGU-1 was selected. *Conclusions.* Currently, for well-known reasons, domestic researchers are switching from foreign software to domestic developments. An analysis of the results obtained in these TE calculations allows us to conclude: SMath MP and the SEC complex have enabled researchers to successfully abandon software that relies on Mathcad MP, Maple MP, Mathematica MP and MATLAB MP.

Keywords: steam turbine plants; combined cycle gas plants; heating; steam generator; mathematical package SMath.

For citation: Ochkov V. F., Akhmetova I.G. Modern information technologies in thermal power calculations: Smath package and optimization of thermodynamic cycles of power plants. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 195-213. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-195-213.

Введение (Introduction)

Рекомендации руководящих документов («Энергетическая стратегия России на период до 2035 года», закон ФЗ - 261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» и др.), а также наш анализ ряда работ показывают: повышение энергоэффективности генерирующих производств является приоритетным направлением развития энергетики. В соответствии с этими документами проектируемые установки (ПТУ, ПГУ и др.) должны иметь, во-первых, высокие параметры энергоэффективности. Во-вторых, эти установки должны отвечать современным критериям надежности и условиям экологичности. В-третьих, показано, что необходимо осуществлять мероприятия по модернизации теплосиловых схем, которые действуют как базовые теплосиловые схемы (БТС); так, рекомендуется внедрять технологии, которые отвечают «отвечают договору о присоединении мощности». В соответствии с этим документом сделаны практические шаги и прогнозы:

а) в рамках перехода от ПТУ к установкам ПГУ, в которых используется газотурбинная технология, обеспечение (ПО), которое предназначено для выполнения ряда теплоэнергетических (ТЭ) расчетов; некоторые из этих расчетов нацелены на вычисление критериев $Z(R, Y)$, теплоэнергетику РФ введено около 30 ГВт новых мощностей к 2023 г.,

б) дополнительный ввод мощностей составит около 13 ГВт к 2025 г. и 44 ГВт к 2035 г. (указанные цифры относятся к блоками ГТУ, которые будут установлены на ТЭС).

Упомянутые мероприятия по модернизации БТС или когенерация дают существенный вклад в суммарную мощность теплоэлектростанций РФ. В литературе описан вариант действующей установки ПГУ [11], в которой применена газотурбинная технология и для которой получен электрический КПД $Z_1 \approx 60.0\%$, при этом мощность, $N_{ГТ}$, которая относится к блоку газовой турбины (ГТУ) (рис. 1), и мощность, $N_{ПТ}$, которая относится к блоку паровой турбины (ПТУ), достигли в сумме 220 МВт.

В качестве объектов нашего исследования выбираем теплосиловые схемы, которые можно использовать, во – первых, при модернизации действующих энергоустановок (ЭУ), и, во – вторых, при проектировании новых установок ЭУ (ПТУ, ГТУ и др.) с целью повышения энергетических критериев, $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots)$, здесь Z_2 - внутренний КПД ЭУ, Z_3 – термический КПД ЭУ), а также для улучшения других критериев, включая экологические и экономические. Например, на рисунке 1 дается такой объект в виде блочной теплосиловой схемы для установки ПГУ-1.

В статье также рассматриваем другие объекты, в том числе:

1) отечественный математический пакет (МП) SMath [1] и пакет функций (ПФ) WaterSteamPro [2],

2) сайты и базы данных, которые размещены в Интернете и содержат актуальную информацию (данные о теплофизических свойствах воды и других рабочих телах, характеристики термодинамических циклов и др.) применительно к ГТУ и ПГУ [6], [10],

3) программное обеспечение (ПО), которое предназначено для выполнения ряда теплоэнергетических (ТЭ) расчетов; некоторые из этих расчетов нацелены на вычисление критериев $Z(R, Y)$, здесь $R = (v, h, s, \dots)$ - свойства, которые характеризуют рабочее тело в заданных точках исследуемого цикла ПГУ-1; $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$ - граничные условия, которые представляют собой типичные параметры, используемые в математических формулах (МФ). Указанные формулы МФ, описывают критерии Z . Например, Y_3 обозначает температуру T_2 (точка 4г, рис. 1), на входе в ГТ, а Y_2 представлет давление воздуха на входе в компрессор К (рис. 1),

4) открытый интерактивный (OS) алгоритм [10] (рис. 2), который выступает как методическая основа для Smath - программы (рис. 2, позиция 7), используемой для вычисления критериев $Z(R, Y)$.

В данной работе формулируем несколько целей; первая связана с разработкой метода I, который рекомендуется для выбора теплосиловой схемы ПГУ-1. Этот метод состоит из нескольких этапов; среди них отметим: 1) разработку OS алгоритма, ориентированного на вычисление критериев $Z(R, Y)$, 2) оптимизацию термодинамического цикла ПГУ-1.

Упомянутый OS алгоритм (рис. 2) должен иметь ряд характеристик, в том числе:

1) он обеспечивает исследователю/пользователю выполнение ТЭ расчета применительно к ПГУ-1, включая вычисление критериев $Z(R, Y)$ при заданных условиях Y ,

2) он содержит некоторую часть, которая связана с МП SMath; так, к этой части относится SMath – код, который в рамках задачи (A) именуется как программа Code–CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7), здесь в имени кода:

а) CCGP – имя, указывающее на установку ПГУ-1 (combined cycle gas plant),

б) Z – критерии, которые относятся к циклу ПГУ-1 и вычисляются с помощью указанного кода;

в) Y - граничные условия, характеризующие указанный цикл.

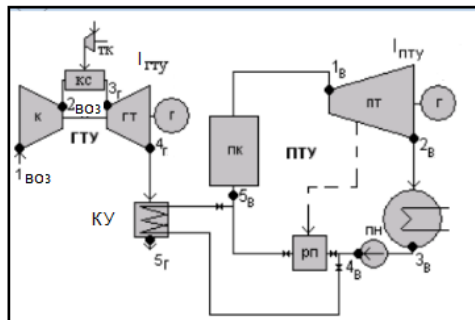


Рис. 1. Теплосиловая схема установки ПГУ-1: Fig. 1. Thermal power scheme of the CCGT-1 installation: GTU - gas turbine unit, PTU - steam turbine unit, КУ – котел - утилизатор, ПК – энергетический котел, К - воздушный компрессор, ТК - топливный компрессор, КС - камера сгорания, ГТ - газовая турбина, Г - электрические генераторы

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

T_2 (точка $3_г$) T_3 (точка $4_г$, рис. 1) T_1 (точка $1_{воз}$, рис. 1) и T_5 (точка $5_г$, рис. 1) температуры T_6 (точка $5_в$, рис. 1), температура T_{10} , температура T_9 (точка $4_в$, рис. 1)

В статье ставится ряд задач; среди них рассматривается задача (А), которая связана с вычислением критериев $Z(R,Y)$ для ПГУ-1. При решении этой задачи намечено использовать OS алгоритм и выполнить на его основе некоторые ТЭ расчеты, в том числе определить критерий $Z_1(R,Y_{opt})$, характеризующий цикл указанной установки, здесь Y_{opt} - оптимальные граничные условия для ПГУ-1.

Вторая цель нашей статьи связана с созданием «Многофакторной технологии формирования OS алгоритмов». Указанная технология будет содержать несколько шагов. Среди них отметим шаги, на которых исследователь:

- 1) создает SMath – код; например, делает программу Code– CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7), которая применяется в задаче (А);
- 2) преобразует SMath – код в соответствующий OS ресурс (рис. 2, позиция 5),
- 3) размещает это ПО на сервере BS (рис. 2, позиция 12), при этом используются: МП SMath, «Mathcad Calculation Server», а также некоторые инструменты информационной технологии (ИТ) (рис. 2).

Применительно к задаче (А) указанный OS ресурс именуется как Res– OS– CCGP(Z,R,Y, (<http://klm>), key(def)), здесь в имени ресурса (<http://klm>) - URL адрес OS ресурса, key(def) – ключ/пароль OS ресурса (см. ниже).

Литературный обзор (Literature Review)

Высокая эффективность установок ПГУ, в которых используется газотурбинная технология, а также интерес теплоэнергетиков к обеспечению ПО, которое предназначено для выполнения ТЭ расчетов, связанных с вычислением критериев $Z(R,Y)$ для указанных установок, нашло отражение в ряде научных работ и публикаций.

В статьях (Е. Е. Ustjuzhanin и др. [17], Андриященко А.И. [18], В.А. Волощук [19], Е.В. Барочкин и др. [20], Александров А.А. и др. [11], Очков В.Ф. и др. [12]) приводятся актуальные результаты, в том числе:

- а) по анализу схемных решений, которые можно использовать для модернизации установок ПГУ,
- б) по формулам, которые следует использовать для оценки критериев $Z(R,Y)$ для ПГУ,

В статьях (Wagner, W. и др. [7], IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 [8], Очков В.Ф. и др. [2]) приводятся:

- а) современные табулированные термодинамические свойства воды и водяного пара в широком интервале давлений и температур,
- б) формулы для вычисления указанных свойств.

В статьях (В.Ф. Очков и др. [1], Очков В. Ф. и др. [9], В. Ф. Очков и др. [10], Александров А.А. [11], Очков В.Ф. и др. [12],) приводятся:

- а) некоторые методические решения, которые основываются на технологии ИТ и

МП SMath и которые можно использовать при разработке некоторого обеспечения ПО; последнее предназначено для ТЭ расчетов, выполняемых пользователями с помощью OS алгоритмов,

б) рекомендации для исследователей, которые адаптируют OS алгоритмы к удаленному серверу.

В статьях (<https://www.nist.gov/srd/refprop> [6], NIST Chemistry WebBook [13], В. Ю. Зицерман и др. [14], Jorrit Wronski и др. [15], Chirico R.D. и др. [16], <http://twf.mpei.ac.ru/ТТНВ/Aung/> [21]) приводятся описания баз данных и адреса сайтов, которые размещены в Интернете и содержат актуальную информацию (данные о теплофизических свойствах воды и других рабочих тел).

Материалы и методы (Materials and methods)

1 Формирование OS алгоритма

В данном разделе рассмотрим некоторые характеристики OS алгоритма, а также опишем некоторый подход, позволяющий создавать OS алгоритмы. На рис. 2 приведены источники информации, функциональные связи и инструменты, используемые для создания OS алгоритма, упомянутого во введении. Структура OS алгоритма содержит несколько компонентов (рис. 2), в том числе:

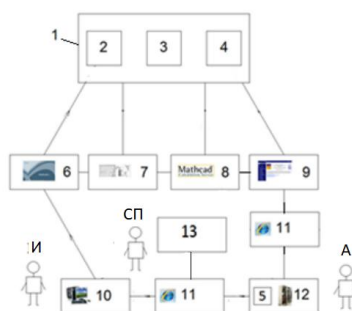


Рис. 2. Источники информации и инструменты, используемые для создания OS алгоритма, ориентированного на установку ПГУ-1: 1 – открытый интерактивный алгоритм; 2 – часть, связанная с Smath - формулами, или Smath - поле; 3 – текстовая часть или текстовое поле; 4 – часть, связанная с IT; 5 – ресурс Res – OS – CCGP(Z, R, Y, (<http://klm>),key(def)); 6 – Smath - инструменты; 7 - Smath - программа в виде Code – CCGP(Z, R, Y); 8 - технология «Mathcad Calculation Server»; 9 – пакет «Microsoft Expression Web 3», а также другие IT - инструменты; 10 – PC исследователя; 11 – Интернет; 12 – сервер BS и веб - сайт [2]; 13 – сторонний сервер, А - администратор сервера BS, СП -сторонний пользователь, И -исследователь

Fig. 2. Information sources and tools used to create an OS algorithm focused on the installation of PGU-1: 1 – an open interactive algorithm; 2 is the part related to Smath formulas, or the Smath field; 3 – text part or text field; 4 – the IT-related part; 5 – the Res – OS – CCGP resource(Z, R, Y, (<http://klm>),key(def)); 6 – Smath tools; 7 - Smath program in the form of Code – CCGP(Z, R, Y), 8 - technology Mathcad Calculation Server; 9 – Microsoft Expression Web 3 package, as well as other IT tools; 10 – Researcher's PC; 11 – Internet; 12 – BS server and website [2]; 13 – third-party server, А - BS server administrator, СП -third-party user, И – researcher

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

1) часть, в которую включены формулы MF, записанные с помощью МП SMath; эта часть именуется как SMath - поле;

2) текстовую часть или текстовое поле;

3) часть, связанную с IT.

Формируя указанный алгоритм, исследователь (И) (рис. 2) должен выполнить ряд этапов, в том числе:

а) написать Smath - программу (рис. 2, позиция 7); последняя содержит формулы MF, необходимые для ТЭ расчета, включая, например, зависимости для вычисления критерия $Z_1(R, Y)$;

б) разместить Smath - программу на сервере BS (рис. 2, позиция 12) в виде OS ресурса (рис. 2, позиция 5).

OS алгоритм должен приобрести следующие характеристики.

1. С помощью OS алгоритма исследователь (И) может выполнить заданный ТЭ расчет на компьютере PC (рис. 2, позиция 10) с помощью Smath - программы.

2. Исследователь (И) имеет возможности:

а) обратиться к серверу BS по Интернету (рис. 2, позиция 11) и вызвать OS ресурс (рис. 2, позиция 5);

б) запустить программу Smath - программу и выполнить соответствующий ТЭ расчет на сервере BS;

в) передать по Интернету результат упомянутого ТЭ расчета от сервера BS на PC (рис. 2, позиция 10).

3. OS алгоритм позволяет подключить стороннего пользователя (СП) (рис. 2), работающего на компьютере PC (рис. 2, позиция 13), к серверу BS. В этом случае пользователь (СП) имеет возможность:

а) вызывать OS ресурс (рис. 2, позиция 11) с помощью Интернета (рис. 2, позиция 11),

б) знакомиться с формулами MF, входящими в Smath - программу, а также копировать указанные формулы.

Указанные опции («показ» формул MF, «копирование» формул MF, «копирование кода»), которые предоставляет OS алгоритм, объясняют используемый в статье термин «открытый интерактивный алгоритм/ресурс».

Рассмотрим этапы «Многофакторной технологии создания OS алгоритма», упомянутой во введении. Эта технология состоит из нескольких шагов; среди них следующие шаги были упомянуты выше:

1) написание Smath - программы (рис. 2, позиция 7);

2) размещение этого кода на сервере в виде OS ресурса (рис. 2, позиция 5).

Поясним этап (2) на примере программы Code- CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7). После создания этой Smath - программы исследователь (И) (рис. 2) привлекает дополнительные факторы (IT инструменты и др.) и выполняет следующие шаги:

а) редактирует Code- CCGP(Z, R, Y) с помощью IT инструментов (рис. 2, позиции 8 и 9), представляющие собой «Mathcad Calculation Server» и «WebControl» [1],

б) группирует формулы MF и выделяет в этом коде «область промежуточных результатов» и «область условного доступа»,

в) по электронной почте отправляет администратору (А) (рис. 2), который работает с сервером BS (рис. 2, позиция 12), модифицированную программу Code- CCGP(Z, R, Y).

Администратор (А) использует IT инструменты (рис. 2, позиции 8 и 9) и выполняет следующие действия:

1) выбирает URL- адрес (<http://klm>) и ключ (`key(def)`),

2) размещает указанную модифицированную программу на сервере BS и получает в итоге ресурс Res- OS-CCGP(Z,R,Y, (<http://klm>), `key(def)`) (рис. 2, позиция 5).

В литературе описано несколько форм OS алгоритмов; так, в [10] рассматривается OS алгоритм в виде «пользовательской функции» (см. ниже). Авторы данной статьи используют «Многофакторную технологию создания OS алгоритма» при разработке комплекса СПК.

2 Цикл ПГУ: способы модернизации и формулы для оценки критериев Z

Этот раздел посвящён вопросам, которые необходимо решать при разработке метода I, упомянутого во введении. Часть этих вопросов связана с построением цикла ПГУ и выбором формул MF, которые необходимо включить в Code- CCGP(Z, R, Y).

В метод I включаем нескольких этапов; среди них отметим:

1) разработку программы Code- CCGP(Z, R, Y) (см. раздел 1),

2) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ПГУ-1.

С термодинамической точки зрения преимущество модернизированного цикла ПГУ перед циклом базовой ГТУ обусловлено тем, что критерий $Z_{1\text{баз}}$, реализуемый в цикле базовой ГТУ, является существенно меньшим, чем критерий Z_1 , относящийся к циклу ПГУ. Более высокая эффективность модернизированного цикла объясняется более высокой температурой $Y_3=T_2$ (точка 3г, рис. 1) подвода теплоты (q_1) в камере сгорания КС (рис. 1) по сравнению с температурой, при которой подводится теплота к рабочему телу в традиционной ПТУ [18]. Наряду с этим цикл базовой ГТУ имеет весьма высокую температуру T_3 (точка 4г, рис. 1), при которой отводится теплота из цикла ГТУ. Эта характеристика ГТУ рассматривается как негативная.

В литературе описано несколько методических приемов, посвященных модернизации ГТУ; среди них отметим следующие.

1. В [11] говорится о приеме (А), который включает конструктивное объединение установки ГТУ и блока ПТУ для реализации совместной технологии получения электроэнергии (рис. 1). Так, установки ПГУ с котлом - утилизатором (КУ), которые отвечают данному способу, рекомендуются как весьма перспективные и в других работах

[19], [20]; здесь приводятся численные данные о том, что указанное объединение позволяет существенно улучшить эффективность базовой установки ГТУ, то есть добиться для цикла ПГУ условия $Z_1 \gg Z_{1\text{баз}}$. В рамках способа (А) исследователь добивается уменьшения температуру T_3 (точка 4г, рис. 1).

Рассматривая теплосиловую схему (рис. 1), введем некоторые формулы, которые намечены для использования в программе Code-CCGP(Z, R, Y).

Блок ГТУ выполняет ряд функции, в том числе: генерирует теплоту q_1 и совершает удельную внутреннюю работу (l_i). Цикл ГТУ связан с рядом граничных условий, Y, в том числе Y температур, в том числе температура воздуха на входе в ГТУ T_1 (точка 1_{воз}, рис. 1) и температура воздуха на выходе из КУ T_5 (точка 5г, рис. 1). Используя характеристики (q_1, l_i), записываем внутренний КПД, $Z_2^* = \eta_i$, для блока ГТУ в виде:

$$\eta_i = l_i / q_1. \quad (1)$$

Определяем работу l_i в форме [17], [12]:

$$l_i = l_{t_gt} \cdot \eta_{0i_gt} - \frac{l_{t_comp}}{\eta_{0i_comp}}, \quad (2)$$

где l_{t_gt} - удельная работа, которая относится к изоэнтропийному расширению газа в турбине ГТ (рис. 1), η_{0i_gt} - относительный внутренний КПД турбины ГТ (рис. 1); l_{t_comp} - удельная работа изоэнтропийного сжатия воздуха в компрессоре К (рис. 1); η_{os_comp} - КПД компрессора (К).

Вводим отношение ψ и рассматриваем уравнение:

$$q_1 = q_{t_1} \cdot \psi, \quad (3)$$

где функция q_{t_1} - теплота, подведенная извне в идеальном обратимом цикле, который реализуется в блоке ГТУ.

Используя указанные характеристики, записываем (1) в форме:

$$\eta_i = \frac{l_{t_gt} \cdot \eta_{0i_gt} - \frac{l_{t_comp}}{\eta_{0i_comp}}}{q_{t_1} \cdot \psi}. \quad (4)$$

Вводим термический КПД, $Z_3^* = \eta_t$, для блока ГТУ в виде [17], [12]:

$$\eta_t = (l_{t_gt} - l_{t_comp}) / q_{t_1}. \quad (5)$$

Используя указанные характеристики, записываем (4) в форме:

$$\eta_i = \frac{\eta_{0i_gt}}{\psi} \left[\eta_t - \varphi_{comp} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{0i_gt} \cdot \eta_{0i_comp}} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

где $\varphi_{comp} = l_{t_comp} / q_{t_1}$ - относительная работа сжатия компрессора (К).

Блок КУ выполняет некоторые функции, в том числе:

а) передает воде (рис. 1) утилизированную сбросовую теплоту, q_1' , от дымовых газов, при этом температура воды, находящейся в КУ, растет от температуры T_9 , относящейся ко входу КУ (точка 4в, рис. 1) до температуры T_{10} , при которой происходит фазовый переход вода-пар и отвечает неравенствам $T_9 < T_{10} < T_6$,

б) передает пару теплоту, q_1' , от дымовых газов, при этом температура пара, находящегося в КУ, растет от температуры T_{10} до температуры T_6 (точка 5в, рис. 1),

в) отводит теплоту, q_2' , с дымовыми газами (рис. 2).

Включаем эти характеристики в следующий энергетический баланс [17], [12]:

$$q_1' = q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{ПК} - q_2', \quad (7)$$

где $l_{ГТУ}$ - работа, полученная в генераторе (Г) (рис. 2), $q_1^{ПК}$ - теплота, которая передана воде в энергетическом котле ПК (рис. 1).

Теплота, $q_1^{ПК}$, генерируется в рассматриваемом цикле за счет сжигания дополнительного топлива в котле ПК (рис. 1), который конструктивно объединен с блоком КУ.

Определяем КПД, $\eta_{КУ}$, относящегося к блоку КУ, в виде [17], [12]:

$$\eta_{КУ} = q_1' / (q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{ПК}). \quad (8)$$

Записываем термический КПД, $Z_3 = \eta_{ПГУ-1}$, относящийся к ПГУ - 1, в виде [17], [12]:

$$\eta_{ПГУ-1} = l_{ГТУ} / (q_1 - l_{ГТУ} + q_1^{ПК}). \quad (9)$$

Вводим характеристику, $\beta_{КУ}$, которая связана с блоком КУ и именуется как степень бинарности ПГУ - 1, в виде [17], [12]:

$$\beta_{КУ} = q_1' / (q_1 + q_1^{ПК}). \quad (10)$$

Блок ПТУ выполняет ряд функции, в том числе совершает удельную внутреннюю работу, $l_{ПТУ}$, которая относится к изоэнтропийному расширению пара в турбине ПТ (рис. 1).

Записываем термический КПД, $Z_3^{**} = \eta_{ПТУ}$, для блока ПТУ в форме:

$$\eta_{\text{ПГУ}} = I_{\text{ПГУ}} / q_1' \quad (11)$$

Представляем $\eta_{\text{ПГУ-1}}$, используя уравнения (9), (10), в виде:

$$\eta_{\text{ПГУ-1}} = \beta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \beta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{КУ}} \eta_{\text{ПГУ}} \quad (12)$$

Отметим, что установки ПГУ, в которых степень бинарности отвечает условиям ($q_1^{\text{ПК}} = 0, \beta_{\text{КУ}} = 1$), именуются как утилизационные энергоустановки. В этом случае режим работы установки ПГУ-1 именуется как утилизационный режим (РУ).

Наряду с функциями (а), (б), (в) отметим еще одну функцию блока КУ:

г) исследователь подбирает значение расхода, $G_{\text{Г}}$, относящегося к дымовым газам в блоке ГТУ, и расход, $G_{\text{в.п}}$, пара, циркулирующего в блоке ПГУ, с помощью уравнения теплового баланса.

Это уравнение представляем в форме [17], [12]:

$$c_g G_{\text{Г}}(T_4 - T_{11}) = G_{\text{в.п}}(h_6 - h_{10}), \quad (13)$$

где c_g – теплоемкость дымовых газов, h_6, h_{10} – энтальпии воды при температурах (T_6, T_{10}).

Используя (13), записываем расход $G_{\text{в.п}}$ в виде:

$$G_{\text{в.п}} = c_g G_{\text{Г}}(T_4 - T_{11}) / (h_6 - h_{10}). \quad (14)$$

Расходы ($G_{\text{в.п}}, G_{\text{Г}}$) (14) применяем в некоторых ТЭ расчетах, в том числе при оценке электрических мощностей $N_{\text{ГТ}}$ и $N_{\text{ПТ}}$, которые относятся к соответствующим блокам ГТУ и ПТУ (рис. 1).

Используя обозначения для электрических КПД ($\eta_{\text{ГТУ}} = Z_1^*, \eta_{\text{ПТУ}} = Z_1^{**}$ для блоков ГТУ и ПТУ), а также формулу (12) и известные характеристики генераторов Г (рис. 1), представляем критерий Z_1 для ПГУ-1 в виде:

Используя обозначения для электрических КПД ($\eta_{\text{ГТУ}} = Z_1^*, \eta_{\text{ПТУ}} = Z_1^{**}$ для блоков ГТУ и ПТУ), а также формулу (12) и известные характеристики генераторов Г (рис. 1), представляем критерий Z_1 для ПГУ-1 в виде:

$$Z_1 = \beta_{\text{КУ}} Z_1^* + (1 - \beta_{\text{КУ}} Z_1^*) \eta_{\text{КУ}} Z_1^{**}. \quad (15)$$

С помощью формул (1) ... (15), а также и других необходимых зависимостей авторы формируют Smath - программу в виде Code – CCGP(Z, R, Y) (рис. 2, позиция 7). Характеристики этой программы представлены на сайте [21].

2. В [11] описан прием (Б), который нацелен на повышение критерия Z_1 за счет существенного увеличения критерия Z_1^* , относящегося к блоку ГТУ (рис. 1), и входящего в формулу (15). Указанный способ связан с одним или несколькими мероприятиями, среди них:

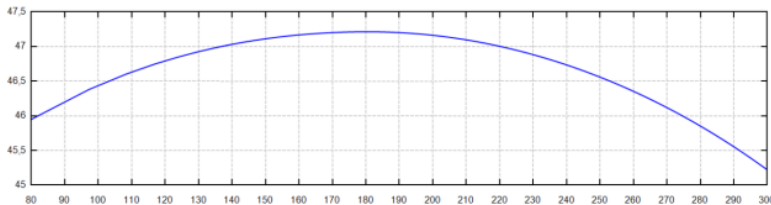


Рис. 3. Термический КПД, $Z_3^{**}(T_6)$ для блока ПТУ Fig. 3. Thermal efficiency, $Z_3^{**}(T_6)$ for the vocational training unit

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

- а) увеличение числа ступеней ГТ (рис. 1),
- б) увеличение степени повышения давления в компрессоре К (рис. 1),
- в) применение блоков промежуточного перегрева газа между ступенями ГТ,
- г) применение блоков промежуточного охлаждения циклового воздуха между ступенями компрессора К,
- д) повышение температуры T_2 на входе в ГТ (рис. 1, (точка 3_г)).

Если дополнить теплосиловую схему ПГУ-1 (рис. 1) блоками и узлами, которые должны обеспечить модернизацию этой установки с помощью шагов (а ... д), то упомянутый выше список условий $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, следует существенно расширить. Приведенная информация говорит о том, что реализация приема (Б) приводит существенному усложнению критерия $Z_1(R, Y)$ для цикла ПГУ-1.

Завершая данный раздел, отметим следующее.

1. В метод I включаем дополнительно такие этапы, как:

- а) выбор базовой энергоустановки в виде ГТУ_{баз},
- б) создание Smath - программы в виде Code – GTP(Z, R, Y), ориентированной на ТЭ расчеты для установки ГТУ_{баз};

в) размещение соответствующего ресурса Res– OS–GTP(Z,R,Y, (http://klm), key(def)) на сервере BS,

г) размещение ресурса Res– OS–CCGP(Z,R,Y, (http://klm), key(def)) на сервере BS (см. раздел 1);

д) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ГТУ_{баз}, которые выполняются на сервере BS,

е) оптимизационные ТЭ расчеты применительно к циклу ПГУ-1 и поиск оптимальных условий, Y_{opt} обеспечивающих равенство $Z_1(R, Y_{opt}) = Z_{1max}$; указанные ТЭ расчеты выполняются на сервере BS.

2. Анализируя результаты [11], а также формулы (12), (14), (15), делаем вывод о том, что граничные параметры, Y , существенно и неоднозначно влияют на критерии ($Z_1(R, Y)$, Z_1^* , Z_1^{**} , ...). Показано в [11], что для оптимизации цикла ПГУ-1 является нетривиальной задачей, в которой требуется, во-первых, выбрать и построить некоторую целевую функцию, например, $Z_1(R, Y)$ для цикла ПГУ-1. Во-вторых, функция $Z_1(R, Y)$ является неаналитической, и ее можно получить в численном эксперименте в форме таблицы, которая будет содержать (Z_1, Y_1, Y_2, \dots) данные.

3. (Z_1, Y_1, Y_2, \dots) данные, которые можно получить на основе программы Code–CCGP(Z,R,Y), существенно зависят от различных режимов работы ПГУ-1. Так, в нашем исследовании рассматривается несколько вариантов ТЭ расчета:

1) ТЭ расчет, нацеленный на получение (Z_1, Y) данных, когда выполняется режим работы ПГУ-1, именуемый как базовый режим (РБ); в этом случае выполняются условия ($\beta_{кУ}=1, Y_Б=(Y_{1Б}, Y_{2Б} \dots)$);

2) ТЭ расчет, нацеленный на получение (Z_1, Y) данных для режима РУ;

3) ТЭ расчет, ориентированный на режим работы ПГУ-1, который именуется как режим ПТУ (РПТУ); в этом случае:

а) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, которые относятся к блоку ГТУ,

б) выполняются условия ($Z_1^* = \text{const}, \eta_{кУ} = \text{const}$),

в) пошагово уменьшается параметр $\beta_{кУ}$ от 1 до ($\beta_{кУ}=1-\Delta\beta$), γ на каждом шаге применяет Code–CCGP(Z, R, Y) и вычисляются ($Z_1, Z_1^{**}, Z_3^{**}, Y$) данные, здесь $\Delta\beta$ – некоторый интервал.

4) ТЭ расчет, ориентированный на режим работы ПГУ-1, который именуется как режим ГТУ (РГТУ); в этом случае:

а) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_2, Y_3 \dots)$, которые относятся к блоку ГТУ,

б) поддерживаются постоянными параметры $Y = (Y_1, Y_2, \dots)$, которые относятся к блоку ПТУ, выполняются условия ($Z_1^{**} = \text{const}, \eta_{кУ} = \text{const}, \beta_{кУ} = 1$),

в) пошагово уменьшается параметр Y_1 .

ТЭ расчет, ориентированный на режим РПТУ, дает возможность определить ($\beta_{кУk}, Z_{1k}, Z_{1k}^{**}, Z_{3k}^{**}, Y_k, k=1 \dots N$) данные в указанном численном эксперименте, включающем N шагов. Указанная численная информация позволяет исследователю построить ряд графиков, в том числе график функции $Z_3^{**}(Y=T_6)$ для блока ПТУ (рис. 3). На этом рисунке видны результаты ТЭ расчета, в том числе:

а) интервал, ΔT_6 , в котором варьируется условие $Y=T_6$,

б) диапазон ΔZ_3^{**} , в котором варьируется критерий Z_3^{**} и в котором находится оптимальное решение $Z_3^{**}(Y_{opt}) = Z_{3max}^{**}$.

3 Некоторые методы оптимизации цикла для установки ПГУ

Наш анализ литературных источников позволил сделать некоторую классификацию методов, которые связаны с расчетом критериев $Z(R, Y_{opt})$ для цикла, реализуемого в установке ПГУ-1. В разделе 2 упоминается метод I, в котором вычисляются критерии $Z(R, Y)$ применительно к ПГУ-1. Наряду с этим методом прокомментируем следующие подходы, в которых исследователь использует Интернет; в нашем анализе используем рис. 2.

1. В методе II исследователь реализует ряд шагов, в том числе:

а) исследователь создает программу Code–CCGP(Z, R, Y) (позиция 7)

б) по Интернету (позиция 11) исследователь подключается к некоторому сайту (позиция 12), выбирает свойства R, которые требуются как исходные данные (ИД) для указанного кода, и копирует свойства, R;

в) исследователь вводит условия Y и свойства R в программу Code–CCGP(Z, R, Y), а также вычисляет критерии, Z, с помощью Code–CCGP(Z, R, Y) на компьютере PC (позиция 10).

Свойства R , находящиеся на сайте (позиция 12) имеют форму таблиц (текстовый файл или TS ресурс). Источниками табулированных данных служат известные веб - сайты организаций (НИУ «МЭИ» [2], НИСТ [6], ОИВТ РАН [14] и др.).

Отметим, что метод II включает, во – первых, шаг, на котором исследователь заходит на сайт, где размещен TS ресурс. Как правило, TS ресурс представляет собой таблицу, например, (h, P, T) данные для воды в формате txt. Термин «текстовый» показывает, что рассматриваемый TS ресурс не использует компьютерную программу или exe – file, по которым можно осуществить вычисление свойств R на сайте (позиция 12). Во - вторых, метод II содержит обязательный шаг (в), который связан с привлечением PC (позиция 10) для вычисления критериев Z .

2. В методе III исследователь привлекает ПО и инструменты, которые сходны с таковыми, применяемыми в методе II; однако в методе III наряду с шагом (а) исследователь делает следующие шаги:

б) используя компьютер PC (позиция 10) и Интернет (позиция 11), исследователь обращается к одному из веб – сайтов (позиция 12), где размещены программы типа «exe–file», именуемые как ES ресурс или закрытый Интернет ресурс [2], [6], [14], [15], вычисляет необходимые свойства, R , с помощью выбранного ES ресурса и копирует полученные свойства, R ;

в) вводит значения (Y, R) в Code–CCGP(Z, R, Y),

г) вычисляет критерии, Z , на компьютере PC (позиция 10).

Отметим, что ES – ресурс, находящийся на стороннем сайте, не предоставляет пользователю опции («показ» формул MF, используемых в данном ES – ресурсе, «копирование» формул MF, «копирование кода», используемого в данном ES – ресурсе). Приведенная характеристика ES – ресурса объясняет термин «закрытый».

Результаты (Results)

1 Функции сертифицированного программного комплекса

«Многофакторная технология создания OS алгоритма» дает возможность авторам статьи разработать комплекс СПК, ориентированный на ведение ТЭ расчетов при решении широкого круга задач теплоэнергетики. Используя этот комплекс исследователь/пользователь привлекает пакет WaterSteamPro, интегрированный в МП SMath [1], [2], в свои ТЭ расчеты.

В настоящее время по известным причинам происходит постепенный переход от зарубежных программных средств к отечественным разработкам. Если говорить о компьютерных инструментах для ведения научно-технических, в частности, теплотехнических расчетов, то российские пользователи вольно или невольно вынуждены отказываться от программ типа Mathcad, Maple, Mathematica, MATLAB и переходить на программу SMath [1] – к отечественному свободно распространяемому программному продукту, у которого есть ряд несомненных преимуществ, перечисленных на сайте <https://community.ptc.com/t5/Mathcad/Mathcad-vs-SMath/td-p/802499>.

Авторы данной статьи провели большую и кропотливую работу по интеграции в программу SMath пакета функций, возвращающих теплофизические свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики WaterSteamPro [2], который также свободно распространяется. Получился открытый программный комплекс (ОПК), который по мнению авторов будет очень полезен специалистам-теплоэнергетикам, студентам и преподавателям вузов по направлению теплотехника и теплоэнергетика, ядерная энергетика и теплофизика, энергетическое машиностроение и др.

Когда речь заходит о свободно распространяемых программах, то на ум приходят две поговорки: «*Бесплатный сыр бывает только в мышеловке*» («*You get what you pay for*») и «*Дареному коню в зубы не смотрят*» («*Never look a gift horse in the mouth*»). Как писал А.С. Пушкин «*Нравственные поговорки бывают удивительно полезны в тех случаях, когда мы от себя мало что можем выдумать себе в оправдание*». Но авторы все-таки попытались «выдумать» что-то «себе в оправдание»!

Описываемый комплекс условно бесплатный. За него не надо платить, а необходимо только провести несложную регистрацию у разработчиков (www.smath.com и www.wsp.ru) в том случае, когда комплекс используется не для коммерческих целей, а для образования или самообразования. Или просто для более тщательного знакомства. В противном случае необходимо будет войти с разработчиками в не очень обременительные финансовые отношения, описываемые еще одной поговоркой «*Курочка по зернышку клюет и сыта бывает*» («*Little by little makes a mickle*»). Эти «зернышки» помимо прочего позволили разработчикам провести тщательное тестирование и «узаконивание» программ: программа WaterSteamPro сертифицирована в Госстандарте России (<http://www.wsp.ru/ru/>

certification.asp), а программа SMath зарегистрирована в Российском реестре программного обеспечения (https://reestr.digital.gov.ru/reestr/536108/?sphrase_id=3670903).

Математическая программа SMath свободно скачивается с сайта www.smath.com и устанавливается на компьютерах, работающих не только под Windows, но, что очень важно в наше санкционное время, и под Linux. А Linux – это опять же свободно распространяемая операционная система. Пакет программ WaterSteamPro по расчету теплофизических свойств воды и водяного пара, а также газов (основные рабочие тела теплоэнергетики) является дополнением (плагином), который прикрепляется к установленной на компьютере пользователем программе SMath через цепочку команд меню Сервис / Дополнения / Галерея онлайн – см. рис. 4.

После подключения и последующего лицензирования пакета WaterSteamPro к программе SMath (см. <http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/SMath-WSP.pdf>) в среде этого научно-технического калькулятора станут доступны 353 функции (рис. 5), возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара (префикс wsp), а также (дымовых) газов и парогазовых установок. Без лицензирования пакета WaterSteamPro окно Имя функции, показанное на рис. 5, будет пустым.

После описанного подключения и лицензирования можно подсчитать, например, значение удельной энтальпии (теплосодержания) воды или водяного пара в зависимости от давления и температуры. Для этого необходимо и достаточно в среде SMath набрать на клавиатуре символы wspH (см. верхний левый угол на рис. 6). После этого выпадет список функций пакета WaterSteamPro, имя которых начинается с этих четырех букв. Эти функции имеют разные аргументы — разные параметры воды и водяного пара, зафиксированные в последующих буквах. Буква S в имени функции будет означать, что ведется расчет на линии насыщения. При этом имеется ввиду либо вода (W), либо водяной пар (S), либо их смесь (X).

Вся эта информация размещена на сайте www.wsp.ru. Числа 1, 2, 3 и 5, прописываемые за буквами wspH, означают, что имеется ввиду вода (1), водяной пар (2), околоскритическая область (3) или пар при высокой температуре (5) формуляции 1997 года Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара – см. ниже.

На рисунке 6 показаны последующие этапы работы с выбранной функцией wspHPT: ввод значений двух аргументов с единицами давления и температуры, корректировка единиц измерения у выданного значения удельной энтальпии и, наконец, корректировка формата численного ответа. Пакет SMath по умолчанию выдает упрощенные до предела единицы удельной энтальпии (Gr — грей — единица поглощенной дозы ионизирующего излучения – джоуль, деленный на килограмм) и четыре знака после запятой.

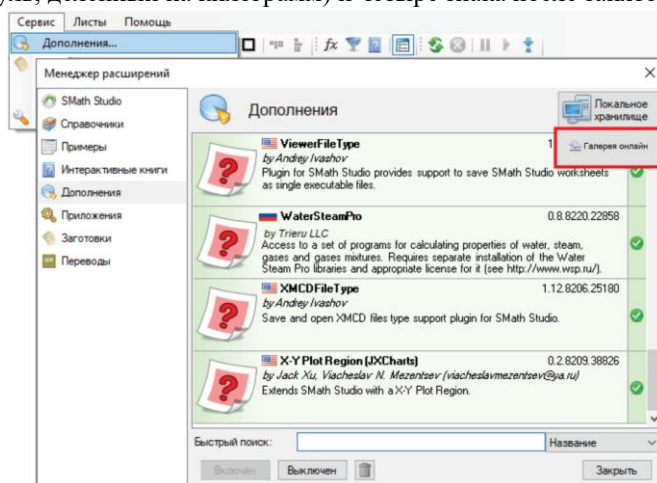


Рис. 4. Дополнение (плагин) WaterSteamPro, подключенное к среде SMath

Fig. 4. Add-on (plug-in) WaterSteamPro, connected to the SMath environment

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

Мы же отметили, что нужно выдавать четыре значащие цифры (галочка у позиции Режим значащих цифр) с единицей удельной энтальпии – килоджоуль на килограмм (джоуль на грамм).

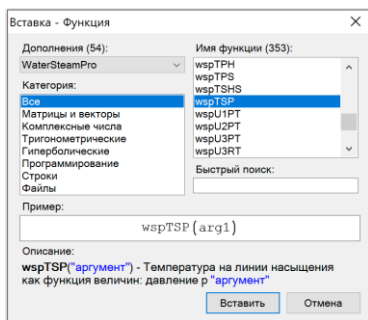


Рис. 5. Диалоговое окно

Fig. 5. The dialog box

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

Отметим, что командами меню Сервис / Опции / Язык единиц измерения можно заменить русские имена единиц измерения на английские. Это и другая также полезная опция – замена запятой на точку в разделителе целой и дробной части в десятичных числах делает удобной подготовку расчетных документов для англоязычных и прочих изданий. При этом точку с запятой в списках аргументов функций следует заменить на запятую.

Особо подчеркнем, что пакет WaterSteamPro в среде SMath работает с единицами измерения [3, 4], что полностью соответствует современным стандартам компьютерных вычислений. С другой стороны, лицензируя пакет WaterSteamPro, пользователь получает возможность работать с ним и в других вычислителях – в табличном процессоре Excel, например, где нет поддержки единиц измерения.

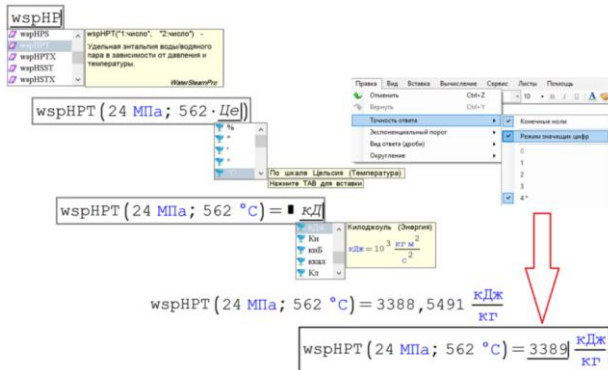


Рис. 6. Шаги ввода в расчет значения удельной энтальпии водяного пара

Fig. 6. Steps for calculating the specific enthalpy of water vapor

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

Мы не будем описывать все функции пакета WaterSteamPro – это все можно найти на вышеотмеченном сайте. Мы приведем конкретный несложный пример теплоэнергетического расчета в среде SMath с опорой на эти функции, который покажет читателю удобства такого комплекса.

На рисунке 7 приведен протокол расчета термического КПД паротурбинного цикла с двумя отборами пара на внутреннюю теплофикацию – на подогрев питательной воды в двух смешивающих регенеративных подогревателях. Вода на выходе из них (на входе в насосы) находится в состоянии насыщения. Описание расчета исчерпывающе дано в комментариях протокола. Сразу отметим, что реальный паротурбинный блок имеет до восьми отборов пара из турбины в регенеративные подогреватели. И не только смешивающего, но и поверхностного типа. Это, как надеются авторы, не умаляет ценность расчета, приведенного на рис. 7. Образовательную и не только ценность.

Комментарии к расчету, показанному на рисунке 7.

По традиции, принятой в технической термодинамике, переменная, хранящая значение температуры по относительной шкале Цельсия, должна быть прописана маленькой буквой t_0 , а не T_0 (абсолютная термодинамическая температура в кельвинах). Но пакет SMath делает эту традицию излишней. Дело в том, что в переменную допустимо вводить значение температуры по любой шкале (см. левый верхний угол на рис. 7), но в памяти компьютера она будет храниться в кельвинах – в основных единицах температуры СИ. Было бы логичней, если бы она хранилась в джоулях на моль, что отвечает теоретическому, а не эмпирическому подходу к понятию температуры [5]. Но в этом вопросе теплотехники и термодинамики пошли на некий компромисс и остановились на кельвинах, введя эту искусственную единицу температуры. Хотя физики часто измеряют

температуру электронвольтами (эВ) – единицами энергии. А с физиками не поспоришь: термодинамика является частью физики, а не наоборот. В нашем расчете температура пара, поступающего в турбину, равна примерно 70 миллиэлектронвольт (см. рис. 8). Комнатная же температура (примерно 17°C) – это опять же примерно одна сороковая электронвольта (0,025). Пакет SMath в ближайшем будущем позволит устранить эмпирику при работе с температурой, которую можно будет выражать и в электронвольтах, но в памяти компьютера будет храниться в джоулях, деленных на моль. При этом константа R_m перестанет быть универсальной газовой постоянной и перейдет в разряд переводного коэффициента значений температуры.

Давления задаются в атмосферах физических и в миллиметрах ртутного столба, которые более понятны для восприятия, чем мега- или килопаскаля. Пакет SMath позволяет работать с любыми единицами измерения, а не только с теми, какие рекомендованы ГОСТами, но не вполне удобны в научно-техническом обиходе. Вернее так – вводить и выводить значения именованных величин (физических, экономических, информационных и др.) можно с любыми единицами, но в памяти компьютера они будут храниться в значениях, отвечающих базовым единицам СИ. В давлении, выраженном в атмосферах (физических или технических), ясно просматривается физический смысл – давление во столько-то раз выше атмосферного. Чего не скажешь о паскалях. Поучительный исторический пример. В прогнозах погоды у нас одно время пытались прописывать атмосферное давление в гектопаскалях, но вернулись к более понятным и привычным мм ртутного столба. Кстати, скорость ветра в метеосводках тоже желательно выражать в километрах в час (kph), а не в метрах в секунду.



Рис. 7. Расчет термического КПД для модифицированного блока ПТУ, содержащего два регенеративных смешивающих подогревателя

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

Что и делается в европейских странах, но не в России.

Пять kph – это скорость пешехода, 20 kph – велосипедиста, а 60 kph -автомобиля в городе. Есть с чем сравнивать скорость ветра выраженную в kph, чего не скажешь о метрах в секунду. Расчет значений долей отбора пара α_1 и α_2 в подогреватели можно вести по формулам, полученным в результате аналитического решения уравнений баланса тепловой энергии в процессе смешивания воды с водяным паром в подогревателях.

Но в расчете оставлены сами эти два уравнения, у которых численно ищется корень через встроенную в SMath функцию roots. Это также повышает «читабельность» расчета – в системе уравнений четко виден их физический смысл, чего не скажешь о выражениях, полученных в результате решения уравнений.

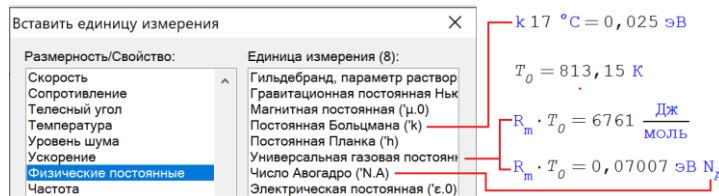


Рис. 8. Правильные единицы температуры *Fig. 8. Correct temperature units*
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Возвращаясь к предыдущему комментарию, отметим, что и доли отбора пара, и КПД в памяти компьютера хранятся в абсолютных значениях. Но выводить их на печать можно в процентах. Или в промилле.

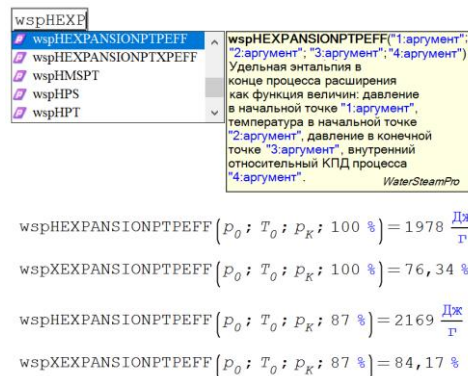


Рис. 9. Расчет процесса расширения пара в турбине *Fig. 9. Calculation of the steam expansion process in a turbine*
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет термического КПД для блока ПТУ ведется через программный блок, начало и конец которого отмечен вертикальной чертой. В этом блоке отдельно расписаны удельные работы (переменные, начинающиеся с латинской буквы эль) турбины 1 (часть высокого давления), турбины 2 и турбины 3, а также представлены удельные работы трех насосов: конденсатного (КН), промежуточного (Н-2) и питательного (Н-1).

Расчеты, показанные на рис. 6 и 7, охватывают идеальные процессы расширения пара в турбине и сжатия воды в насосах – удельная энтропия в этих устройствах не меняется. Вследствие этого рассчитанная влажность пара, выходящего из турбины, оказалась недопустимо высокой – 23.7%. В пакете WaterSteamPro есть функции, возвращающие теплофизические свойства воды и водяного пара в зависимости не только от параметров рабочей среды, но и от неких технологических условий. На рисунке 9 показана работа двух таких функций, возвращающих удельную энтальпию и степень сухости водяного пара, расширяющегося в турбине с определенным внутренним относительным КПД. Расчеты, показанные на рисунках 6 и 7, несложно подправить так, чтобы были учтены реальные, а не идеальные условия.

И последний комментарий.

При расчете КПД паротурбинного блока на рисунке 7 использовалась дробь, числитель которой это сумма удельных работ трех частей паровой турбины за вычетом удельных работ насосов, а знаменатель – удельная теплота, подведенная к паровому котлу. Но КПД можно «повысить», если удельные работы перенести со сменой знака из числителя в знаменатель (рис. 10).

$$\eta_T := \frac{l_{01} + l_{12} + l_{2K}}{q + l_{KH} + l_{H2} + l_{PH}} = 47,70 \%$$

Рис. 10. Альтернативный подсчет термического КПД для блока ПТУ *Fig. 10. Alternative calculation of thermal efficiency for a vocational training unit*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Операторы, показанные на рисунке 4, несложно сгруппировать в функцию пользователя (рис. 11), что позволяет, к примеру, строить графические зависимости (рис. 12). Отдельные операторы в программе, показанной на рисунке 11, стали элементами матрицы с одной строкой и с двумя-тремя столбцами. Это сделано для того, чтобы созданная функция помещалась целиком на экране компьютера. Это облегчает ее отладку и возможное усложнение в будущем. Встроенная в SMath функция `augment` объединяет два отдельных вектора в матрицу с двумя столбцами – с дискретными значениями аргумента и функции. Деление этих значений на единицу атмосферы физические (atm) и проценты (%) позволяет на осях графика иметь нужные единицы измерения.

$\eta_T(P_0; T_0; P_1; P_2; P_K) :=$
 $:= \left[\begin{array}{l} T_K := \text{wspTSP}(P_K) \quad h'_{KH} := \text{wspHSWT}(T_K) \quad s_{KH} := \text{wspSSWT}(T_K) \\ T'_{H2} := \text{wspTSP}(P_2) \quad h'_{H2} := \text{wspHSWT}(T'_{H2}) \quad s_{H2} := \text{wspSSWT}(T'_{H2}) \\ T'_{H1} := \text{wspTSP}(P_1) \quad h'_{H1} := \text{wspHSWT}(T'_{H1}) \quad s_{H1} := \text{wspSSWT}(T'_{H1}) \\ T_{PH} := \text{wspTSP}(P_0; s_{H1}) \quad h'_{H2} := \text{wspHPS}(P_2; s_{H2}) \\ h_0 := \text{wspHPTS}(P_0; T_0) \quad s := \text{wspSPT}(P_0; T_0) \quad h_K := \text{wspHPS}(P_K; s) \\ h_1 := \text{wspHPS}(P_1; s) \quad h_2 := \text{wspHPS}(P_2; s) \quad h_{PH} := \text{wspHPS}(P_0; s_{H1}) \\ T'_{H2} := \text{wspTSP}(P_2; s_{H2}) \quad h'_{KH} := \text{wspHPS}(P_2; s_{KH}) \quad T'_{KH} := \text{wspTSP}(P_2; s_{KH}) \\ \left[\begin{array}{l} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right] := \text{roots} \left(\left[\begin{array}{l} \alpha_1 \cdot h_1 + (1 - \alpha_1) \cdot h'_{H2} = 1 \cdot h'_{H1} \\ \alpha_2 \cdot h_2 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot h'_{KH} = (1 - \alpha_1) \cdot h'_{H2} \end{array} \right]; \left[\begin{array}{l} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{array} \right] \right) \\ l_{01} := 1 \cdot (h_0 - h_1) \quad l_{12} := (1 - \alpha_1) \cdot (h_1 - h_2) \quad l_{2K} := (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_2 - h_K) \\ l_{KH} := (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h'_{KH} - h'_{KH}) \quad l_{H2} := (1 - \alpha_1) \cdot (h'_{H2} - h'_{H2}) \\ l_{PH} := 1 \cdot (h_{PH} - h'_{H1}) \quad q := 1 \cdot (h_0 - h_{PH}) \\ \frac{l_{01} + l_{12} + l_{2K} - l_{KH} - l_{H2} - l_{PH}}{q} \end{array} \right]$
 $\eta_T(P_0; T_0; P_0; P_0; P_K) = 43,88 \%$ $\eta_T(P_0; T_0; P_K; P_K; P_K) = 43,88 \%$
 $\eta_T(P_0; T_0; 30 \text{ атм}; 30 \text{ атм}; P_K) = 46,82 \%$ $\eta_T(P_0; T_0; 70 \text{ атм}; 30 \text{ атм}; P_K) = 47,45 \%$

Рис. 11. Создание функции, рассчитывающей термический КПД для модифицированного блока ПТУ *Fig. 11. Creation of a function that calculates the thermal efficiency of thermal efficiency for a modified vocational school unit*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Построение не отдельных кривых, а поверхности с максимумом значения термического КПД, отображающей влияние давлений двух отборов на термический КПД паротурбинного цикла, приведено на форуме пользователей пакета SMath по адресу https://en.smath.com/forum/yaf_postsm82946_f-x--y----3D-plot-and-optimal-point.aspx. Для этого был задействован еще один плагин пакета SMath – программа Maxima (<https://maxima.sourceforge.io/ru/>) – свободно распространяемая система компьютерной алгебры, существенно расширяющая возможности пакета SMath. На этом форуме также решена задача по поиску оптимальных значений давлений отборов, при которых КПД будет максимальным. К пакету SMath можно также подключить и другие популярные математические программы: Mathcad и Maple. Но правомерность этого действия сомнительна, так как пакеты Mathcad и Maple являются коммерческими программными продуктами. С другой стороны, как отмечают многие исследователи и создатели расчетов, мы в настоящее время можем использовать данные пакеты в виде некоего трофея.

Справедливости ради следует отметить, что к расчетной программе SMath можно прикрепить еще одно «теплофизическое» дополнение (плагин) с функциями, возвращающими свойства рабочих тел и теплоносителей энергетики – пакет CoolProp (www.coolprop.org), представляющий собой свободно распространяемую версию коммерческого пакета RefProp [6].

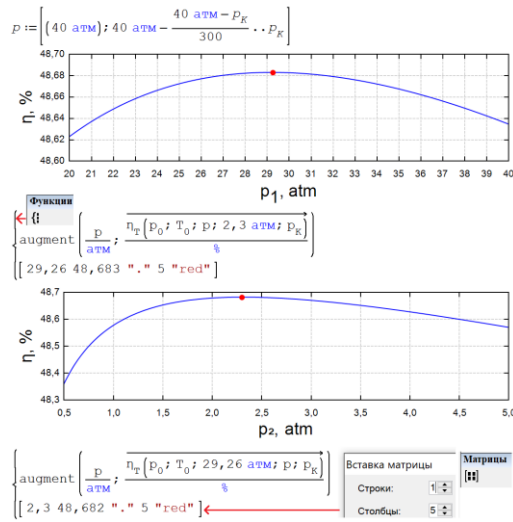


Рис. 12. Графики зависимости термического КПД блока ПТУ от давлений (p_1 , p_2) в отборе 1 и отборе 2

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

На рисунке 13 даны примеры вызова двух функций пакета CoolProp в среде SMath. В переменной wf (working fluid) записана строковая величина "IF97::H2O", означающая, что расчеты ведутся по формуляции Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) 1997 года [7] для промышленного использования.

$$wf := "IF97::H2O"$$

$$T_K := CoolProp_Props("T"; "P"; p_K; "Q"; 0,5; wf) = 28,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h'_{KH} := CoolProp_Props("H"; "T"; T_K; "Q"; 0; wf) = 121,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Рис. 13. Примеры вызова функций из пакета Cool Prop

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

Если в переменную wf записать укороченную строку "H2O", то расчеты будут вестись по формуляции IAPWS 1995 года [8]. В России стандартом (ГОСТ) является формуляция IAPWS 1997 года, а не формуляция 1995 года. Такой же уровень имеет формуляция 1997 года и во многих других странах мира.

Тестирование показало, что программу CoolProp по формуляции 1997 года нельзя использовать в теплоэнергетических расчетах (рис. 14), где функция, показанная на рис. 8, отображается в виде параметрического графика на примере паротурбинной установки с одним отбором (давление p_1 равно давлению p_2). Не сертифицированный и не протестированный пакет CoolProp дает сбой. Чего не скажешь о пакете WaterSteamPro.

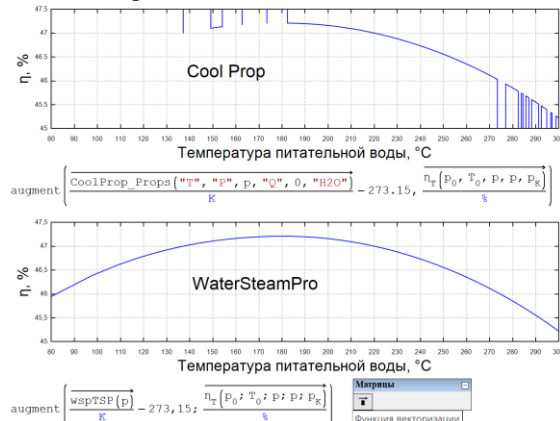


Рис. 14. Расчет зависимости термического КПД для блока ПТУ от температуры питательной воды. Использование двух пакетов, содержащих свойства воды

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

Пакет CoolProp может работать не только с водой и водяным паром, но и с другими теплоносителями и рабочими телами промтеплоэнергетики – с хладагентами, например. Но это также требует тщательного тестирования и сертификации. Один из примеров такой проверки описан в главе 8 учебного пособия [9].

Заключение (Conclusions)

Авторам удалось в рамках импортозамещения создать сертифицированный свободно распространяемый программный комплекс для теплоэнергетических расчетов, позволяющий работать с теплофизическими величинами с численной и символьной (аналитической) математикой, строить графики, проводить оптимизацию и делать многое другое. Использование комплекса на порядок ускоряет расчеты, резко снижает риск ошибок в них и улучшает «читабельность» расчетов и их открытость для дальнейшего расширения и снятия ограничений.

Литература

1. Информационные технологии в инженерных расчетах: SMath и Python: учебное пособие для вузов // В.Ф. Очков, К.А. Орлов, Ю.В. Чудова [и др.]. – Санкт-Петербург: Лань, 2023. – 212 с. (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EC-SMath.pdf>)
2. Очков В.Ф., Орлов К.А., Александров А.А., Очков А.В. Свойства воды и водяного пара: сетевые, открытые, интерактивные IT-ресурсы // Теплоэнергетика. № 5. 2015 г. С. 71-80 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/IAPWS-TE.pdf>)
3. Очков В.Ф. Физические и экономические величины в Mathcad и Maple (Серия «Диалог с компьютером»). М.: Финансы и статистика, 2002 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Fis-Eco-Units-Mathcad-Maple.pdf>)
4. Steve McKeever, Oscar Bennich-Björkman, Omar-Alfred Salah. Unit of measurement libraries, their popularity and suitability // Software: Practice and Experience. Volume 51, Issue 4, April 2021, Pages 711-734, <https://doi.org/10.1002/spe.2926>
5. Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда $p = T$ // Законодательная и прикладная метрология. № 2. 2022. С. 38-44 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)
6. <https://www.nist.gov/srd/refprop> (Дата обращения 01.11.2024).
7. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretzschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (<http://iapws.org/refguide/IF97-Rev.html>)
8. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (<http://iapws.org/refguide/IAPWS-95.html>)
9. Очков В. Ф., Тихонов А. И. Math CAD и Python: обучение по технологии STEM, Издательство Лань, 2023 (<https://lanbook.com/catalog/informatika/math-cad-i-python-obuchenie-po-tekhologii-stem>)
10. В. Ф. Очков, Е. Е. Устюжанин, Чжо Ко Ко, В.В. Шишаков. Теплофизические базы данных: от таблицы к интерактивным Интернет- ресурсам и «облачным» шаблонам. Теплофизика высоких температур. 2015. №4 С. 41– 46.
11. Александров А.А., Очков В.Ф., Устюжанин Е.Е. [и др.] Теплотехнические расчеты на компьютере // Учебное Пособие. Издательство МЭИ. -2019.-250 с.
12. Очков В.Ф., Александров А.А., Знаменский В.Е. [и др.] Теплотехнические этюды с Excel, Mathcad и Интернет: учеб. пособие /, Г. Ю. Кондакова, А. Лук, К. А. Орлов, А. В. Очков, А. А. Пантелеев, Чжо Ко Ко.— СПб.: БХВ-Петербург, 2014.—336с.: ил. ISBN 978-9775-3352-2
13. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. Linstrom P.J., Mallard W.G. National Institute of Standards and Technology// 2005. <http://webbook.nist.gov>
14. В. Ю. Зицерман, Г. А. Кобзев, Л. Р. Фокин и др. Информационный триптих теплофизических свойств веществ // 2007, <http://www.thermophysics.ru/triptych>
15. Jorrit Wronski a. o. CoolProp library. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2014, <http://www.coolprop.org/index.html>
16. Chirico R.D., Frenkel M. a. o. Refprop - 8 data base, 2006, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
17. Е. Е. Устюжанин, В. Ф. Очков, В. Е. Знамеский. Development of Internet algorithms and some calculations of power plant COP. Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012348
18. Андрущенко А.И. О термодинамической эффективности сложных циклов ГТУ в парогазовых установках // Теплоэнергетика. – 1998. – №3. – С. 68-71.
19. В.А. Волощук, В.Ф. Очков, К.А. Орлов. Термодинамическая оптимизация циклов некоторых ГТУ и ПГУ при помощи современных информационных технологий (Часть 2) // Новое в российской электроэнергетике, № 8, 2011. С. 15-25.

20. Е.В. Барочкин, Г.В. Ледуховский, А.Е. Барочкин. Схемы, оборудование и эксплуатация ТЭС и АЭС: Учеб. пособие / Под ред. Е.В. Барочкина / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014.–208С.

21. <http://twt.mpei.ac.ru/ТТНВ/Aung/> (Дата обращения 02.10.2024).

Авторы публикации

Очков Валерий Федорович – д-р. техн. наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, OchkovVF@mpei.ru

Ахметова Ирина Гареевна – д-р. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Экономика и организация производства Казанского государственного энергетического университета, <https://orcid.org/0000-0002-7082-2005>.

References

1. Information technologies in engineering calculations: SMath and Python: a textbook for universities // V.F. Ochkov, K.A. Orlov, Yu.V. Chudova [et al.]. – St. Petersburg: Lan, 2023. – 212 p. (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/EC-SMath.pdf>)

2. Points V.F., Orlov K.A., Alexandrov A.A., Ochkov A.V. Properties of water and water vapor: network, open, interactive IT resources // Heat power engineering. No. 5. 2015, pp. 71-80 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/IAPWS-TE.pdf>)

3. Points V.F. Physical and economic quantities in Mathcad and Maple (Series "Dialogue with a computer"). Moscow: Finance and Statistics, 2002 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/Fis-Eco-Units-Mathcad-Maple.pdf>)

4. Steve McKeever, Oscar Bennich-Björkman, Omar-Alfred Salah. Unit of measurement libraries, their popularity and suitability // Software: Practice and Experience. Volume 51, Issue 4, April 2021, Pages 711-734, <https://doi.org/10.1002/spe.2926>

5. Points V.F., Orlov K.A. When $p \cdot v = T$ // Legislative and applied metrology. No. 2. 2022. pp. 38-44 (<http://twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)

6. <https://www.nist.gov/srd/refprop>

7. Wagner, W., Cooper, J. R., Dittmann, A., Kijima, J., Kretschmar, H.-J., Kruse, A., Mareš, R., Oguchi, K., Sato, H., Stöcker, I., Šifner, O., Takaishi, Y., Tanishita, I., Trübenbach, J., and Willkommen, Th., The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, J. Eng. Gas Turbines & Power 122, 150-182 (2000) (<http://iapws.org/refguide/IF97-Rev.html>)

8. IAPWS, Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (<http://iapws.org/refguide/IAPWS-95.html>)

9. Points V. F., Tikhonov A. I. Math CAD and Python: STEM technology education, Lan Publishing House, 2023 (<https://lanbook.com/catalog/informatika/math-cad-i-python-obuchenie-po-tekhologii-stem>)

10. V. F. Points, E. E. Ustyuzhanin, Zhuo Ko Ko, V.V. Shishakov. Thermophysical databases: from tables to interactive Internet resources and "cloud" templates. Thermophysics of high temperatures. 2015. No. 4 pp. 41-46.

11. Alexandrov A.A., Ochkov V.F., Ustyuzhanin E.E. [et al.] Thermal engineering calculations on a computer // Textbook. MEI Publishing House. -2019.-250 p.

12. Points V.F., Alexandrov A.A., Znamensky V.E. [et al.] Thermal engineering studies with Excel, Mathcad and the Internet: textbook. handbook /, G. Y. Kondakova, A. Luk, K. A. Orlov, A.V. Ochkov, A. A. Panteleev, Zho Ko Co.— St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2014.— 336с.: ill. ISBN 978-9775-3352-2

13. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. Linstrom P.J., Mallard W.G. National Institute of Standards and Technology// 2005. <http://webbook.nist.gov>

14. V. Y. Zitserman, G. A. Kobzev, L. R. Fokin, etc. Informational triptych of thermophysical properties of substances // 2007, <http://www.thermophysics.ru/triptych>

15. Jorrit Wronski A. O. CoolProp library. Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2014, <http://www.coolprop.org/index.html>

16. Chirico R.D., Frenkel M. A. O. Refprop - 8 data base, 2006, <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>

17. E. E. Ustjuzhanin, V. F. Ochkov, V. E. Znamensky. Development of Internet algorithms and some calculations of power plant COP. Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 012348

18. Andryushchenko A.I. On the thermodynamic efficiency of complex GTU cycles in combined cycle gas plants // Thermal power engineering. – 1998. – №3. – С. 68-71.

19. V.A. Voloshchuk, V.F. Ochkov, K.A. Orlov. Thermodynamic optimization of cycles of some GTU and CCGT with the help of modern information technologies (Part 2) // New in the Russian electric power industry, No. 8, 2011. pp. 15-25.

20. E.V. Barochkin, G.V. Ledukhovskiy, A.E. Barochkin. Schemes, equipment and operation of thermal power plants and nuclear power plants: Textbook / Edited by E.V. Barochkin / Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. – Ivanovo, 2014. – 208S

21. <http://twi.mpei.ac.ru/TTHB/Aung/>

Authors of the publication

Valery F. Ochkov – National Research University "MPEI", <https://orcid.org/0000-0003-1820-2527>, OchkovVF@mpei.ru.

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

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **28.10.2024 г.**

Отредактировано **15.11.2024 г.**

Принято **19.11.2024 г.**



РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ КОНИЧЕСКИХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Крутова И.А., Золотоносков Я.Д.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Россия
iraida_knyazeva@mail.ru

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ* Статья посвящена вопросам разработки новых конструкций теплообменных аппаратов и оценки эффективности их работы. По мнению авторов, в настоящее время особый интерес представляют трубчатые теплообменные аппараты, поэтому объектом исследования в данной работе является змеевиковый теплообменный аппарат в форме усечённого конуса на базе пружинно-витого канала. Применение в производственной сфере предлагаемых теплообменных элементов и аппаратов требует проведения дополнительных исследований. **ЦЕЛЬ** исследования заключается в разработке методики постановки и решения сопряженной задачи теплообмена для конических змеевиковых теплообменных аппаратов с теплообменным элементом в форме пружинно-витого канала, анализ полученных результатов и оценка эффективности по сравнению с коническим и цилиндрическим теплообменными аппаратами на базе гладкостенных теплообменных элементов. **МЕТОДЫ.** Для численного решения сопряженной задачи теплообмена применялся МКЭ, реализованный в программе Ansys Fluent. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Основные результаты настоящего исследования представляют собой математическую модель геометрии поверхности исследуемого теплообменного аппарата и алгоритм расчёта конических змеевиковых трубчатых теплообменников, реализованные в программе Ansys Fluent. В ходе работы были определены теплогидродинамические показатели змеевиковых аппаратов. Также было проведено сравнение змеевиковых теплообменных аппаратов: конического на базе пружинно-витого канала с коническим и цилиндрическим с гладкостенным теплообменным элементом. Результаты расчетов показали, что замена гладкостенной трубы на пружинно-витой канал значительно повышает эффективность теплообменного оборудования. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Важность полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы для разработки более компактного и эффективного теплообменного оборудования, которое необходимо в современных производственных процессах. По результатам расчетов конический теплообменник показал более высокие результаты по сравнению с цилиндрическим с теплообменным элементом в виде гладкой трубы, так как для достижения одинаковой температуры на выходе нагреваемого теплоносителя потребовалась меньшая площадь теплообменной поверхности.

Ключевые слова: теплообмен; гидродинамика; змеевиковый теплообменный аппарат; пружинно-витой канал; Ansys Fluent.

Для цитирования: Крутова И.А., Золотоносков Я.Д. Решение сопряженной задачи теплообмена для конических теплообменных аппаратов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 6. С. 214-226. doi: 10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226.

SOLUTION OF THE CONJUGATE HEAT EXCHANGE PROBLEM FOR CONICAL HEAT EXCHANGERS

Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D.

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russia
iraida_knyazeva@mail.ru

Abstract: *RELEVANCE* The article is devoted to the development of new designs of heat exchangers and evaluating the efficiency of their operation. According to the authors, currently of particular interest are conical heat exchangers of the "pipe-in-pipe" type, so the object of research in this paper is a heat exchanger in the form of a truncated cone based on a spring-twisted channel. The introduction of the proposed heat exchange elements and apparatuses into the industry

requires additional research. To assess the effectiveness of the application of the considered TA, it is proposed to evaluate its performance in comparison with conical and cylindrical TA based on a smooth-walled pipe. Due to this, two hypotheses will be tested at once: the use of a conical coil heat exchanger is more efficient than a cylindrical one, and the replacement of a smooth-walled pipe with a spring-twisted channel increases the efficiency of the heat exchanger. **OBJECT.** The aim of the research is to develop a method for setting and solving the conjugate heat exchange problem for a heat exchanger in the form of a truncated cone with a heat exchange element in the form of a spring-twisted channel, analyze the results obtained and evaluate the efficiency in comparison with conical and cylindrical heat exchangers based on smooth-walled heat exchange elements. **METHODS.** For the numerical solution of the conjugate heat transfer problem, the FEM implemented by means of Ansys was used Fluent. **RESULTS.** The main results consist in the fact that the authors developed a model and algorithm for calculating conical coil heat exchangers of the pipe-in-pipe type, implemented in the Ansys program, and determined the thermal and hydrodynamic parameters of coil devices. A comparison of coil heat exchangers was also made: a conical one based on a spring-twisted channel with a conical one and a cylindrical one with a smooth-walled heat exchange element. The calculation results showed that replacing a smooth-walled pipe with a spring-wound channel significantly increases the efficiency of heat exchange equipment. **CONCLUSION.** The significance of the obtained results lies in the possibility of using modern, more efficient and compact heat exchange equipment for technological needs and in the justification of this choice. Thus, with equal initial data, conical heat exchangers are more efficient than cylindrical ones with a heat exchange element in the form of a smooth tube, since they need a smaller heat exchange surface to achieve the necessary thermal and hydrodynamic parameters. The results of calculations prove the prospects of using a conical TA based on a spring-twisted channel and show the need for further study of the influence of the geometric characteristics of both the coil itself and the heat exchange element on the thermal and hydrodynamic characteristics of the proposed HE.

Keywords: heat exchange; hydrodynamics; coil heat exchanger; spring-twisted channel; Ansys Fluent.

For citation: Krutova I.A., Zolotonosov Ya.D. Solution of the conjugate heat exchange problem for conical heat exchangers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (6): 214-226. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-6-214-226.

Введение (Introduction)

Теплообменные аппараты (ТА) широко используются в промышленности, поэтому крайне важно, чтобы они соответствовали современным требованиям. В связи с этим возникают задачи по совершенствованию и модернизации уже существующего парка оборудования, а также по внедрению новых видов теплообменников.

В настоящее время существует множество типов ТА. Независимо от конструкции, функционального назначения и особенностей эксплуатации теплообменного оборудования, к нему предъявляются определенные требования: конструкция ТА должна быть технологичной и надежной на протяжении всего срока службы, обеспечивать проектный уровень тепловой эффективности. Кроме того, конструкция должна отвечать требованиям безопасности при изготовлении и эксплуатации, также быть ремонтпригодной. В конструкции ТА необходимо предусмотреть возможность регулярного технического обслуживания, включающего очистку поверхностей теплообмена и проведение плановых осмотров.

В условиях рыночной экономики и высокой конкуренции на рынке теплообменного оборудования современные ТА должны иметь максимальную производительность при компактных размерах, простоте конструкции и удобстве эксплуатации.

При разработке и конструировании ТА необходимо обеспечить легкий доступ к теплообменным элементам для их осмотра и обслуживания, возможность разборки рабочей части аппарата, но в тоже время герметичность системы и высокие коэффициенты теплопередачи за счет повышения скорости движения рабочей среды при минимальных гидравлических потерях.

На этапе проектирования следует решать вопрос о распределении теплоагентов между трубным и межтрубным пространством, наиболее загрязнённые теплоагенты обычно подаются в проточную часть теплообменного элемента [1].

Подбор конструктивных параметров и режимов работы теплообменника должен быть направлен на минимизацию образования отложений на теплопередающих поверхностях и увеличение межсервисных интервалов.

Теплообменники типа "труба в трубе" демонстрируют высокую эффективность в промышленных применениях. Низкое гидравлическое сопротивление позволяет достигать скоростей теплоносителя до 3 м/с, обеспечивая максимальную теплоотдачу при экономном расходе рабочих сред. Модульная конструкция предоставляет возможности масштабирования теплообменной поверхности добавлением секций [2,3].

Традиционно методы интенсификации теплообмена делятся на две группы: активные и пассивные. Активные методы интенсификации включают в себя как механическое воздействие на поверхность теплообмена, так воздействие на поток полем различной природы, пульсациями давления, изменение расхода теплоносителей. Воздействие на поток формой поверхности теплообмена лежит в основе пассивных методов интенсификации. К таким методам относится применение вставных интенсификаторов, оребрение поверхности теплообмена и др [4]. Но в настоящее время появляются новые методы, например, описанный в работе [5] способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования.

В рамках исследования был создан новый метод идентификации теплообмена, который основан на интеллектуальном управлении характеристиками теплообменников.

Особенностью этого метода является его способность не только поддерживать заданные параметры теплообменника, но и адаптировать управляющие воздействия в зависимости от изменений внешних факторов и режимных характеристик оборудования.

Такой подход позволяет обеспечивать энергоэффективный теплообмен с минимальными затратами, так как не требуется замена теплообменной поверхности или изменение геометрических характеристик оборудования.

Кроме этого, анализ научно-технической литературы показывает, что интенсификация теплообмена происходит за счет закрутки потока, которая усиливает конвективный теплообмен, внося вихрь в объемный поток и разрушая пограничный слой на поверхности теплообменного элемента.

В работе [6] показано, что применение различных по геометрии интенсификаторов в змеевиковых ТА способствует ускорению потока. В случае с кольцевыми и «винтовыми» интенсификаторами ускорение наблюдается по всему сечению. Также в работе был сделан вывод, что кольцевые интенсификаторы они одновременно характеризуются высокой эффективностью и высоким коэффициентом гидравлического сопротивления, что следует учитывать при разработке теплотехнических систем. В целом, использование рассмотренных в работе [6] турбулизаторов приводит к увеличению интенсивности теплообмена с ростом гидравлического сопротивления.

В связи с вышеизложенным представляет научный и практический интерес исследование процессов гидродинамики и теплообмена, происходящих в каналах с изменяющейся поверхностью.

К таким каналам можно отнести разработанный авторами пружинно-витой канал. Он образуется намоткой на цилиндр проволоки круглого сечения, витки которой прочно соединены между собой с помощью лазерной сварки [7]. В работе [8] рассмотрены различные формы теплообменных элементов, созданных на основе пружинно-витых каналов.

В последнее время наблюдается рост количества публикаций, посвященных изучению процессов теплообмена в змеевиковых конических и цилиндрических ТА. Как показывают исследования [9-11], конические ТА демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с цилиндрическими аналогами.

Идея замены цилиндрических змеевиковых ТА на конические заключается в том, что уже на первых витках змеевика температура нагреваемой воды повышается, её кинематическая вязкость снижается и, соответственно, число Рейнольдса возрастает, что приводит к повышению коэффициента теплоотдачи. В связи с этим появляется возможность сокращения площади теплообмена (габаритных размеров теплообменного аппарата). Кроме этого, с уменьшением радиуса осевой винтовой спирали происходит рост кривизны змеевика, что также приводит к росту коэффициента теплоотдачи.

Обобщая всё вышеизложенное, авторы считают, что в настоящее время особый интерес представляют конические змеевиковые ТА типа «труба в трубе». Именно поэтому в данной статье рассматривает характеристики ТА в форме усеченного конуса с внутренней трубой в виде пружинно-витого канала.

Целью настоящего исследования является уточнение значения скоростей и температур в проточной части конического пружинно-витого канала путем его геометрического моделирования и решения сопряженной задачи теплообмена в аппарате.

Научная значимость исследования состоит в разработке методики постановки и решения сопряженной задачи теплообмена, что даст возможность исследовать другие конструкции змеевиковых ТА на базе пружинно-витых каналов.

Для оценки эффективности змеевикового конического ТА на базе пружинно-витого канала, авторы работы предлагают сравнить температуру на выходе для нагреваемого теплоагента для трех различных конфигураций змеевиков: один цилиндрический змеевик с гладкостенным теплообменным элементом и два конических змеевика, один из которых выполнен на основе гладкой трубы, а другой на основе пружинно-витого канала. По результатам сравнения можно будет сделать выводы о том, как форма теплообменного аппарата и теплообменного элемента влияет на процессы гидродинамики и теплообмена.

Для разработки и эффективного использования современных ТА необходимо глубоко исследовать процессы, происходящие в них, а также разработать и внедрить методики для расчёта их характеристик.

Известно, что характеристики конвективного теплообмена в каналах определяются геометрическими параметрами и теплофизическими свойствами материала теплообменных элементов и теплоносителей.

Всю эту взаимосвязь позволяет учесть сопряжённая постановка задач теплообмена, которая предполагает определение температурного поля на стенке и в теплоагентах в результате совместного решения уравнений движения, неразрывности, энергии и теплопроводности. При таком подходе важно определить условия на границе раздела между жидкостью и твёрдым телом, так как они должны быть получены путём решения уравнений распространения тепла в твёрдом теле и жидкости совместно с уравнениями движения, учитывающих форму канала и трёхмерную модель распределения тепла. Для этого на границе между твёрдым телом и жидкостью должны быть заданы условия сопряжения, то есть условия равенства температур и тепловых потоков.

Материалы и методы (Materials and methods)

Решение сопряжённой задачи теплообмена представляет собой комплекс последовательных шагов. Рассмотрим их подробнее.

На первом этапе необходимо определить геометрические параметры змеевика, толщину стенок труб, расстояния между трубами и другие характеристики конструкции, происходит описание и построение 3D модели изучаемого объекта.

В настоящее время, благодаря развитию и применению вычислительной техники, широкое распространение получил аналитический метод описания поверхностей, который позволяет относительно легко анализировать их свойства и количественные физические характеристики, такие как объём, площадь, момент инерции и другие.

Одним из наиболее простых способов создания поверхности является вращение прямой или плоской кривой, вокруг пространственной оси или перемещение объекта, такого как отрезок, кривая или ломаная, вдоль некоторой линии в пространстве. Такие поверхности называются поверхностями вращения и заметающими поверхностями соответственно [8].

Пружинно-витые каналы относятся к нелинейчатым поверхностям, образованным движением непрерывной замкнутой кривой, вдоль некоторой криволинейной направляющей [8]. В данной работе в качестве непрерывной замкнутой кривой выступает окружность, а в качестве криволинейной направляющей – винтовая линия с изменяющимся радиусом изгиба.

Подробно метод математического описания поверхности прямого пружинно-витого канала описан в работах [8,12,13].

В случае конического теплообменного элемента на базе пружинно-витого канала направляющей кривой служит биспирали, расположенная на поверхности круглого конуса с нижним основанием R [13].

Положение точек поверхности можно определить по формуле (1):

$$\vec{r}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + \rho(t, \varphi) (\vec{v}(t) + \vec{\beta}(t)), \quad (1)$$

В рассматриваемом случае поверхность пружинно-витого канала описывается следующей системой уравнений:

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} ((R - bt \cdot \tan \varphi + r \cdot \cos \omega t) \cdot \cos t) \\ ((R - bt \cdot \tan \varphi + r \cdot \cos \omega t) \cdot \sin t) \\ bt + r \cdot \sin \omega t \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n; \quad (2)$$

$$\vec{\rho}(t, \varphi) = r_0 (\cos \varphi \vec{v}(t) + \sin \varphi \vec{\beta}(t)), \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad (3)$$

где R – радиус нижнего основания змеевика, r – средний радиус пружинно-витого канала, r_0 – радиус образующей окружности (провода) пружинно-витого канала, n – число витков двойной винтовой линии, ω – число витков биспирали, приходящихся на один виток центральной винтовой линии змеевика.

Параметрические уравнения поверхности конического змеевикового пружинно-витого канала можно получить, вычисляя единичные векторы касательной, нормали и бинормали по формулам (4) и подставляя полученные выражения в формулу (1),

$$\vec{\tau} = \frac{d\vec{r}/dt}{|d\vec{r}/dt|}, \quad \vec{\nu} = \frac{d\vec{\tau}/dt}{|d\vec{\tau}/dt|}, \quad \vec{\beta} = \vec{\tau} \cdot \vec{\nu}, \quad (4)$$

$$\vec{r}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} ((R - bt \cdot \tan \varphi) + r \cdot \cos \omega t) \cos t \\ ((R - bt \cdot \tan \varphi) + r \cdot \cos \omega t) \sin t \\ bt + r \cdot \sin \omega t \end{pmatrix} + r_0 \cos \varphi \cdot \vec{\nu}(t) + r_0 \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t), \quad (5)$$

С целью проверки соответствия уравнения (5) геометрии рассматриваемого змеевикового пружинно-витого канала построена поверхность в SpaceClaim, (рис. 1).

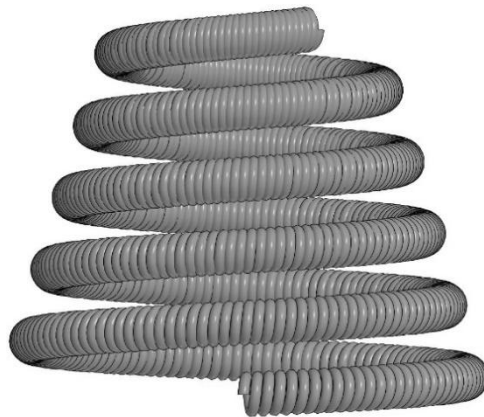


Рис. 1. Модель конического змеевикового пружинно-витого канала, построенная в SpaceClaim

Fig. 1. A model of a conical coil spring-twisted channel built in SpaceClaim

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

Внешний вид исследуемого ТА показан на рисунке 2 и представляет собой конический аппарат с коаксиально установленными змеевиковыми трубами. При этом внутренняя труба выполнена в виде пружинно - витого канала круглого сечения, а внешняя - из гладкой трубы.

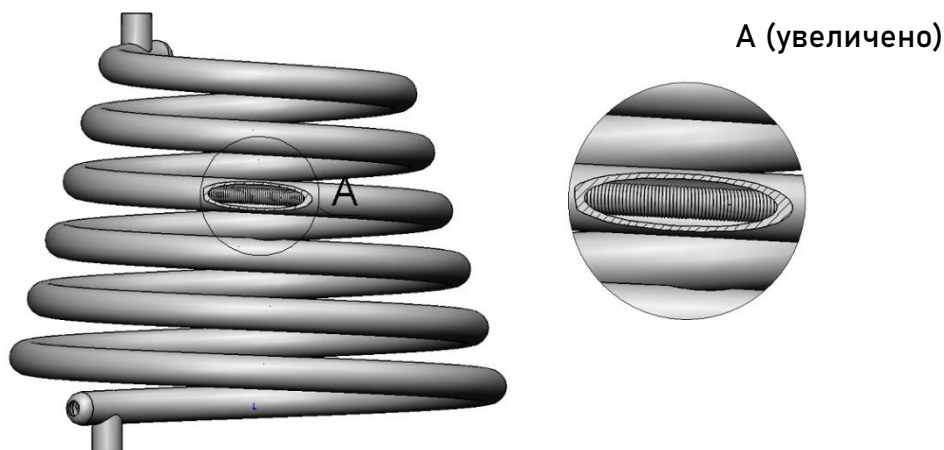


Рис. 2. Конический змеевиковый аппарат с теплообменным элементом в виде пружинно-витого канала

Fig. 2. A coil apparatus of the "pipe in a pipe" type, made on a cone with a heat exchange element in the form of a spring-twisted channel

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

Конический змеевиковый теплообменник работает следующим образом: при противоточной схеме движения нагреваемый теплоагент поступает в трубное пространство, одновременно в межтрубное пространство подается греющий теплоагент.

При такой схеме движения теплоагенты (жидкость) движутся по сложным траекториям. Во-первых, по виткам проточной части теплообменного элемента, где реализуется закрученное течение жидкости по впадинам пружинно-витого канала, и, во-

вторых, по винтовой линии с изменяющимся радиусом изгиба, определяемой геометрией самого змеевика [2].

Греющий теплоноситель, подаваемый в межтрубное пространство, из-за внешнего винтового оребрения теплообменного элемента также совершает закрученное движение, характеризующее сложной трехмерной вихревой структурой потока, что благоприятно влияет на теплообменные процессы, протекающие в межтрубном пространстве, и снижает скорость солеотложения.

Благодаря наличию поперечных составляющих скорости – тангенциальной и радиальной, усиливается конвективный перенос импульса, энергии, изменяется вихревая структура внутренних закрученных потоков, что является предпосылкой для интенсификации теплообмена.

На следующем этапе происходит математическое описание процессов гидродинамики и теплообмена: задаются уравнения движения, неразрывности, энергии, а также определяются граничные условия.

Теплообменный элемент представляет собой пружинно-витой канал с однородной, непроницаемой стенкой переменной толщины δ , постоянным коэффициентом теплопроводности λ .

В начальном сечении теплообменного элемента профиль осевой скорости прямолинейный: $V_z = u_0$ (u_0 – начальная скорость). Скорости в радиальном и тангенциальном направлении в этом сечении равны нулю.

На стенках канала выполняются условия прилипания жидкости. С учётом особенностей геометрии канала принимаем компоненту $V_y = 0$. Тогда в уравнениях движения и энергии компоненты, содержащие функцию V_z и производные от этой функции равны нулю.

Чтобы задача была сформулированной необходимо уравнения движения дополнить системой краевых условий.

Граничные условия для заданной задачи следующие:

– на входе в канал: для скорости $V|_{x=0} = V_0$, для температуры жидкости $T_{ж} = T_0 = 5^\circ\text{C}$, для температуры стенки $T_c = T_0$;

– на всех боковых поверхностях задаются условия прилипания:

$$v = 0; T_{ж} = T_{ст}; \lambda \frac{\partial t_{ж}}{\partial n} = \lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial n},$$

где n – нормаль к стенке;

$$\lambda_c \frac{\partial t_c}{\partial n} = \alpha_{ж} (t_{ж} - t_c),$$

где $t_{ж}$ – температура жидкого теплоносителя.

Имеет место равенство тепловых потоков от стенки канала и омывающей его жидкости.

В рамках современных исследований, представленных в работе [13], была предложена математическая модель сопряжённой задачи теплообмена, разработанная на основе полных уравнений движения, неразрывности, энергии и теплопроводности стенки.

Данная модель, основанная на дифференциальных уравнениях, позволила провести анализ сложной тепло-гидродинамической обстановки и процесса теплообмена в змеевиковых аппаратах с изменяющимся радиусом изгиба винтовой трубы.

Для оценки эффективности применения рассматриваемого ТА предлагается провести оценку его работы в сравнении с коническим и цилиндрическим ТА на базе гладкостенной трубы. Благодаря этому будут проверены сразу две гипотезы: применение конического змеевикового теплообменного аппарата эффективнее цилиндрического, замена гладкостенной трубы на пружинно-витой канал повышает эффективность работы теплообменного аппарата.

Геометрические размеры конических ТА полностью совпадают, цилиндрический ТА берется диаметром равным диаметру нижнего основания конического ТА, шаг между витками остается таким же, высота ТА определяется исходя из равенства площади теплообмена цилиндрического и конического ТА с теплообменными элементами в виде гладких труб (рис. 3).

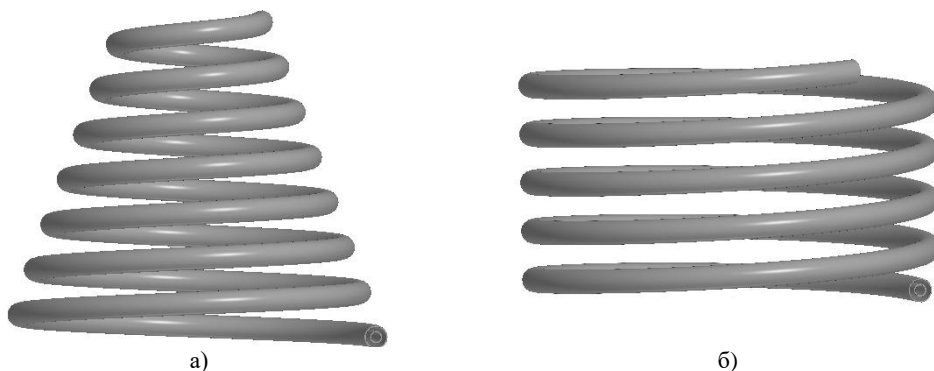


Рис. 3. 3D модели змеевиковых гладкостенных ТА типа «труба в трубе»: а) конический, б) цилиндрический

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

В рамках настоящего исследования численная реализация сопряженной задачи теплообмена производилась в программе Ansys Fluent. Для расчета были предварительно заданы следующие характеристики:

– геометрические размеры ТА представлены в таблице 1;

Таблица 1
Table 1

Геометрические размеры теплообменных аппаратов
Geometrical parameters of heat exchangers

№	Параметр	Цилиндрический ТА с гладкостенной трубой	Конический ТА с гладкостенной трубой	Конический ТА с пружинно-витым каналом
1	Число витков	4,8	7	7
2	Внутренний диаметр теплообменного элемента, мм	15	15	15
3	Внутренний диаметр трубы внешнего змеевика, мм	32	32	32
4	Шаг змеевика, мм	70	70	70
5	Диаметр нижнего основания, мм	600	600	600
6	Диаметр верхнего основания, мм	600	248	248
7	Высота теплообменника, мм	372	526	526
8	Толщина стенок внешнего змеевика, мм	3	3	3
9	Толщина стенок теплообменного элемента, мм	2	2	-
10	Диаметр проволоки пружинно-витого канала, мм	-	-	2
11	Средний диаметр пружинно-витого канала, мм	-	-	17

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

– параметры теплоносителей идентичны для всех вариантов рассматриваемых ТА и указаны в таблице 2;

Таблица 2
Table 2

Параметры горячего и холодного теплоносителя
Hot and cold coolant parameters

№	Параметр	Значение
1	Температура горячей воды на входе, °C	70
2	Температура холодной воды на входе, °C	5
3	Расход горячей воды, кг/час	803
4	Расход холодной воды, кг/час	400

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

Расчетная сетка для модели строилась гексаэдрическая для твердых тел и тетраэдрическая для жидкостей с использованием программы Ansys Meshing с измельчением на границах между телами.

На рисунке 4 представлена расчетные сетки, использованные в работе при моделировании змеевиковых теплообменников.

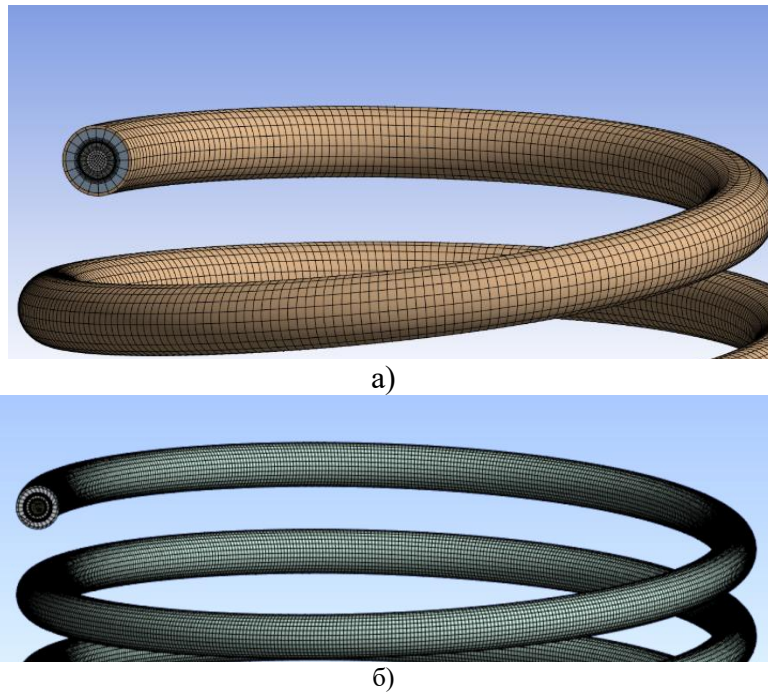


Рис. 4. Расчетная сетка а) для модели конического змеевикового теплообменника б) для модели цилиндрического змеевикового теплообменника

Fig. 4. Calculation grid a) for the model of a conical coil heat exchanger b) for the cylindrical coil heat exchanger model

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

Для решения поставленной задачи был выбран решатель Pressure-Based, подключено уравнение энергии, задавалась модель турбулентности k- ω SST, на стенках задавалось условие прилипания, алгоритм численного решения SIMPLEC.

Результаты (Results)

Исследование заключалось в решении стационарной задачи для разных геометрических моделей змеевикового теплообменника. В таблице 3 представлены полученные результаты.

Таблица 3
Table 3

Результаты расчетов
Calculation results

Форма теплообменного аппарата	Цилиндрический на базе гладкостенной трубы	Конический на базе гладкостенной трубы	Конический на базе пружинно-витого канала
Температура греющей воды на выходе, °C	47,5	45,8	39,8
Температура нагреваемой воды на выходе, °C	48,1	49,8	58,6
Скорость в трубном пространстве, м/с	0,64	0,64	0,66
Скорость в межтрубном пространстве, м/с	0,43	0,43	0,45

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

В таблице 3 представлены средние по сечению значения температур греющего и нагреваемого теплоносителей на входе и выходе из ТА.

Адекватность полученных результатов подтверждается результатами расчета теплового баланса.

Также в таблице 3 представлены средние значения скоростей нагреваемого и греющего теплоагента для всех трех вариантов ТА.

По данным таблицы наиболее эффективным вариантом ТА для исходных данных является конический змеевиковый ТА на базе пружинно-витого канала. Температура нагреваемого теплоагента на выходе для данного варианта на 10°C выше, чем для вариантов с гладкой трубой. Если отдельно рассматривать варианты гладкостенных ТА, то разница температур нагреваемого теплоагента на выходе в коническом и цилиндрическом ТА составляет 1,7°C. Данный результат подтверждает, что конические ТА эффективнее

цилиндрических, но также требует проведения отдельных исследований по определению диапазонов оптимальных характеристик конических ТА.

Кроме сравнения конечных результатов расчета интерес представляет анализ изменения температуры по длине теплообменного элемента. Чтобы отследить скорость изменения температуры по длине канала были получены средние значения температур в нескольких сечениях и построены графики, рисунок 5.

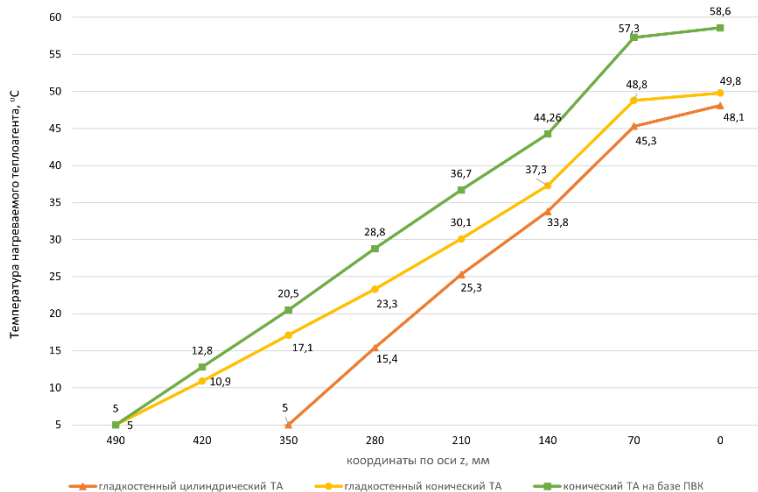


Рис. 5. Распределение температуры нагреваемого теплоносителя по длине змеевика *Fig. 5. Temperature distribution of the heated coolant along the length of the coil*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

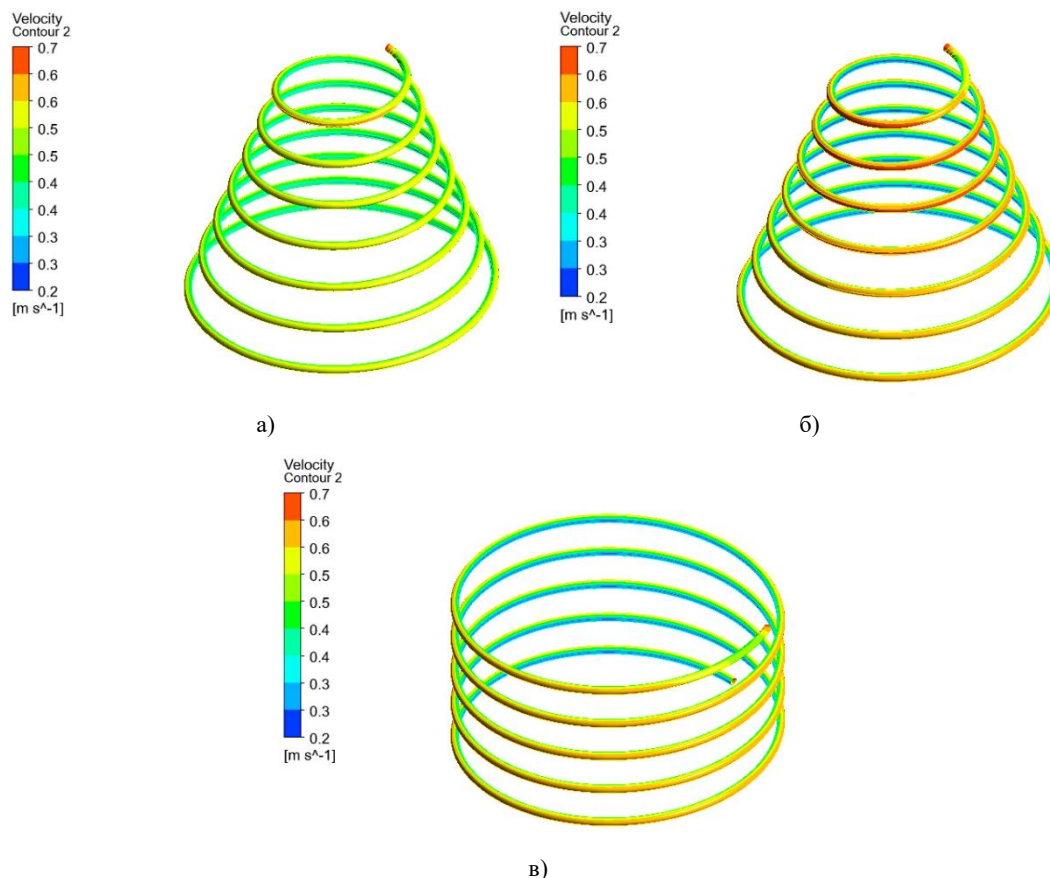


Рис. 6. Распределение скорости потоков по длине змеевика: а) конический ТА на базе пружинно-витого канала, б) конический ТА на базе гладкостенной трубы, в) цилиндрический ТА на базе гладкостенной трубы *Fig. 6. Distribution of the flow velocity along the length of the coil: a) conical HE on the basis of a spring-twisted channel, б) conical HE on the basis of a smooth-walled pipe, в) cylindrical HE on the basis of a smooth-walled pipe*
 *Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На графиках рисунка 5 показана динамика изменения температуры по длине канала, так как нагреваемый теплоагент подается в трубное пространство со стороны верхнего основания, то и начальная координата по оси z указана 490 (ось трубного пространства), далее теплоагент движется вниз по змеевику, соответственно координата z уменьшается до 0. Цилиндрический теплообменный аппарат по высоте ниже, поэтому его график начинается с координаты 350. По графикам видно, что на первых витках угол наклона цилиндрического ТА и конического ТА на базе ПВК практически одинаков, но на предпоследнем витке у конических ТА происходит резкий рост температуры, в то время как для цилиндрического ТА скорость прироста температуры не изменяется. Исходя из этого можно сделать вывод, что изменение диаметра последних двух витков оказало значительное влияние на процесс теплообмена.

Это предположение доказывают и данные рисунка 6, на котором видно, что скорость на внутренней части змеевика потока для гладкой трубы меньше, чем в других частях теплообменных элементов. Это обусловлено центробежной силой, возникающей при течении [15]. Также стоит отметить, что для пружинно-витого канала распределение температуры между внутренней и внешней стороной змеевика более равномерна, что может свидетельствовать о более интенсивном перемешивании.

Движение теплоносителей в криволинейной траектории змеевика создает неравномерные центробежные силы по сечению канала [8,9]. Максимальные значения центробежных сил наблюдаются во внешней части змеевика при пиковых скоростях потока. Влияние центробежного эффекта уменьшается к центру змеевика пропорционально снижению скорости теплоносителя. Неравномерное распределение сил формирует поперечную вторичную циркуляцию в сечении змеевикового канала [10]. Вторичная циркуляция проявляется независимо от режима течения - ламинарного или турбулентного.

Поперечная циркуляция значительно усиливает энергообмен между ядром потока и ламинарным подслоем возле стенки канала, вызывая резкий рост гидравлического сопротивления. Повышенный нагрев периферийной части приводит к изменению плотности теплоносителя. Центральные слои с большей плотностью вытесняют нагретые периферийные массы, формируя устойчивую циркуляцию.

Распределение скоростей в цилиндрическом теплообменном аппарате (ТА) остается постоянным на всех витках. Скорость потока в конических ТА увеличивается на внешней части змеевика при уменьшении диаметра, что подтверждается экспериментальными данными.

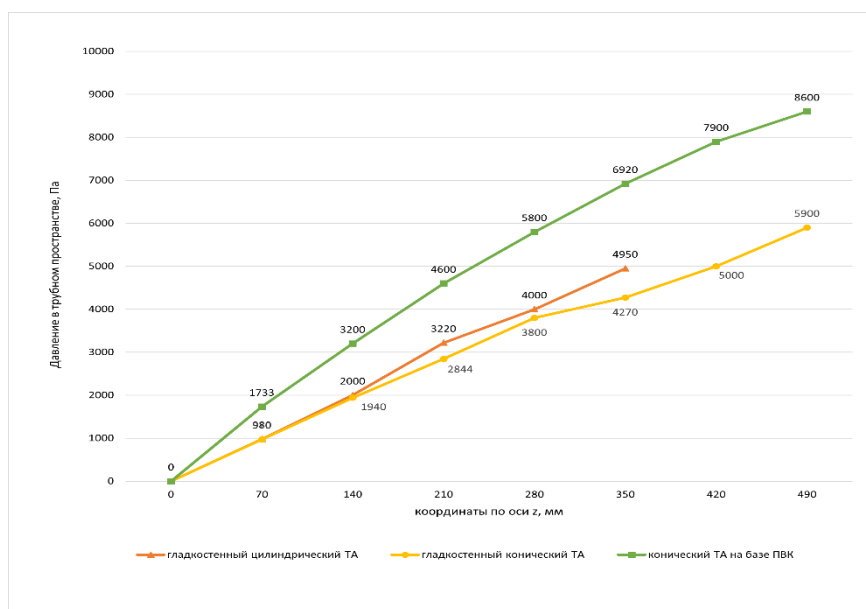


Рис. 7. Сравнение распределения давления по длине каналов разной конфигурации
 *Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Графики давлений, (рис. 7), показывают минимальный градиент давления по потоку в цилиндрическом ТА с гладкими трубами из-за наименьшей высоты и максимального диаметра змеевика. Конический ТА с пружинно-витым каналом демонстрирует наибольший перепад давления. Увеличение кривизны змеевика оказывает влияние на рост перепада давления в проточной части канала.

Заключение (Conclusions)

В данной работе был использован численный метод для моделирования стационарного режима теплопередачи и гидродинамики нагреваемого теплоагента в трубном пространстве змеевиковых цилиндрического и конических теплообменных аппаратов. В качестве модели турбулентности была выбрана модель $k-\omega$ SST.

Было установлено, что в змеевиковом теплообменном аппарате типа «труб в трубе» в форме усеченного конуса на базе пружинно-витого канала с геометрическими параметрами, указанными в таблице 1, возможно нагреть воду от 5 до 58,6 °С при подаче в межтрубное пространство горячего теплоносителя с начальной температурой 70 °С. При аналогичных параметрах в случае установки гладкой трубы нагреть холодный теплоноситель удалось лишь до 49,8 °С, в цилиндрическом теплообменнике нагреваемый теплоагент на выходе имеет температуру 48,1 °С. Очевидно, что замена гладкой трубы на пружинно-витой канал является перспективным направлением. Разница температур нагреваемого теплоагента на выходе из теплообменных аппаратов на базе гладких труб требует дополнительного изучения влияния геометрических параметров змеевика на теплообменные процессы.

Также было установлено, что распределение скорости по сечению теплообменного элемента наиболее равномерно при применении пружинно-витого канала, что свидетельствует о наличии поперечной циркуляции в канале. Благодаря возникающей поперечной циркуляции фактическая скорость жидкости в изогнутой трубе значительно превышает среднюю скорость осевого потока, это приводит к существенному росту обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, как следствие, к резкому увеличению гидравлического сопротивления.

Данный факт подтверждается результатами расчета перепада давления по длине теплообменного элемента. Наибольшим перепадом давления характеризуется конический ТА на базе пружинно-витого канала, показавший наилучшие результаты по нагреву холодного теплоагента.

Результаты расчетов доказывают перспективность применения конического ТА на базе пружинно-витого канала и показывают необходимость дальнейшего изучения вопросов влияния геометрических характеристик как самого змеевика, так и теплообменного элемента на теплогидродинамические характеристики предлагаемых ТА.

Литература

1. Производство промышленного оборудования от Торговая марка ТРАКОН [Электронный ресурс] // Теплообменное оборудование: URL: <https://www.tracon.ru/katalog-oborudovaniya/teplobmennoe-oborudovanie> (дата обращения 13.11.2024).
2. Крутова И. А., Золотоносов Я. Д. Компьютерное моделирование гидродинамики и теплообмена в конических змеевиковых теплообменниках типа «труба в трубе» // Известия КГАСУ. 2020. № 3 (53). С. 65–73.
3. Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т. 2 / С 74 Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 352 с.: ил.
4. Попов, И. А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: [монография] / И. А. Попов, Х. М. Махьянов, В. М. Гуреев; М-во образования и науки Российской Федерации, Казанский гос. технический ун-т им. А. Н. Туполева, ООО "Упр. компания "КЭР-Холдинг"; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. — Казань: Центр инновационных технологий, 2009. — 559 с. : ил., табл., цв. ил. : 21 см — (Интенсификация теплообмена).; ISBN 978-5-93962-383-4.
5. Гильфанов К.Х., Шакиров Р.А. Гайнуллин Р.Н., Коннов Ф.В. Способ интенсификации теплообмена на основе интеллектуального управления режимными характеристиками теплообменного оборудования // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 91-102.
6. Муравьев А.В., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Ильин В.К. Исследование теплогидравлических характеристик криволинейного канала с кольцевыми турбулизаторами // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 102-116.
7. Патент № 62694 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотоносов А.Я., № 2006143517/22, 2006.12.07; опубл. 07.12.2006, Бюл. № 5.
8. Золотоносов, Я. Д. Трубчатые теплообменники. Моделирование, расчет: монография / Я. Д. Золотоносов, А. Г. Багоудинова, А. Я. Золотоносов. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 272 с. — ISBN 978-5-8114-3411-4.
9. M. A. Radwan, M. R. Salem, H. A. Refaey and M. A. Moawed.: Experimental study on convective heat transfer and pressure drop of water flow inside conically coiled tube-in-tube heat exchanger. Engineering Research Journal (ERJ). 2019, vol. 1, №39, pp. 86-93.
10. Sheeba, A., Akhil, R., Prakash, J.: Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger. International Journal of Refrigeration, 110, 268-276 (2020).
11. Khurana, Hitesh & Majumdar, Rudrodip & Saha, Sandip. (2021). Numerical investigation on the performance of the helical and conical coil heat exchanger configurations in the dynamic mode of heat extraction. 10.1063/5.0134122.
12. Багоудинова А. Г., Вачагина Е. К., Золотоносов Я. Д. Математическое моделирование

поверхностей теплообмена пружинно-витых каналов // Известия КазГАСУ. 2017. №3 (41).].

13. Iraida Krutova and Yakov Zolotonosov Geometric modeling of coil heat exchanger based on spring-twisted channel, издательство: Springer Science and Business Media Deutschland Gm, Берн, За рубежом, номер: 169, 2021, 194-202 с.

14. Вачагина Е.К. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали / Вачагина Е.К., Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Князева И.А. // Вестник Казанского технологического университета. –2015. – № 16. –С. 234-238.

15. A Correction Factor-Based General Thermal Resistance Formula for Heat Exchanger Design and Performance Analysis / Ju. Hao, Q. Chen, X. Li, T. Zhao // Journal of Thermal Science. – 2021. – Vol. 30, No. 3. – P. 892-901. – DOI 10.1007/s11630-021-1369-8. – EDN NRFZNO.

Авторы публикации

Крутova Ираида Александровна – аспирант Казанского государственного архитектурно-строительного университета. ORCID *: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. e-mail: iraida_knyazeva@mail.ru.

Золотоносов Яков Давидович – д-р. техн. наук, профессор Казанского государственного архитектурно-строительного университета. ORCID *: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. e-mail: zolotonosov@mail.ru.

References

1. Production of industrial equipment from TRAKON trademark [Electronic resource] // Heat exchange equipment: URL: <https://www.tracon.ru/katalog-oborudovaniya/teploobmennoe-oborudovanie> (date of circulation 13.11.2024).

2. Krutova I. A., Zolotonosov Ya. D. Computer modeling of hydrodynamics and heat transfer in conical coil heat exchangers of the "pipe in a pipe" type // Izvestiya KGASU. 2020. No. 3 (53). pp. 65-73.

3. Handbook of heat exchangers: In 2 vols. T. 2 / С 74 Trans. from English. edited by O. G. Martynenko et al. — М.: Energoatomizdat, 1987.— 352 p.: ill.

4. Popov, I. A. Physical foundations and industrial application of heat transfer intensification: [monograph] / I. A. Popov, H. M. Makhyanov, V. M. Gureev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Kazan State Technical University named after A. N. Tupolev, LLC "Upr. company "CARE-Holding"; under the general editorship of Yu. F. Gortyshov. — Kazan: Center for Innovative Technologies, 2009. — 559 p.: ill., table., color. ill. : 21 cm — (Intensification of heat transfer); ISBN 978-5-93962-383-4.

5. Gilfanov K.H., Shakirov R.A. Gainullin R.N., Konnov F.V. Method of heat transfer intensification based on intelligent control of the operating characteristics of heat exchange equipment // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2022. Vol. 14. No.4 (56). pp. 91-102.

6. Muravyov A.V., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Ilyin V.K. Investigation of thermohydraulic characteristics of a curved channel with annular turbulators // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2024. Vol. 16. No. 1 (61). pp. 102-116.

7. Patent No. 62694 for the floor. mod. RF. Heat exchange element / Zolotonosov A.Ya., No. 2006143517/22, 2006.12.07; publ. 07.12.2006, Bul. No. 5.

8. Zolotonosov, Ya. D. Tubular heat exchangers. Modeling, calculation: monograph / Ya. D. Zolotonosov, A. G. Bagoutdinova, A. Ya. Zolotonosov. — St. Petersburg: Lan, 2022. — 272 p. — ISBN 978-5-8114-3411-4.

9. M. A. Radwan, M. R. Salem, H. A. Refaey and M. A. Moawed.: Experimental study on convective heat transfer and pressure drop of water flow inside conically coiled tube-in-tube heat exchanger. Engineering Research Journal (ERJ). 2019, vol. 1, №39, pp. 86-93.

10. Sheeba, A., Akhil, R., Prakash, J.: Heat Transfer and Flow Characteristics of a Conical Coil Heat Exchanger. International Journal of Refrigeration, 110, 268-276 (2020).

11. Khurana, Hitesh & Majumdar, Rudrodip & Saha, Sandip. (2021). Numerical investigation on the performance of the helical and conical coil heat exchanger configurations in the dynamic mode of heat extraction. 10.1063/5.0134122.

12. Bagoutdinova A. G., Vachagina E. K., Zolotonosov Ya. D. Mathematical modeling of heat transfer surfaces of spring-twisted channels // Izvestiya KazGASU. 2017. №3 (41).].

13. I. Krutova and Ya. Zolotonosov Geometric modeling of coil heat exchanger based on spring-twisted channel, publisher: Springer Science and Business Media Deutschland Gm, Bern, Abroad, number: 169, 2021, 194-202 p.

14. Vachagina E.K. The conjugate problem of heat transfer during the flow of liquids in coils with a varying bending radius of a helical spiral / Vachagina E.K., Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Knyazeva I.A. // Bulletin of the Kazan Technological University. -2015. – No. 16. –pp. 234-238.

15. A Correction Factor-Based General Thermal Resistance Formula for Heat Exchanger Design and Performance Analysis / Ju. Hao, Q. Chen, X. Li, T. Zhao // Journal of Thermal Science. – 2021. – Vol. 30, No. 3. – P. 892-901. – DOI 10.1007/s11630-021-1369-8. – EDN NRFZNO.

Authors of the publication

Iraida A. Krutova – Kazan State University of Architecture and Engineering. ORCID *: <https://orcid.org/0000-0001-9485-3116>. e-mail: iraida_knyazeva@mail.ru.

Yakov D. Zolotonosov –Kazan State University of Architecture and Engineering. ORCID *: <https://orcid.org/0000-0002-1773-8605>. e-mail: zolotonosov@mail.ru.

Шифр научной специальности: 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника

Получено **14.11.2024 г.**

Отредактировано **22.11.2024 г.**

Принято **29.11.2024 г.**

ВДОХНОВЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ: Открытие Energynet.Lab в КГЭУ



Современное общество стремительно развивается, и к инженерным профессиям предъявляются новые требования. Важнейшим аспектом подготовки будущих специалистов становится необходимость комплексных знаний, охватывающих не только технические, но и культурные аспекты. На этом фоне открытие лаборатории Energynet.Lab в Казанском государственном энергетическом университете приобретает особое значение.

На торжественной церемонии открытия, состоявшейся в рамках деловой программы саммита БРИКС, министр энергетики Российской Федерации Сергей Цивилев подчеркнул важность интеграции современных технологий в образовательный процесс. Лаборатория, созданная в сотрудничестве с ведущими отечественными компаниями, такими как «Гаврида электрик» и АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет», стала уникальной площадкой, где студенты могут не только изучать технологии, но и углубляться в исторические и культурные знания.

Сергей Цивилев отметил, что культурный код гражданина России служит защитой от деструктивного влияния извне. «Инженер сегодня должен быть глубоко образованным человеком, знающим не только технические аспекты, но и основы истории и культуры. Лаборатория Energynet.Lab — это пространство, где можно помочь студентам освоить современные технологии и при этом уделить внимание историческому контексту», — добавил министр.

Energynet.LAB в КГЭУ стала пятой по счету образовательной лабораторией, открытой в рамках реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» с 2021 года.

Она направлена на создание условий для технологического лидерства российских компаний на новых рынках электроэнергетики и включает в себя развитие цифровых технологий и трансформацию энергетической инфраструктуры. Лаборатория Energynet.Lab является научно-образовательным хабом, который не только учит современным практикам, но и создает комфортную среду для работы и обучения студентов.

Безусловно, открытие лаборатории в Казанском государственном энергетическом университете — это не просто новое учреждение, а важный шаг в развитии энергетического образования России. Оно открывает горизонты для новых знаний, технологий и практик, подготавливая студентов к реалиям современного рынка труда. Успехи данной инициативы станут залогом будущего нашей энергетической системы, основанной на высококвалифицированных кадрах и их глубоких знаниях как в области технологий, так и в сфере культуры.

Energynet.Lab — это не просто лаборатория, а пространство, где рождаются идеи, формируются специалисты и укрепляется энергетическая независимость страны.

Сдано в набор 15.12.2024 г.
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 500 экз.

Подписано к печати 26.12.2024 г.
Усл. печ. л. 18,3
Заказ № 5313
Дата выхода в свет 30.12.2024 г.

Формат 60*90/8
Уч.изд. л. 11,62.
Цена свободная

