

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



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

ISSN 1998-9903

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

*Научно-технический
и производственный журнал*

(24) 5 / 2022

POWER ENGINEERING:
RESEARCH, EQUIPMENT,
TECHNOLOGY

Scientific & Technical Journal

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

2022
Т.24, № 5
Сентябрь-Октябрь
ISSN 1998-9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

УЧРЕДИТЕЛИ:

Казанский государственный энергетический университет

ИЗДАТЕЛЬ:

Казанский государственный энергетический университет

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

В журнале публикуются работы, соответствующие группе специальностей 05.14.00 – «Энергетика», 05.09.00 – «Электротехника», 05.11.00 – «Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы».

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ИВШИН И.В.	БРЯКИН И.В.	ЯКИМОВ Н.Д.
КАСИМОВ В.А.	СУСЛОВ К.В.	ІЛІУА К.ІЛІЕВ
ГОЛЕНИЦЕВ-КУТУЗОВ В.А.	ФЕДОТОВ А.И.	НИКОЛАЕВА Л.А.
ДОВГУН В.П.	ЗВЕРЕВА Э.Р.	КАЛАЙДА М.Л.
ГРАЧЕВА Е.И.	ЩИННИКОВ П.А.	БОРИСОВ А.В.
ИЛЮШИН П.В.	МИНГАЛЕЕВА Г.Р.	АНДРЕЕВ В.П.
САФИН А.Р.	ВАНЬКОВ Ю.В.	КОРНИЛОВ В.Ю.
МЕЩЕРЯКОВ В.Н.	АРАКЕЛЯН Э.К.	КОЗЕЛКОВ О.В.
STANIMIR VALTCHEV	ПАВЛОВ Г.И.	
RENTIUC RADU DUMITRU	ДМИТРИЕВ А.В.	
KOLCUN MICHAEL	БОРУШ О.В.	
БОЧКАРЕВ И.В.	ЛАПТЕВ А.Г.	

Свидетельство о регистрации СМИ:

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) – ПИ № ФС77-82947 от 31.03.2022 г.

PROCEEDINGS OF THE HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS.
ENERGY SECTOR PROBLEMS

SCIENTIFIC &
TECHNICAL JOURNAL

2022
Vol. 24, № 5
September-October
ISSN 1998–9903 (Print)
ISSN 2658-5456 (Online)

**Founder: Kazan State Power Engineering University and the Ministry of
Education of the Russian Federation**

Publisher: Kazan State Power Engineering University
Editor-in-Chief: EDWARD Yu. ABDULLAZYANOV

Second Editor in Chief: PIETRO ZUNINO

The journal covers fundamental and applied research, as well as discussion issues on power engineering and related industries and science.

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

Sections:

POWER ENGINEERING
ELECTRIC ENGINEERING
THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING
METHODS AND DEVICES FOR MONITORING, DIAGNOSTICS OF MATERIALS,
PRODUCTS, SUBSTANCES AND NATURAL ENVIRONMENT
ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS
TECHNOSPHERE SAFETY IN ENERGY

Editorial board:

IGOR V. IVSHIN	IGOR V. BOCHKAREV	OLESYA V. BORUSH
VASIL A. KASIMOV	IVAN V. BRYAKIN	ANATOLIY G. LAPTEV
ALEXANDR V. GOLENISHEV- KUTUZOV	KONSTANTIN V. SUSLOV	GRIGORIY I. PAVLOV
VALERY P. DOVGUN	ALEXANDR I. FEDOTOV	ILIYA K. ILIEV
ELENA I. GRACHEVA	ELVIRA R. ZVEREVA	ION V. ION
PAVEL V. ILYUSHIN	PAVEL A. SHINNIKOV	LARISA A. NIKOLAEVA
ALFRED R. SAFIN	GUZEL R. MINGALEEVA	MARINA L. KALAJDA
VIKTOR N. MESHERYAKOV	YURYI V. VANKOV	ANDREY V. BORISOV
STANIMIR VALTCHEV	EDIK K. ARAKELIAN	VICTOR P. ANDREEV
PENTIUC RADU DUMITRU	ANDREY V. DMITRYEV	VLADIMIR YU. KORNILOV
MICHAIL KOLCUN		OLEG V. KOZELKOV

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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ЗИНУРОВ В.Э., БИККУЛОВ Р.Я., ДМИТРИЕВ А.В., ДМИТРИЕВА О.С., НИКОЛАЕВ А.Н. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах.	3
ЮРОВСКАЯ В.Д., ЛАТУШКИНА С.В. Проект использования низкопотенциальных источников энергии на Братской ГЭС.	13
ЧИЧИРОВА Н.Д., ЧИЧИРОВ А.А., ВЛАСОВА А.Ю., ОРЛОВ А.А. Анализ отложений в трубках пароперегревателей на угольных ТЭЦ методом Фурье ИК-спектроскопии.	23
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.	35

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

ВИНОГРАДОВ А.В., ЛАНСБЕРГ А.А. Анализ парка и оценка коммутационного ресурса выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети центр»-«Орелэнерго».	61
САФИН А.Р., КОЗЫРЕВ А.Б., ПЕТРОВ Т.И., НИЗАМИЕВ М.Ф., БАСЕНКО В.Р., ЛЯМЗИНА Д.Ю. Определение параметров катушек индуктивности устройства индукционного зарядного для бесконтактного способа зарядки электротранспорта.	74
ЛЕВИН В.М., ГУЖОВ Н.П. Предиктивная оценка рисков прерывания электроснабжения потребителей нефтедобычи с учетом изменения значимых факторов. ...	84
НИЗАМИЕВ М.Ф., БАСЕНКО В.Р., ИВШИН И.В., ВЛАДИМИРОВ О.В. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров.	97
БРАГИН И.Ю., ПАНТЕЛЕЕВА Л.А., ПОКОЕВ П.Н. ГРАЧЕВА Е.И. Влияние ферромагнитной пасты на изоляционные свойства трансформаторного масла.	110

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

БЕЛОВ О.А., ФЕДОРОВ О.В. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле.	120
--	-----

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ЖУЙКОВ А.В., МАТЮШЕНКО А.И., КУЛАГИН В.А., ЛОГИНОВ Д.А. Особенности горения твердотопливной смеси на основе углей разной степени метаморфизма регионов Енисейской Сибири.	136
--	-----

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

БЛИНОВ А.О., БОРИСОВ А.В., КОНЧИНА Л.В., КУЛИКОВА М.Г., МАСЛОВА К.С. Проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стрессовыми механическими и электромеханическими системами.	147
--	-----

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

САФИУЛЛИН Б.Р., КОЗЕЛКОВА В.О., КАШАЕВ Р.С., КОЗЕЛКОВ О.В. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов.	166
ФЕДЮХИН А.В., ДРОНОВ С.А., СЕМИН Д.В., ГУСЕНКО А.Г., ПАНАРИН В.Э. Разработка лабораторного стенда воздухо-аккумулирующей электростанции.	179

C O N T E N T S

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

ZINUROV VE, BIKKULOV RJA, DMITRIEV AV, DMITRIEVA OS, NIKOLAEV AN. Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination in the paint booths.	3
YUROVSKAYA VD, LATUSHKINA SV. Project of using low-potential energy sources at the Bratsk hydro power plant.	13
CHICHIROVA ND, CHICHIROV AA, VLASOVA AY, ORLOV AA. Analysis of deposits in superheater tubes at coal-fired thermal power plants by Fourier ir spectroscopy.	23
MAZANOV SV, ZARIPOV ZI, GUMEROV FM, USMANOV RA, SHAPOVALOV YUA. Biodiesel fuel. Part II. Thermophysical properties of systems participated in the process of obtaining biodiesel fuel using working media in the supercritical fluid state.	35

ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS

VINOGRADOV AV, LANSBERG AA. Analysis of the fleet and evaluation of the switching resource of 10 kV switches of the branch of PJSC «Rosseti center»-«Orelenergo».	61
SAFIN AR, KOZYREV AB, PETROV TI, NIZAMIEV MF, BASENKO VR, LYAMZINA DYU. Technical and economic justification for application of a soft start system for high-voltage electric motors of pumping units.	74
LEVIN VM, GUZHOV NP. Predictive risks assessment of power supply interruption to oil production consumers, taking into account changes in significant factors.	84
NIZAMIEV MF, BASENKO VR, IVSHIN IV, VLADIMIROV OV, KHUSNUTDINOV AN, ANDREEV NK. Diagnosis of transformers of electrical complexes using non-contact laser vibrometers.	97
BRAGIN IY, PANTELEEVA LA, POKOEV PN, GRACHEVA EI. Effect of ferromagnetic paste on insulating properties of transformer oil.	110

ELECTRICITY

BELOV OA, FEDOROV OV. Analysis of the structure of generating capacity and dynamics of electricity consumption in sredne-kamchatsky isolated power hub.	120
--	-----

THEORETICAL AND APPLIED HEAT ENGINEERING

ZHUIKOV AV, MATYUSHENKO AI, KULAGIN VA, LOGINOV DA. Research of combustion of solid fuel mixture based on coals of different degrees of metamorphism in the regions of Yenisei Siberia.	136
--	-----

ROBOTS, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

BLINOV AO, BORISOV AV, KONCHINA LV, KULIKOVA MG, MASLOVA KS. Issues emerging in human musculoskeletal system simulation with mechanical and electromechanical rod structures.	147
--	-----

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

SAFIULLIN BR, KOZELKOVA VO, KASHAEV RS, KOZELKOV OV. Refining of the oil from asphaltene-resins and paraffins.	166
FEDYUKHIN AV, DRONOV SA, SEMIN DV, GUSENKO AG, PANARIN VE. Development of laboratory unit of compressed air energy storage.	179

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 697.9 / ОЗ9

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ФИЛЬТРАХ ГРУБОЙ И ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ В ОКРАСОЧНЫХ КАМЕРАХ

Зинуров В.Э.¹, Биккулов Р.Я.¹, Дмитриев А.В.¹, Дмитриева О.С.², Николаев А.Н.²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи проводились экспериментальные исследования. Для исключения погрешностей во время исследований, вызванных браком или иными причинами, использовалось по 3 образца каждого из фильтров грубой и тонкой очистки (чистого и отработанного). Для определения расчетной скорости была собрана экспериментальная установка, представленная в работе, включающая в себя воздухопровод, вентилятор для нагнетания воздуха, патрубок для измерения избыточного давления перед исследуемым фильтром, отверстие для сброса воздуха, образцы фильтров, вентиляционную решетку и измерительные приборы – дифференциальный манометр testo 510i, анемометр testo 405i. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, проанализировано изменение перепада давления в воздухопроводе при использовании отработанных и чистых фильтров грубой и тонкой очистки. Показано, что увеличение их эксплуатационного срока службы возможно с использованием мультивихревого сепаратора, который может быть установлен в качестве предварительной ступени очистки. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Расчетная скорость газового потока при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с. Расчетная скорость газового потока при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с. Сравнение различия перепада давления в воздухопроводе при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени запыленному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в запыленном потоке на предприятии с окрасочными камерами представляет собой относительно крупные частицы. Гидравлическое сопротивление увеличивается в 1,58 раза.

Ключевые слова: фильтр тонкой очистки; фильтр грубой очистки; мультивихревой сепаратор; окрасочные камеры; твердые мелкодисперсные частицы.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП – 3577.2022.1.

Для цитирования: Зинуров В.Э., Биккулов Р.Я., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.

DETERMINATION OF THE DESIGN VELOCITY OF THE GAS FLOW IN COARSE AND FINE FILTERS WITH VARYING DEGREES OF CONTAMINATION IN THE PAINT BOOTHS

VE. Zinurov¹, RJa. Bikkulov¹, AV. Dmitriev¹, OS. Dmitrieva², AN. Nikolaev²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1380-4433>, vadd_93@mail.ru

Abstract: *OBJECT.* Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination. *METHODS.* We carried experimental studies out to solve the problem. To exclude errors during the studies caused by marriage or other reasons, 3 samples of each of the coarse and fine filters (clean and used) were used. To determine the design speed, an experimental installation was assembled, presented in the work, which included an air duct, an air injection fan, a nozzle for measuring excess pressure in front of the filter under study, an air vent hole, filter samples, a ventilation grate and measuring instruments – a differential pressure gauge testo 510i and an anemometer testo 405i. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, analyzes the change in the pressure drop in the duct when using spent and clean coarse and fine filters. They showed that an increase in their operational life is possible with the use of a multi-vortex separator, which can be installed as a preliminary stage of purification. *CONCLUSION.* The estimated gas flow velocity when using coarse filters is only 2 m/s. The estimated gas flow velocity when using fine filters is only 0.5 m/s. A comparison of the difference in the pressure drop in the duct when using coarse and fine (spent and clean) filters shows that coarse filters are more susceptible to dusty flow, i.e. the bulk of particles in the dusty flow at an enterprise with paint chambers are relatively large particles. Hydraulic resistance increases by 1.58 times.

Keywords: fine filter; coarse filter; multi-vortex separator; paint chambers; fine solid particles.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation to young scientists and postgraduates SP–3577.2022.1.

For citation: Zinurov VE, Bikkulov RJa, Dmitriev AV, Dmitrieva OS, Nikolaev AN. Determination of the design velocity of the gas flow in coarse and fine filters with varying degrees of contamination in the paint booths. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(5):3-12. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-3-12.

Введение. Литературный обзор

Производство автомобилей является сложным процессом, включающим в себя множество объектов, процессов и источников первичной (топливо и электричество) и вторичной (пар, сжатый воздух, охлажденная и горячая вода) энергии. Причем самым энергоемким процессом является стадия окраски (от 48 до 60%) [1], поскольку системы управления воздухом, подающие воздух в покрасочные камеры, потребляют больше всего энергии. Эти системы имеют решающее значение для контроля температуры и влажности, в которых они обеспечивают качество окраски конечного продукта, предотвращая появления дефектов краски и, таким образом, избегая дополнительных затрат на переработку, а также для обеспечения производительности труда работников за счет поддержания оптимальных микроклиматических условий [2]. Большие объемы воздуха, необходимые для покрасочных камер, рабочих площадок и печей, требуют использования электричества для работы вентиляторов, в то время как дизельное топливо в основном используется для нагрева воздуха как для покрасочной камеры, так и для работы печи [3]. Потребление энергии при подаче воздуха в покрасочную камеру в пределах требуемого технологией диапазона температуры и влажности также зависит от типа краски, на водной основе или на основе растворителей. Именно от этих параметров зависит конечный результат окрашивания, устранение нежелательных дефектов на покрытии изделия при испарении краски после ее нанесения [4].

Причем современными производителями предлагается множество вариантов исполнения покрасочных камер, определяющую роль в выборе играют такие факторы как –

цели использования производством, особенности климата, место расположения, технические параметры, обслуживание специализированного оборудования камеры, подбор фильтрующих материалов. За очистку воздуха от ненужных примесей отвечают воздушные фильтры, которые бывают различной конфигурации и имеют разный срок замены. График обслуживания окрасочной камеры следует выстраивать исходя из интенсивности использования объекта. Частая замена воздушных фильтров окупится при полной загрузке камеры. В противном случае, делать это можно несколько реже. Для экономии средств, фильтры грубой очистки можно продувать и использовать повторно, но делать это рекомендуется не более раза. Фильтры тонкой очистки и вовсе не подлежат восстановлению [5].

Традиционная автомобильная краска, как правило, состоит из четырех химических ингредиентов: носителя, смолы, добавок и пигментов [1, 6]. Основными вредоносными соединениями, помимо летучих органических веществ, для здоровья человека являются пигменты, содержащие тяжелые металлические соединения (свинец, ртуть, мышьяк, кадмий и др.) [7, 8]. Поскольку большая часть распыляемой краски содержит опасные соединения и потенциально легко воспламеняется, необходимо, проявляя особую осторожность, своевременно и правильно утилизировать фильтры после использования в соответствии с экологическими требованиями во избежание нанесения вреда окружающей среде. Также не стоит забывать, что около 80-90% выбросов при производстве автомобилей приходится на стадию покраски [9], приводящей к образованию различных видов отходов. В частности, нанесение красок путем распыления является основным источником лакокрасочных шламов, летучих органических веществ, твердых и жидких отходов, которые относятся к 3 классу опасности [10].

Из-за большого количества добавленных химических веществ шлам отходов не подлежит восстановлению, представляет значительный риск для окружающей среды и обычно отправляется на свалки опасных отходов или сжигается. Влияние загрязнения почвы на биоразнообразие в случае безответственной утилизации неопределимо [1, 11].

Учитывая вышесказанное, на предприятия возлагаются обязательства по мониторингу и снижению воздействия отходов производства на окружающую среду, сбору, систематизации и систематическому анализу данных об их экологических характеристиках. Это влияет на экономические затраты предприятия, являясь дополнительной проблемой к закупке дорогостоящих фильтрующих элементов. При этом не прекращаются поиски технических решений, позволяющих решить указанную проблему, с целью повышения энергоэффективности и экологичности процесса, снижения физического износа фильтров, а значит и продления срока их службы, что подтверждает актуальность выбранного исследования.

Несмотря на большое количество исследований в этой области такими учеными как *K.A. Nystrom, J. Sheppard* по способам восстановления фильтров окрасочной камеры путем их нагрева в печи для удаления летучих материалов, *R. Thelen*, *P. Фаскиев* по срокам замены фильтров при общем падении давления, *R. Joseph, M. Powell*, по использованию рециркуляции в системах вентиляции, *Ю. Папко, A. Giampieri* по рекуперации удаляемого воздуха из окрасочной камеры, *А. Зиганшин, В. Посохин, Д. Милоевич* по подаче воздуха только в «активные модули» камеры, где происходит окраска изделия, решение проблемы создания энергоэффективных систем вентиляции окрасочных камер с целью обеспечения требуемого воздухообмена в соответствии с санитарными нормами, всё еще представляет большую сложность [2, 3, 5, 7, 12]. В настоящей работе предлагается определить расчетную скорость потока воздуха в фильтрах грубой и тонкой очистки окрасочной камеры при разной степени загрязненности фильтров. При несвоевременной замене фильтров, они становятся существенным препятствием на пути воздуха из окрасочной камеры, что приводит к увеличению давления в камере и сокращению воздухообмена, создавая различные аэродинамические сопротивления и нагрузку на электродвигатели вентиляционной системы.

Анализ современного состояния проблемы.

Научная новизна работы состоит в получении обобщенных зависимостей по перепаду давления в воздуховоде окрасочной камеры от скорости воздуха при использовании разных фильтров. Практическая значимость и новизна результатов исследования заключается в том, что разработана конструкция мультивихревого сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц из потока воздуха, результаты исследований его работы могут быть использованы для решения задач экономии средств на оплату электроэнергии, закупку, а также монтаж фильтров грубой и тонкой очистки

при эксплуатации системы вентиляции окрасочной камеры.

Постановка задачи исследования

Актуальной задачей является увеличение эксплуатационного срока службы фильтров грубой и тонкой очистки, что позволит снизить экономические издержки на их закупку и монтаж, который сопровождается вынужденной остановкой окрасочных камер, и прочих работ, осуществляемых в целях поддержания системы кондиционирования окрасочных камер в рабочем состоянии и снижения экологической нагрузки. Для решения данной задачи авторами работы в ранее опубликованной работе [13] была предложена конструкция мультивихревого сепаратора (рис. 1). Устройство предлагается использовать перед фильтрами, что продлит их эксплуатационный ресурс.

Сепарацию частиц из потока в мультивихревом сепараторе можно описать следующим образом. Запыленный газовый поток поступает во внутреннюю часть сепарационных элементов 4 мультивихревого сепаратора через прорези квадратной формы в основании 2. Далее поток газа постепенно проходит через прямоугольные прорези 5 и попадает в область между сепарационными элементами 4. При этом каждая струя газа при прохождении через прямоугольную прорезь 5 разделяется на две равные части, каждая из которых движется в противоположную относительно друг друга сторону, образуя два вихря маленького диаметра, что позволяет получить центробежные силы высоких значений, достаточных для выбивания из потока частиц размером менее 10 мкм. Круглые отверстия 6, сделанные в съемной крышке 3, способствуют упорядоченности вихревой структуры. При вращении множества маленьких вихрей частицы выбиваются из потока и попадают на поверхность стенок мультивихревого сепаратора, прилипая к ним. В работах [14, 15] представлена конструкция сепаратора «труба в трубе», разработанная по аналогичному принципу вращения вихрей. Однако их вращение происходит в межтрубном пространстве. Для окрасочных камер сепаратор был конструктивно изменен для удобства его интеграции в их производственные площадки.

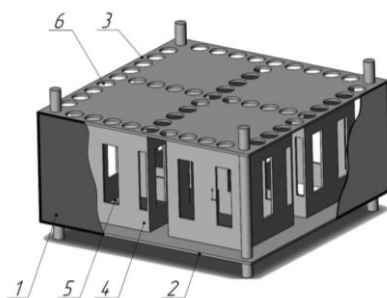


Рис. 1. Трехмерная модель мультивихревого сепаратора: 1 – обечайка устройства; 2 – основание устройства; 3 – съемная крышка; 4 – сепарационные элементы; 5 – прямоугольные прорези; 6 – круглые отверстия.

Fig. 1. Three-dimensional model of the multivortex separator: 1 - the shell of the device; 2 - the base of the device; 3 - a removable cover; 4 - separation elements; 5 - rectangular slots; 6 - circular holes.

Важной задачей является проведение множества исследований для доработки и усовершенствования мультивихревого сепаратора, причем необходимо определить расчетную скорость газового потока при соответствующем перепаде давления при использовании фильтров грубой и тонкой очистки в окрасочных камерах с учетом степени их загрязненности.

Целью данной работы является определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности.

Материалы и методы

В качестве предмета исследования использовались две различные марки напольных фильтров, применяемых в окрасочной камере предприятия ООО «КАМАТЕК», для удаления твердых загрязнений (рис. 2, а и с). Улавливание из загрязненного потока воздуха наиболее крупных частиц проводилось фильтрами грубой очистки – *Volz filter MRGrun3-20-75 Paint stop G3*. Плотность данного фильтра составляет 220-240 г/м², класс фильтрации – G3, что соответствует эффективности улавливания твердых частиц размером более 0,4 мкм равной 70-80% и менее 0,4 мкм равной 20-35%. Толщина каждого фильтра грубой очистки составляет 70 мм, рабочая температура – 180°C (рис. 2, а). После фильтров грубой очистки запыленный поток поступал в фильтры тонкой очистки – *Zauber Air* серии 500M. Они изготавливаются из термически скрепленного полиэфирного

волокна и обработаны специальным составом, который практически исключает отрыв мелкодисперсных частиц от поверхности фильтра. Высокая прочность данных фильтров обеспечивается удерживающей сеткой, расположенной с тыльной стороны. Класс фильтрации F5, плотность составляет 380 г/м², удерживающая способность – 99%, термостойкость до 100°C, влагостойкость до 100% относительной влажности, толщина материала составляет 22 мм. Производителями фильтров тонкой очистки отмечается, что срок службы в среднем составляет 1200–1500 часов работы, при условии своевременной замены фильтров грубой очистки.

Для исследований были подготовлены образцы чистых и отработанных фильтров (рис. 2) грубой и тонкой очистки, которые были использованы в ходе промышленных испытаний на предприятии ООО «КАМАТЕК» в окрасочной линии поточного типа.

Для исключения погрешностей во время исследований, вызванных браком или иными причинами, использовалось по три образца каждого из фильтров грубой и тонкой очистки (чистого и отработанного). Таким образом, общее количество, задействованных в исследованиях образцов фильтров, составило 12 шт. Диаметр каждого образца был равен 100±1 мм.

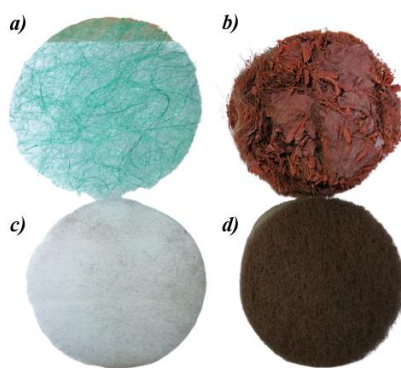


Рис. 2. Фильтры тонкой и грубой очистки до и после эксплуатационного периода: а – чистый фильтр грубой очистки; б – отработанный фильтр грубой очистки; с – чистый фильтр тонкой очистки; d – отработанный фильтр тонкой очистки

Fig.2. Fine and coarse filters before and after the operating period: a - clean coarse filter; b - coarse waste filter; c - clean fine filter; d - fine waste filter

Для определения расчетной скорости была собрана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3. Она включала в себя вентилятор, который был вставлен в воздуховод 1, патрубок для измерения давления 2 перед исследуемым образцом фильтра в воздуховоде 1, отверстие для сброса воздуха 3, вентиляционную решетку 4, дифференциальный манометр testo 510i 5, который подсоединялся к патрубку 2 и анемометр testo 405i (на рис. 3 не показан). В ходе проведения экспериментов отверстие для сброса воздуха 3 частично перекрывалось или полностью открывалось, что позволяло осуществлять сброс воздуха в окружающую среду. Таким образом, была получена более широкая выборка значений скорости газа и перепада давления в воздуховоде.

Методика проведения экспериментов была следующей. Воздух нагнетался с помощью вентилятора, двигаясь по воздуховоду 1, проходил через исследуемый образец фильтра, установленный перед вентиляционной решеткой 4, и через нее выходил в окружающую среду. Скорость воздуха варьировалась переключением нескольких режимов работы вентилятора и открытием отверстия для сброса воздуха 3. Числовые значения перепада давления измерялись дифференциальным манометром 5 в режиме реального времени и передавались на персональный компьютер. Также в режиме реального времени измерялась скорость газового потока в воздуховоде с помощью анемометра testo 405i (рис. 3).

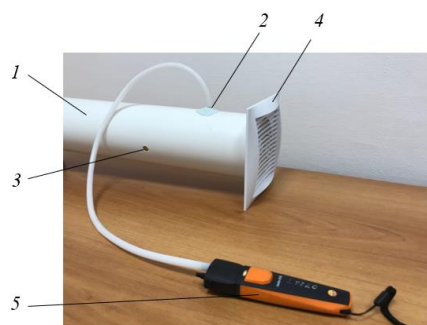


Рис. 3. Основная часть экспериментальной установки для проведения исследований фильтров грубой и тонкой очистки: 1 – воздуховод; 2 – патрубок для измерения избыточного давления перед исследуемым фильтром; 3 – отверстие для сброса воздуха; 4 – вентиляционная решетка; 5 – дифференциальный манометр testo 510i.

Fig. 3. Main part of the experimental facility for the examination of coarse and fine filters: 1 - duct; 2 - pipe for the measurement of excess pressure before the tested filter; 3 - air discharge hole; 4 - ventilation grating; 5 - differential pressure gauge testo 510i.

Как известно, производители фильтров дают рекомендации по их замене на основе показаний манометра для контроля состояния перепада давления [16]. Если фильтр оказывается забитым, перепад давления на нем увеличивается, что приведет к уменьшению давления в окрасочной камере. При обработке экспериментальных данных перепад давления в воздуховоде определялся в режиме реального времени дифференциальным манометром testo 510i по следующему выражению:

$$\Delta p = p_5 - p_0,$$

где p_5 – избыточное давление в воздуховоде, Па; p_0 – атмосферное давление окружающей среды, Па.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований показали, что с увеличением скорости потока воздуха повышается перепад давления в воздуховоде при использовании исследуемых образцов фильтров грубой и тонкой очистки (чистых и отработанных), а именно при использовании отработанных фильтров грубой очистки перепад давления в воздуховоде был больше в среднем в 3,24 раза относительно чистых фильтров грубой очистки. При этом скорость воздуха варьировалась от 0,05 до 5,7 и 0,05 до 16,54 м/с при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки соответственно, для обоих случаев применялись все режимы работы вентилятора (рис. 4). При использовании отработанных фильтров тонкой очистки перепад давления в воздуховоде был больше в среднем в 1,33 раза относительно чистых фильтров грубой очистки (рис. 5). Можно отметить, что сравнение перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени загрязненному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в потоке воздуховода окрасочных камер представляет собой относительно крупные частицы. В таком случае, применение мультивихревого сепаратора может существенно продлить остаточный срок службы фильтров.

В ходе проведения расчетов было установлено, что расчетная скорость воздуха при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с, т.к. рекомендуемый перепад давления при их замене составляет около 400 Па (рис. 4). Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с, т.к. рекомендуемый перепад давления при их замене составляет около 450 Па (рис. 5).

С одной стороны, анализ результатов измерения перепада давления в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров тонкой очистки свидетельствует о незначительном увеличении гидравлического сопротивления при их загрязнении. С другой стороны, это объясняется наличием специального состава, нанесенного на чистые фильтры тонкой очистки, состав которого не раскрывается в коммерческих целях. Как отмечалось ранее, он позволяет практически исключить отрыв мелкодисперсных частиц от поверхности фильтра. Стоит отметить, что при адгезии (прилипанию) твердых частиц к поверхности фильтра происходит частичная замена специального состава и частиц. При попадании частиц на поверхность фильтра нанесенный структурный слой специального состава частично разрушается, и некоторая его часть улетучивается и уносится газом

(рис. 5).

Перепад давления в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки составляет в среднем 1597 и 493 Па соответственно (рис. 4, а). Можно отметить, что значение перепада давления при использовании трех образцов чистых фильтров грубой очистки, которые были вырезаны из различных мест единого фильтра практически не отличается, что свидетельствует о его целостности и однородности. При этом анализ перепада давления в воздуховоде при использовании трех образцов отработанных фильтров грубой очистки показывает, что в различных местах единого фильтра перепад давления различается, что свидетельствует о различной степени загрязненности образцов и об неоднородном распределении концентрации твердых частиц в газовом потоке по сечению воздуховода (рис. 4, а). Рисунок 4, б наиболее наглядно демонстрирует значения перепада давления до 1000 Па в воздуховоде при использовании отработанных и чистых фильтров грубой очистки.

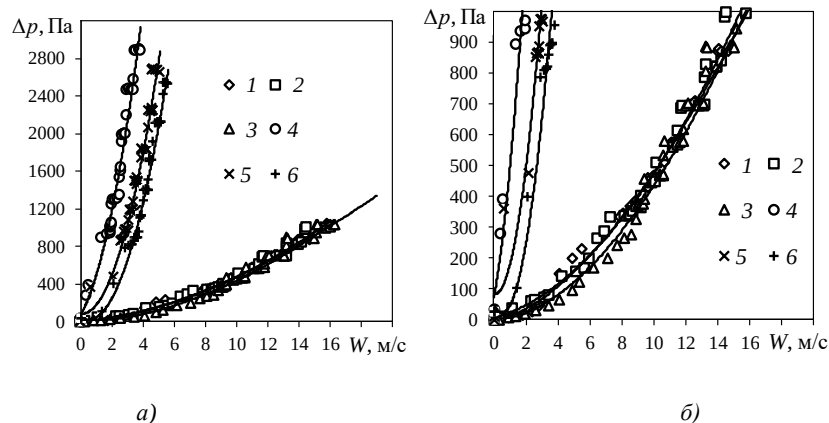


Рис. 4. Изменение перепада давления в воздуховоде (а) до 3200 Па; б) до 1000 Па) от скорости воздуха в зависимости от образца используемого чистого или грязного фильтра грубой очистки: 1 – чистый фильтр № 1; 2 – чистый фильтр № 2; 3 – чистый фильтр № 3; 4 – грязный фильтр № 1; 5 – грязный фильтр № 2; 6 – грязный фильтр № 3.

Fig. 4. Change of pressure difference in duct (a) to 3200 Pa; b) to 1000 Pa) from air speed depending on the sample of the clean or dirty rough filter used: 1 - clean filter 1; 2 - clean filter 2; 3 - clean filter 3; 4 - dirty filter 1; 5 - dirty filter 2; 6 - dirty filter 3.

При использовании отработанных и чистых фильтров тонкой очистки происходит мгновенный рост перепада давления в воздуховоде при относительно низких скоростях воздуха до 0,5–1 м/с. После чего перепад давления увеличивается с ростом скорости потока воздуха практически монотонно. При этом перепад давления в воздуховоде при использовании 3 образцов отработанных и чистых фильтров грубой очистки составляет в среднем 1420 Па и 1066 Па соответственно (рис. 5).

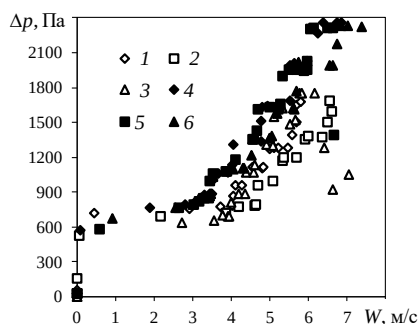


Рис. 5. Изменение перепада давления в воздуховоде от скорости газового потока в зависимости от образца используемого чистого или отработанного фильтра тонкой очистки: 1 – чистый фильтр № 1; 2 – чистый фильтр № 2; 3 – чистый фильтр № 3; 4 – отработанный фильтр № 1; 5 – отработанный фильтр № 2; 6 – отработанный фильтр № 3

Fig. 5. Variation of the pressure difference in the duct from the gas flow rate depending on the sample of the clean or waste fine filter used: 1 - clean filter 1; 2 - clean filter 2; 3 - clean filter 3; 4 - waste filter 1; 5 - waste filter 2; 6 - waste filter 3

Таким образом, проведенные исследования показали, что процесс увеличения перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких фильтров очистки является в большей степени различным, т.к. в первом случае, грубые фильтры очистки забиваются твердыми частицами и увеличивается их гидравлическое сопротивление, во втором случае, тонкие фильтры очистки имеют в своем составе специальный состав, что обеспечивает частичную замену в структуре данного состава на адгезированных на поверхности фильтра твердых мелкодисперсных частиц, что приводит к незначительному увеличению их гидравлического сопротивления относительно фильтров грубой очистки. Также были установлены числовые значения диапазонов расчетных скоростей для фильтров грубой и тонкой очистки, что позволяет в перспективе провести численные и экспериментальные исследования и разработать инженерную методику для мультивихревого сепаратора, которые интенсифицируют эффективность улавливания твердых частиц из воздуха мультивихревым сепаратором в окрасочных камерах перед дорогостоящими фильтрами и позволит продлить их эксплуатационный срок службы.

Выводы

На основе проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров грубой очистки составляет не более 2 м/с.
2. Расчетная скорость воздуха при использовании фильтров тонкой очистки составляет не более 0,5 м/с.
3. Сравнение различия перепада давления в воздуховоде при использовании грубых и тонких (отработанных и чистых) фильтров показывает, что в большей степени запыленному потоку подвержены фильтры грубой очистки, т.е. основная доля частиц в запыленном потоке на предприятии с окрасочными камерами представляет собой относительно крупные частицы. Гидравлическое сопротивление увеличивается в 1,58 раза.
4. Мультивихревой сепаратор может быть использован с целью снижения экономических издержек при обслуживании камер и увеличения эксплуатационного срока службы фильтров. На основе данных по изменению перепада давления в воздуховоде будет исключена вероятность не рекомендованных режимов работы окрасочной камеры.

Литература

1. Rivera J.L., Reyes-Carrillo T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 115. pp. 75–87.
2. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., et al. A techno-economic evaluation of low-grade excess heat recovery and liquid desiccant-based temperature and humidity control in automotive paint shops // *Energy Conversion and Management*. 2022. V. 261. pp. 115654.
3. Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., et al. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective // *Applied Energy*. 2020. V. 261. pp. 114074.
4. Боровик Д.А. Эволюция и будущее технологий автомобильной покраски // *Молодой ученый*. 2020. № 32(322). С. 18–22.
5. Фаскиев Р.С. Мониторинг режимов вентиляции окрасочно-сушильных камер для ремонтной покраски автомобилей // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2014. № 10(171). С. 206–212.
6. Патрушева Т.Н., Чурбакова О.В., Петров С.К., и др. Методы защиты персонала и окружающей среды при нанесении лаков и красок // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. № 9-1. С. 20–24.
7. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths // *Metal Finishing*. 2007. V. 105, N7-8. pp. 82–84.
8. Осипова Л.Э., Осипов Э.В. К расчету вытяжной эжекционной системы вентиляции окрасочной камеры // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 2(40). С. 190–197.
9. Mohtashami R., Shang J.Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 218. pp. 335–346.
10. Ruffino B., Farina A., Dalmazzo D., et al. Cost analysis and environmental assessment of recycling paint sludge in asphalt pavements // *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. V. 28, N19. pp. 24628–24638.
11. Быков Е.А., Муранов В.А. Проблемы переработки и обезвреживания отходов,

образующихся при производстве и потреблении лакокрасочных материалов // Лакокрасочные материалы и их применение. 1991. № 3. С. 37–39.

12. Зиганшин А.М., Сафиуллин Р.Г., Посохин В.Н. О вентиляции окрасочно-сушильных камер. Сообщение 1 // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2016. № 4 (19). С. 84–93.

13. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., и др. Очистка воздушных потоков от мелкодисперсных частиц в окрасочных камерах // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 10–14. – DOI 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14.

14. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., и др. Оценка времени работы сепарационного устройства с элементами квадратной формы при очистке запыленного потока покрасочной камеры // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 1. С. 32–35.

15. Зинуров В.Э., Мадышев И.Н., Ивахненко А.Р., и др. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 205–211.

16. Гавриленков А.М., Бредихин Л.С., Сафаралиев Р.Р. Совершенствование конструкции узла очистки воздуха, удаляемого из окрасочной камеры // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1-1 (6). С. 76–78.

Авторы публикации

Зинуров Вадим Эдуардович – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Биккулов Рустем Ядкарович – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриев Андрей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

Дмитриева Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Николаев Андрей Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

References

1. Rivera J.L., Reyes-Carrillo T. A life cycle assessment framework for the evaluation of automobile paint shops. *Journal of Cleaner Production*, 2016;115:75–87. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.027

2. Giampieri A., Ma Z., Ling-Chin J., et al. A techno-economic evaluation of low-grade excess heat recovery and liquid desiccant-based temperature and humidity control in automotive paint shops. *Energy Conversion and Management*, 2022;261:115654. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115654

3. Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., et al. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*, 2020;261:114074. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114074

4. Borovik D.A. Evolyutsiya i budushchee tekhnologii avtomobil'noi pokraski. *Molodoi uchenyi*. 2020;322(32):18–22.

5. Faskiev R.S. Monitoring rezhimov ventilyatsii okrasochno-sushil'nykh kamer dlya remontnoi okraski avtomobilei. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014;171(10):206–212.

6. Patrusheva T.N., Churbakova O.V., Petrov S.K., et al. Metody zashchity personala i okruzhayushchei sredy pri nanesenii lakov i krasok. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016; 9-1: 20–24.

7. Joseph R. Ventilation and paint filtration requirements for spray booths. *Metal*

Finishing, 2007;105(7-8):82–84. doi: 10.1016/S0026-0576(07)80185-1.

8. Osipova L.E., Osipov E.V. K raschetu vytyazhnoi ezheksionnoi sistemy ventilyatsii okrasochnoi kamery. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017;40(2):190–197.

9. Mohtashami R., Shang J.Q. Treatment of automotive paint wastewater in continuous-flow electroflotation reactor. *Journal of Cleaner Production*. 2019;218:335–346. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.326.

10. Ruffino B., Farina A., Dalmazzo D., et al. Cost analysis and environmental assessment of recycling paint sludge in asphalt pavements. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021;28(19):24628–24638. doi: 10.1007/s11356-020-10037-2

11. Bykov E.A., Muranov V.A. Problemy pererabotki i obezvrezhivaniya otkhodov, obrazuyushchikhsya pri proizvodstve i potreblenii lakokrasochnykh materialov. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*. 1991;(3):37–39.

12. Ziganshin A.M., Safiullin R.G., Posokhin V.N. O ventilyatsii okrasochno-sushil'nykh kamer. Soobshchenie 1. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2016;19(4):84–93. doi: 10.21285/2227-2917-2016-4-89-93

13. Bikkulov R., Dmitrieva O., Dmitriev A., et al. Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths. *Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(12):10–14. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-10-14

14. Bikkulov R.Ya., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V., et al. Otsenka vremeni raboty separatsionnogo ustroystva s elementami kvadratnoi formy pri oчитке запыленного потока покрасочной камеры. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2022;25(1):32–35.

15. Zinurov V.E., Madyshev I.N., Ivakhnenko A.R., et al. Razrabotka klassifikatora s soosno raspolzhenymi trubami dlya razdeleniya sypuchego materiala na osnove silikagelya. *Polzunovskii vestnik*. 2021;(2):205–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.029

16. Gavrilentov A.M., Bredikhin L.S., Safaraliev R.R. Sovershenstvovanie konstruktssii uzla oчитки vozdukha, udalyaemogo iz okrasochnoi kamery. *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoi oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychainykh situatsii*. 2015;6(1-1):76–78.

Authors of the publication

Vadim E. Zinurov – Assistant of the Department «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Rustem Ja. Bikkulov – Assistant of the Department «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Andrey V. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of «Theoretical Foundations of Heat Engineering» of Kazan State Power Engineering University Kazan, Russia.

Oksana S. Dmitrieva – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department «Food Production Equipment» of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Andrey N. Nikolaev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Department «Food Production Equipment» of Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

Получено

01.08.2022г.

Отредактировано

16.08.2022г.

Принято

23.08.2022г.

ПРОЕКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА БРАТСКОЙ ГЭС

Юровская В.Д., Латушкина С.В.

Братский государственный университет, г. Братск, Россия

valeriya.yurovskaya@mail.ru, latushkinasv@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Повышение энергоэффективности работы гидроэлектростанции (ГЭС). Определение объемов теряемой тепловой энергии от оборудования ГЭС. Разработка вариантов по полезному использованию низкопотенциального тепла. Экономическая оценка предложенных вариантов. Выбор наиболее подходящего варианта использования сбросного тепла. МЕТОДЫ. В работе использованы методы теории теплообмена, термодинамического анализа, технико-экономических расчетов в энергетике. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье были определены температуры теплоносителей в системе охлаждения гидрогенератора Братской ГЭС. Рассчитаны тепловые потери в размере 92,52 МВт. Подложены 3 варианта теплоснабжения объектов Братской ГЭС. Разработана оптимизированная схема теплогенерации с использованием теплонасосной установки (ТНУ). Проведен технико-экономический анализ предложенных вариантов теплоснабжения. Проведен анализ российского рынка ТНУ. Выбран к реализации экономически выгодный вариант теплоснабжения с 2 ТНУ Viessmann Vitocal 350-G Pro с объемом капиталовложений 34,46 млн руб. и сроком окупаемости 7,3 года. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты технико-экономических расчетов показывают целесообразность внедрения ТНУ в систему теплогенерации Братской ГЭС.

Ключевые слова: низкопотенциальная энергия; гидроэлектростанция; система охлаждения; теплонасосная установка; система теплоснабжения; сбросное тепло.

Для цитирования: Юровская В.Д., Латушкина С.В. Проект использования низкопотенциальных источников энергии на Братской ГЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 13-22. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-13-22.

PROJECT OF USING LOW-POTENTIAL ENERGY SOURCES AT THE BRATSK HYDRO POWER PLANT

VD. Yurovskaya, SV. Latushkina

Bratsk State University, Bratsk, Russia

valeriya.yurovskaya@mail.ru, latushkinasv@yandex.ru

Abstract: THE PURPOSE. Improving the energy efficiency of a hydroelectric power plant (HPP). Determination of the volume of lost thermal energy from HPP equipment. Development of options for the beneficial use of low-grade heat. Economic evaluation of the proposed options. Selection of the most appropriate waste heat utilization option. METHODS. The methods of the theory of heat and mass transfer, thermodynamic analysis, technical and economic calculations in the energy sector are used in the work. RESULTS. The article determined the temperatures of heat carriers in the cooling system of the hydroelectric generator of the Bratsk HPP. Calculated heat losses in the amount of 92,52 MW. 3 variants of heat supply for the facilities of the Bratsk HPP have been laid. An optimized scheme of heat generation using a heat pump installation (HPI) has been developed. A feasibility study of the proposed options for heat supply has been carried out. An analysis of the Russian HPI market was carried out. A cost-effective heat supply option with 2 Viessmann Vitocal 350-G Pro HPI was selected for implementation with a capital investment 34,46 million of RUB and a payback period of 7,3 years. CONCLUSION. The results of technical and economic calculations show the feasibility of introducing a HPI into the heat generation system of the Bratsk HPP.

Keywords: *low-potential energy; hydroelectric power plant; cooling system; heat pump installation; heating system; waste heat.*

For citation: Yurovskaya VD, Latushkina SV. Project of using low-potential energy sources at the Bratsk hydro power plant. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):13-22. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-13-22.

Введение и литературный обзор

Среди важнейших факторов современного развития мировой экономики в настоящее время следует назвать ограниченность мировых запасов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и постоянно растущие темпы их потребления. Во многих зарубежных странах приоритетным направлением государственной политики стало повышение энергоэффективности.

Энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) России превышает на 46% мировой уровень, на 44% уровень США и на 62% европейский уровень. В период 2015-2018 гг. существенным фактором в сдерживании роста данного показателя для нашей страны выступало повышение эффективности промышленных предприятий за счет модернизации технологической базы и внедрения новых технологий [1]. В перспективе, технологический фактор также будет играть ключевую роль в снижении энергоемкости отечественного ВВП в наиболее значимых секторах экономики, в том числе и в энергетике.

Положения Энергетической стратегии России до 2030 г. в части энергосбережения и повышения энергетической эффективности являются долгосрочными ориентирами модернизации топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и развития экономики страны в целом и, как следствие, вносят свой вклад в обеспечение глобальной энергетической безопасности.

Стратегической целью государственной энергетической политики в сфере повышения энергетической эффективности экономики является максимально рациональное использование энергетических ресурсов на основе обеспечения заинтересованности их потребителей в энергосбережении, повышении собственной энергетической эффективности и инвестировании в эту сферу.

Существенное повышение энергоэффективности экономики России может быть достигнуто путем масштабного внедрения передовых технологий, в том числе связанных с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Важное значение для повышения экономической эффективности энерготехнологических процессов имеет использование возобновляемых природных источников энергии и утилизация вторичных энергетических ресурсов, влияющие на показатели работы всего топливно-энергетического комплекса. Источники низкопотенциального тепла, пригодные для утилизации, имеются практически во всех отраслях промышленности и в коммунальном хозяйстве — это системы оборотного водоснабжения и охлаждения технологического оборудования, вентиляционные выбросы, теплые сточные воды и др.

На гидроэлектростанциях (ГЭС) в процессе эксплуатации для надежной и бесперебойной работы оборудования необходим непрерывный интенсивный отвод теплоты от него, который выполняется при помощи системы охлаждения. Во время работы в гидрогенераторе возникают потери энергии, превращающиеся в теплоту и приводящие к значительному повышению температуры активной стали, меди и изоляции. Под воздействием теплоты происходит ухудшение электроизоляционных свойств материалов и понижение их механической прочности и эластичности.

Система охлаждения гидрогенераторов и трансформаторов ГЭС может рассматриваться как источник низкопотенциальной энергии, сбрасываемой вместе с технической водой. Российская практика полезного использования сбросного тепла от оборудования ГЭС не имеет широкого распространения [2] по ряду причин: низких тарифов на электрическую энергию в районах расположения ГЭС, высокой стоимости утилизационного оборудования, индивидуальных технических особенностей электростанций.

Существует несколько способов полезного использования данного сбросного тепла, один из наиболее перспективным является применение теплонасосных установок (ТНУ) [3, 4], которые нашли широкое применение в зарубежных странах для утилизации низкопотенциального тепла и повышения эффективности работы промышленных

источников энергии [5-8]. Опыт применения ТНУ в промышленных масштабах есть и в России, но в сравнении с зарубежным он достаточно мал [9-11].

Тепловой насос (ТН) работает следующим образом: рабочее вещество испаряется в камере с низким давлением и низкой температурой и конденсируется в камере с высоким давлением и высокой температурой, осуществляя перенос энергии. Теплонасосная установка (рис.1) представляет собой систему, состоящую из трех элементов: источника низкопотенциального тепла; теплового насоса, преобразующего низкопотенциальную энергию в тепловую энергию теплоносителя и системы отопления помещений.

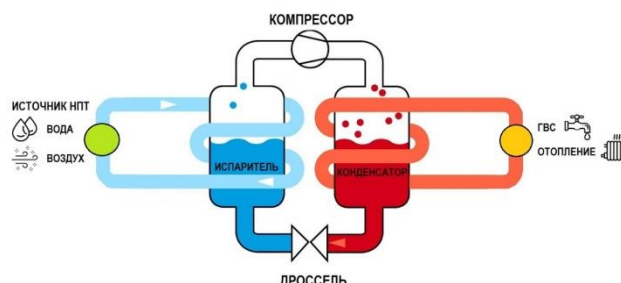


Рис.1. Схема теплонасосной установки

Fig.1. Scheme of the heat pump installation

Во всем мире, в том числе и в России, ведется активная научно-исследовательская работа, связанная с анализом возможностей использования низкопотенциальной теплоты. Ряд работ оценивают потенциал и особенности применения ТН в распределенной энергетике в различных технологических и экономических условиях [5, 8, 12]. Часть исследований посвящены оценке экологических и рыночных особенностей интеграции ТН в существующие системы теплоснабжения [12, 13]. Анализируются возможные варианты применения ТН в системах централизованного теплоснабжения, в условиях энергетических рынков различных стран [14-16]. Оценены перспективы использования ТН в комплексе с различными энергоустановками [17, 18]. Был проанализирован целый ряд схемных решений, оценен потенциал различных источников низкопотенциальной теплоты (ИНТ) [19, 20]. Исследованы перспективы использования ТН в различных системах теплоснабжения [21, 22].

На основе вышеизложенного материала, можно сделать вывод, что использование сбросного тепла на ГЭС является актуальной задачей не только в рамках отдельно взятого энергопредприятия, но и для ТЭК России в целом.

В рамках участия в акселерационной программе «Лаборатория энергетики – 2021», проводимой компанией *En+ Group*, была проведена работа по поиску решений утилизации сбросного тепла от оборудования Братской ГЭС.

Целью работы является выполнение оценки объемов теряемой тепловой энергии от оборудования Братской ГЭС, разработка предложений по полезному использованию данной тепловой энергии, выбор экономически выгодного варианта из предложенных.

Научная новизна исследования заключается в проработке решений по полезному использованию сбросного тепла от системы охлаждения оборудования российских ГЭС с помощью теплонасосных установок.

Практическая значимость работы состоит в разработке проекта утилизации низкопотенциального тепла с внедрением теплонасосных установок на Братской ГЭС, входящей в состав ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация», что является актуальной задачей для крупной энергетической компании *En+ Group*.

Материалы и методы

На данный момент на Братской ГЭС установлено 18 гидрогенераторов и 14 трансформаторов. Охлаждение генератора осуществляется водой, забор которой происходит с нижнего бьефа Братского водохранилища. Первая часть охлаждающей воды поступает в турбинный подшипник и воздухоохладитель генератора, после которых сливается в отсосную трубу. Вторая часть воды поступает в системы охлаждения генераторного подшипника и подпятника, после которых вода одним потоком уходит в маслоохладители трансформатора. Закончив охлаждение маслоохладителя трансформатора, вода сливается обратно в нижний бьеф Братского водохранилища. Описанная схема охлаждения гидрогенератора представлена на рисунке 2.



Рис.2. Схема системы охлаждения гидрогенератора

Fig.2. Scheme of the hydrogenerator cooling system

После разбора схемы системы охлаждения гидрогенератора на основании уравнений теплового и материального балансов были определены параметры сбросного тепла. Данные для расчета были взяты из технического отчёта по энергетическим испытаниям гидрогенератора №8 Братской ГЭС. Рассчитанные параметры воды в системе охлаждения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры воды в системе охлаждения гидрогенератора

Параметр	Значение, °С
Начальная температура воды	3,2
Температура воды на выходе из воздухоохладителя	21,94
Температура воды на выходе из генераторного подшипника	4,55
Температура воды на выходе из подпятника	5,3
Температура воды на входе в маслоохладитель трансформатора	5,17
Температура воды на выходе из маслоохладителя трансформатора	24,26

Исходя из полученных данных, были определены общие тепловые потери от всего оборудования Братской ГЭС. Они составили 92,52 МВт.

Опираясь на опыт Усть-Илимской ГЭС «Техническое перевооружение электрокотельной АПК У-ИГЭС с установкой теплового насоса», был разработан проект установки ТНУ на Братской ГЭС. Исходя из конструктивных особенностей гидрогенератора, были выбраны парокомпрессионные тепловые насосы типа «вода-вода».

В проекте было рассмотрено несколько вариантов по полезному использованию сбросного тепла с помощью ТНУ.

Первый вариант — это теплоснабжение помещений машинного зала ГЭС, а именно: центрального пульта управления (ЦПУ) и служебного корпуса монтажной площадки №1 (МП-1), схема расположения помещений представлена на рисунке 3.

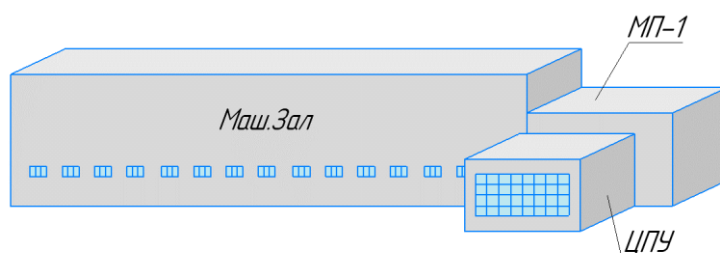


Рис.3. Схема расположения отапливаемых помещений с помощью ТНУ (1 вариант)

Fig.3. Layout of heated premises with the help of heat pump installation (1option)

Второй вариант — это теплоснабжение административно-бытового комплекса (АБК) и гидроцеха (ГЦ), схема расположения зданий представлена на рисунке 4. Особенностью этого варианта является разница в высотах между машинным залом (отм. 307) и зданиями

теплоснабжения (отм. 361), что требует дополнительной прокладки теплотрассы и установки циркуляционных насосов. Прокладка теплотрассы предлагается выполнить по галереям станции от машинного зала до вентиляционной будки, расположенной вблизи здания управления. Далее теплопровод будет идти через парковую зону и стену, соединяющую здание управления и гидроцеха.

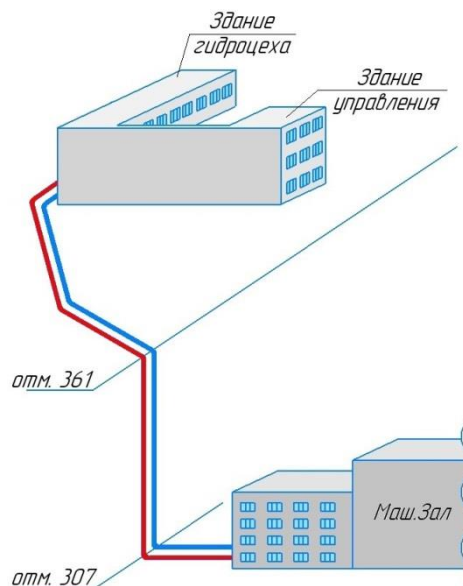


Рис.4. Схема расположения отапливаемых зданий с помощью ТНУ (2 вариант)

Fig.4. Layout of heated buildings using a heat pump installation (2 option)

Третий вариант — это теплоснабжение помещений машинного зала совместно с АБК и ГЦ.

В настоящее время система теплогенерации Братской ГЭС электрическая, выработка тепла осуществляется за счет преобразования электрической энергии в тепловую в электрических водогрейных котлах (КЭВ), характеристика которых представлена в таблице 2. Электроснабжение электродкотлов осуществляется от общестанционных собственных нужд Братской ГЭС.

Таблица 2

Характеристики источников теплоснабжения Братской ГЭС

Объект теплоснабжения	Источник теплоснабжения	
	отопление	горячее водоснабжение (ГВС)
ЦПУ и служебный корпус МП-1	4 КЭВ по 100 кВт	2 КЭВ по 100 кВт
АБК и ГЦ	4 КЭВ по 100 кВт	4 КЭВ по 50 кВт

Система отопления организована по зависимой схеме, котлы и отопительные приборы работают в одном гидравлическом контуре, регулирование подачи теплоты качественное, по температуре наружного воздуха.

Температурный график работы системы отопления - 95/70 °С, подогрев воды для нужд ГВС до 65 °С.

Тепловая мощность ТНУ была принята равной 60% от установленной мощности теплоисточников. Расчетная тепловая нагрузка 1 варианта теплоснабжения составила 240 кВт на отопление и 120 кВт на горячее водоснабжение, 2 варианта - 240 кВт на отопление и 100 кВт на ГВС, 3 варианта - 480 кВт на отопление и 220 кВт на ГВС.

Возможности современных ТНУ ограничены максимальной температурой нагрева, которая составляет 73 °С. В связи с этим, в проекте предусмотрен дополнительный нагрев воды при помощи КЭВ в часы максимальной нагрузки.

Для дальнейших расчетов был построен температурный график отопления (рис.5) при условиях, что расчетная температура на отопление составляет для г. Братска – 39 °С,

средняя температура отопительного периода — $-8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; длительность отопительного периода — 5992 ч.

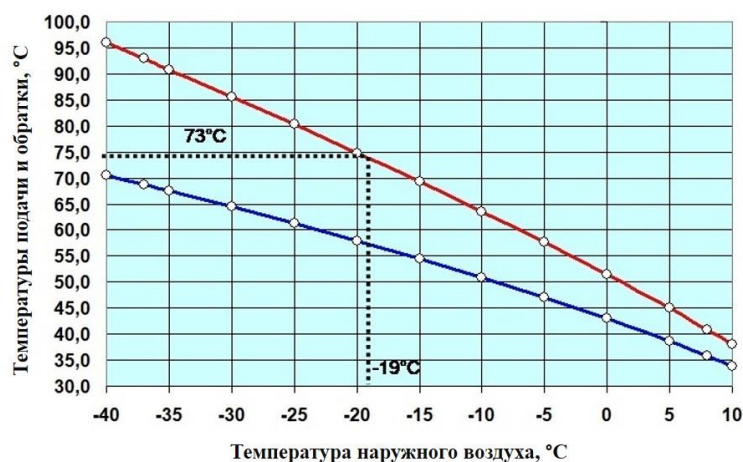


Рис.5. Температурный график отопления для г. Братска

Fig.5. Heating temperature graph for Bratsk

Опираясь на данный график и длительность стояния температур наружного воздуха для г. Братска, получили, что число часов работы ТНУ на отопление составит 5992 ч. (длительность всего отопительного периода), а время работы КЭВ на отопления будет определяться температурой наружного воздуха $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, что составит 1343 ч. Число часов работы ТНУ на ГВС - 8760 ч. (круглогодично).

Система ТНУ интегрируется в существующую систему теплогенерации собственных нужд, поэтому замена отопительных приборов в рассматриваемых объектах теплоснабжения не требуется. Оптимизированная схема теплогенерации представлена на рисунке 6.

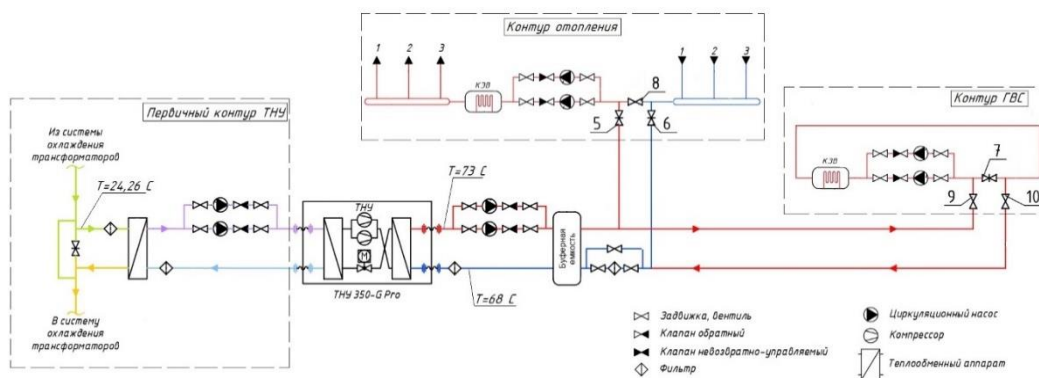


Рис.6. Оптимизированная схема теплогенерации

Fig.6. Optimized heat generation scheme

Температура воды, поступающей после охлаждения трансформаторов, составляет $24,26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Передача низкпотенциального из системы охлаждения трансформаторов на ТНУ через рекуперативный разборный пластинчатый теплообменный аппарат (ТА), который предназначен для защиты теплового насоса от различных механических примесей в воде. После ТА с температурой $21-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ по подающему трубопроводу поступает на ТНУ, где после отдачи тепла возвращается в ТА. Далее вода поступает в систему охлаждения трансформатора.

В ТНУ происходит нагрев воды до $40-73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее вода по подающему трубопроводу поступает в буферную емкость. Нагретый теплоноситель из буферной емкости поступает на догрев в КЭВ (при невозможности ТНУ обеспечить необходимую температуру), далее по распределительному коллектору подается в систему отопления и ГВС потребителей. Обратный теплоноситель от потребителей возвращается в сборный коллектор и по

обратному трубопроводу возвращается на догрев в буферную емкость, а далее в «обратку» ТНУ. Переключение режимов работы ТНУ осуществляется при помощи клапанов.

Результаты

В ходе работы над проектом были определены следующие основные параметры:

- температура охлаждающей воды на выходе из воздухоохладителя гидрогенератора, она составляет 21,94 °С;
- температура охлаждающей воды на выходе из маслоохладителя трансформатора - 24,26 °С;
- общие тепловые потери от всего оборудования Братской ГЭС - 92,52 МВт.

При расчете количества тепла, сбрасываемого с охлаждающей водой в нижний бьеф Братского водохранилища, возникли трудности с его точным определением, что связано с отсутствием фиксирования на станции необходимых параметров теплоносителя.

В проекте также рассмотрено 3 варианта теплоснабжения: 1 вариант - теплоснабжение помещений машинного зала; 2 вариант - теплоснабжение АБК и ГЦ; 3 вариант - теплоснабжение помещений машинного зала совместно с АБК и ГЦ.

Для сравнения вариантов теплоснабжения был проведен анализ российского рынка ТНУ. Техничко-экономический расчет показал, что наиболее выгодным является 3 вариант - теплоснабжение помещений машинного зала совместно с АБК и ГЦ. Вложения в проект составили в ценах на ноябрь 2021 г 35,46 млн руб., эта сумма включает в себя стоимость двух ТНУ *Viesmann Vitocal 350-G Pro*, двух циркуляционных насосов, теплосети, доставки оборудования и монтажных работ. Поставщиком насосов может быть официальный партнер немецкой фирмы «*Viesmann*» в Иркутске - ООО ИТЦ «Альтер Энерго». Экономия предприятия в случае внедрения данного проекта составит 4,68 млн руб., а срок окупаемости - 7,3 года.

Заключение

Теоретическая значимость данной статьи, заключается в рассмотрении внедрения теплонасосных установок в качестве метода полезного использования сбросного тепла от системы охлаждения оборудования современных предприятий. При этом ТНУ экологически чистый метод отопления и кондиционирования, поскольку все процессы переноса тепла в ТНУ происходят в замкнутом, герметичном контуре. Во время работы ТНУ отсутствуют выбросы в окружающую среду, оказывающие вредное воздействие на организм человека и природу.

Российская практика применения ТНУ на энергопредприятиях не имеет широкого распространения. ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация» (входит в состав Еп+ Group) одно из первых российских крупных предприятий, на филиалах которого внедряются теплонасосные установки.

Внедрение ТНУ на российских ГЭС позволит снизить расход электроэнергии на отопление, ГВС и устранить тепловое влияние на окружающую среду. Однако основными факторами, которые затрудняют применения ТНУ в нашей стране, являются относительная дешевизна традиционных углеводородов и слабое развитие оборудования отечественного производства.

Практическая значимость статьи состоит в разработке проекта полезного использования сбросного тепла от оборудования Братской ГЭС, в ходе которого была выполнена оценка объемов теряемой тепловой энергии, предложены варианты по полезному использованию данной энергии и выполнены технико-экономические расчеты окупаемости внедрения предложенных вариантов. В результате к реализации предложен вариант теплоснабжения с помощью ТНУ помещений машинного зала совместно с АБК и ГЦ Братской ГЭС.

Предлагается установить 2 ТНУ по 350 кВт и проложить теплотрассу диаметром 200 мм и длиной около 600 метров в двухтрубном исполнении со сроком окупаемости 7,3 года.

Предложенная схема использования сбросного тепла от системы охлаждения оборудования ГЭС универсальна и может быть применена не только на рассматриваемой в статье Братской ГЭС, но и на других станциях с учетом их особенностей.

Литература

1. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации // Министерство экономического развития РФ. 2020. 117 с.

2. Мясникова Н.В., Кудряшов А.Н. Оценка применения парокомпрессионной установки на Усть-Илимской ГЭС // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. Т. 11. № 1. С. 40-44.

3. Поляков А.Н., Гапоненко С.О. Использование тепловых насосов // Наука и образование в жизни современного общества: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 18 частях, Тамбов, 29 ноября 2013 года. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2013. С. 101-103.
4. Рукавишников, А. М. Тепловые насосы - источник энергоэффективности // Холодильная техника. 2013. № 2. С. 20-21.
5. Magnani S, Danti P, Pezzola L. Analysis of the coupling between CHP and EHP in an office building applied to the Italian energy market. *Energy Procedia*. 2016;101;558–565.
6. Urbanucci, L., Bruno, J. C., & Testi, D. (2019). Thermodynamic and economic analysis of the integration of high-temperature heat pumps in trigeneration systems. *Applied Energy*, 238, 516–533. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.115.
7. Chen Y, Zhang Y, Wang J, et al. Operation for integrated electricity-heat system with improved heat pump and storage model to enhance local energy utilization. *Energies*. 2020;13:6729.
8. Sewastianik S., Gajewski A. Energetic and Ecologic Heat Pumps Evaluation in Poland // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 4980.
9. Таймаров М.А., Ильин В.К., Осипов А.Л., Долгова А.Н., Ахмеров А.В. Теплонасосный комплекс для утилизации вторичных энергоресурсов нефтехимических заводов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(3-4):7-14. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-7-14>.
10. Трещёва М.А., Аникина И.Д., Трещёв Д.А. Обоснование мощности теплового насоса, используемого в системе охлаждения конденсатора паровой турбины ПГУ-ТЭЦ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(1):61-73. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-1-61-73>.
11. Шидловская, Д.К., Седельников Г.Д. Использование теплового насоса для модернизации низкопотенциального комплекса Комсомольской ТЭЦ-3 // Международный студенческий научный вестник. – 2015. – № 3-2. – С. 300.
12. Alla S.A., Bianco V., Marchitto A., et al. Impact of the Utilization of Heat Pumps for Buildings Heating in the Italian Power Market // In Proceedings of the 15th International Conference on the European Energy Market, Lodz, Poland, 27–29 June 2018.
13. Wang J., Zhong H., Tan C., et al. Economic benefits of integrating solar-powered heat pumps into a CHP system // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018. V. 9. pp. 1702–1712.
14. Ostergaard P.A., Andersen A.N. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating // *Applied Energy*. 2016. V. 184. pp. 1374–1388.
15. Sun F., Xie Y., Svendsen S., et al. New low-temperature central heating system integrated with industrial exhausted heat using distributed electric compression heat pumps for higher energy efficiency // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6582.
16. Андриященко А. И. Сравнительная эффективность применения тепловых насосов для централизованного теплоснабжения // Промышленная энергетика. 1997. № 6. С. 2–4.
17. Goricanec D., Ivanovski I., Kroppe J., et al. The Exploitation of Low-Temperature Hot Water Boiler Sources with High Temperature Heat Pump Integration // *Energies*. 2020. V. 13. pp. 6311.
18. Zhang L., Zhang Y., Zhou L., et al. Research of waste heat energy efficiency for absorption heat pump recycling thermal power plant circulating water // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018. V. 121. pp. 4.
19. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод юга России для тепло-, водоснабжения и решения экологических проблем // Теплоэнергетика. 2019. № 66. С. 361–366.
20. Федюхин А.В., Звончевский А.Г. Перспективные направления использования теплоты низкопотенциальных источников химических производств // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 3. С. 15-27. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27.
21. Шпильрайн Э.Э. Возможность использования теплового насоса на ТЭЦ // Теплоэнергетика. 2003. № 7. С. 54–56.

22. Морозов Ю.П., Чалаев Д.М., Величко В.В. Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов // Альтернативная энергетика и экология. 2017. № 4–6. С. 70–79.

Авторы публикации

Юровская Валерия Дмитриевна – студент, Братский государственный университет.

Латушкина Светлана Викторовна – старший преподаватель кафедры энергетики, Братский государственный университет.

References

1. State report on the state of energy conservation and energy efficiency in the Russian Federation. *Ministry of Economic Development of the Russian Federation*. 2020. 117 p.
2. Myasnikova N.V., Kudryashov A.N. Evaluation of the use of a vapor compression unit at the Ust-Ilimskaya HPP. *Youth Bulletin of IrSTU*. 2021;11 (1):40-44.
3. Polyakov A.N., Gaponenko S.O. The use of heat pumps. *Science and education in the life of modern society: a collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference*: in 18 parts, Tambov, November 29, 2013. Tambov: Ucom Consulting Company LLC, 2013; 101-103.
4. Rukavishnikov, A. M. Heat pumps as a source of energy efficiency. *Refrigeration equipment*. 2013; 2: 20-21.
5. Magnani S, Danti P, Pezzola L. Analysis of the coupling between CHP and EHP in an office building applied to the Italian energy market. *Energy Procedia*. 2016;101;558–565.
6. Urbanucci, L., Bruno, J. C., &Testi, D. (2019). Thermodynamic and economic analysis of the integration of high-temperature heat pumps in trigeneration systems. *Applied Energy*, 238, 516–533. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.115.
7. Chen Y, Zhang Y, Wang J, et al. Operation for integrated electricity-heat system with improved heat pump and storage model to enhance local energy utilization. *Energies*. 2020;13:6729.
8. Sewastianik S, Gajewski A. Energetic and Ecologic Heat Pumps Evaluation in Poland. *Energies*. 2020; 13:4980.
9. Taimarov M.A., Il'in V.K., Osipov A.L., et al. Heat pump complex for utilization of secondary energy resources of petrochemical plants. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):7-14.
10. Treshcheva M.A., Anikina I.D., Treshchev D.A. Justification of the power of the heat pump used in the cooling system of the condenser of the steam turbine of the CCGT-CHP. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2022; 24(1):61-73.
11. Shidlovskaya, D.K., Sedelnikov G.D. The use of a heat pump for the modernization of the low-potential complex of the Komsomolskaya CHPP-3. *International Student Scientific Bulletin*. 2015;3-2: 300.
12. Alla SA, Bianco V, Marchitto A, et al. Impact of the Utilization of Heat Pumps for Buildings Heating in the Italian Power Market. In *Proceedings of the 15th International Conference on the European Energy Market*. Lodz, Poland, 27–29 June 2018.
13. Wang J, Zhong H, Tan C, et al. Economic benefits of integrating solar-powered heat pumps into a CHP system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018;9: 1702–1712.
14. Ostergaardan PA, Andersenab A.N. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating. *Applied Energy*. 2016; 184:1374–1388.
15. Sun F, Xie Y, Svendsen S, et al. New low-temperature central heating system integrated with industrial exhausted heat using distributed electric compression heat pumps for higher energy efficiency. *Energies*. 2020; 13:6582.
16. Andryushchenko AI. Comparative efficiency of heat pumps application for district heating. *Industrial Power Engineering*. 1997; 6:2–4.
17. Goricanec D., Ivanovski I., Krobe J., et al. The Exploitation of Low-Temperature Hot Water Boiler Sources with High Temperature Heat Pump Integration. *Energies*. 2020. V. 13. pp.6311.

18. Zhang L, Zhang Y, Zhou L, et al. Research of waste heat energy efficiency for absorption heat pump recycling thermal power plant circulating water. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018;121:4.

19. Alkhasov AB, Alkhasova DA. Comprehensive Utilization of Low-Potential Geothermal Waters of Southern Russia for Heat and Water Supply and Solution of Environmental Problems. *Thermal Engineering*. 2019;66:361–366.

20. Fedyukhin A.V., Zvonchevsky A.G. Perspective directions for the use of heat from low-potential sources of chemical production. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2022;24(3):15-27. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-3-15-27.

21. Shpilrayn EE. The possibility of using of heat pump on TPP. *Thermal Engineering*. 2003; 7:54–56.

22. Morozov YP, Chalaev DM, Velichko VV. Decentralized heating with geothermal heat pumps. *Alternative Energy and Ecology*. 2017;4–6:70–79.

Authors of the publication

Valeriya D. Yurovskaya – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Svetlana V. Latushkina – Bratsk State University, Bratsk, Russia.

Получено 25.08.2022г.

Отредактировано 26.09.2022г.

Принято 26.09.2022г.



АНАЛИЗ ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБКАХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ НА УГОЛЬНЫХ ТЭЦ МЕТОДОМ ФУРЬЕ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власова А.Ю., Орлов А.А

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан,
Республика Казахстан

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Определение качественного состава отложений на внутренней поверхности трубок пароперегревателей станций Аксуская ГРЭС и ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан», расположенных в Республике Казахстан. *МЕТОДЫ.* Наиболее современным методом анализа является ИК-спектрофотометрия, которая основывается на поглощении ИК-излучения. Анализ отложений проводили на инфракрасном спектрофотометре с преобразованием Фурье компании Shimadzu IRAffinity-1S. Особенность и оправданность использования данного прибора основывается на высокой пропускной способности оптики. Дополняющей функцией является сочетание с системой динамической цифровой юстировки. В качестве мощного керамического источника излучения используется детектор DLATGS. Данный детектор является высокочувствительным и термостабилизированным. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В результате анализа было обнаружено, что отложения на внутренней поверхности представлены продуктами коррозии металла и термоустойчивыми гумусовыми веществами. Последние легко переходят в пар из котловой воды (перегонка с паром) и оседают на поверхности трубок. Также в качестве примесей присутствуют минеральные вещества и силикаты, которые также в небольшом количестве переходят в пар. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В результате анализа отложений в трубках пароперегревателей на станциях Аксуская ГРЭС и ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан», расположенных в Республике Казахстан было обнаружено, что коррозионные процессы идут довольно интенсивно, поэтому в отложениях преобладают продукты коррозии. Для снижения внутреннего износа трубок необходимо корректировать ВХР, анализировать применяемые реагенты, а также произвести постадийный анализ теплоносителя на каждом этапе очистки

Ключевые слова: водно-химический режим; отложения на трубках пароперегревателей; станции на угольном топливе.

Для цитирования: Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Власова А.Ю., Орлов А.А. Анализ отложений в трубках пароперегревателей на угольных ТЭЦ методом Фурье ИК-спектроскопии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 23-34. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-23-34.

ANALYSIS OF DEPOSITS IN SUPERHEATER TUBES AT COAL-FIRED THERMAL POWER PLANTS BY FOURIER IR SPECTROSCOPY

ND. Chichirova, AA. Chichirov, AY. Vlasova , AA. Orlov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

ORCID: 0000-0001-8520-5432, vlasovaay@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Determination of the qualitative composition of deposits on the inner surface of the superheater tubes of the Aksuskaya GRES and CHPP stations of Aluminum Kazakhstan JSC located in the Republic of Kazakhstan. *METHODS.* The most modern method of analysis is IR spectrophotometry, which is based on the absorption of IR radiation. Sediment

analysis was carried out on an infrared spectrophotometer with Fourier transform of Shimadzu IRAffinity-1S. The peculiarity and justification of using this device is based on the high throughput of optics. A complementary function is a combination with a dynamic digital adjustment system. The DLATGS detector is used as a powerful ceramic radiation source. This detector is highly sensitive and thermally stabilized. **RESULTS.** As a result of the analysis, it was found that the deposits on the inner surface are represented by metal corrosion products and heat-resistant humus substances. The latter easily pass into steam from boiler water (steam distillation) and settle on the surface of the tubes. Also, mineral substances and silicates are present as impurities, which also pass into steam in a small amount. **CONCLUSION.** As a result of the analysis of deposits in superheater tubes at the stations of Aksuskaya GRES and CHPP of Aluminum Kazakhstan JSC located in the Republic of Kazakhstan, it was found that corrosion processes are quite intense, therefore corrosion products predominate in the deposits. To reduce the internal wear of the tubes, it is necessary to adjust the VCR, analyze the reagents used, and perform a step-by-step analysis of the coolant at each stage of cleaning

Keywords: water-chemical regime; deposits on superheater tubes; coal-fired stations.

For citation: Chichirova ND, Chichirov AA, Vlasova AY, Orlov AA. Analysis of deposits in superheater tubes at coal-fired thermal power plants by Fourier IR spectroscopy *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):23-34. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-23-34.

Введение

Энергетические комплексы, как в России, так и за рубежом несут серьезные потери при выходе оборудования из строя. Одной из причин являются коррозионные процессы разрушения конструкционных материалов и отложений на поверхностях теплообмена. Причинами разрушения являются: неправильное ведение водно-химического режима, недостаточная степень очистки воды, конструкционные неточности и неправильный подбор конструкционных материалов. Поэтому одной из задач теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) сводится к поддержанию оптимальных условий работы оборудования, за счет отлаженного водно-химического режима (ВХР) и контроля основных показателей.

Ученые Ивановского государственного энергетического университета Барочкин Е.В. и Виноградов В.Н. при изучении парогенераторов выявили, что при нарушении ВХР ухудшается качество рабочего тела (пар) и, как следствие, на внутренней поверхности теплосилового оборудования образуются отложения, которые в свою очередь провоцируют коррозионные процессы. Так, пароперегреватели относятся к наиболее повреждаемым поверхностям системы нагрева пара. Если выразить в процентном соотношении, то на долю пароперегревателей приходится до 56 % от общего числа повреждений, трубы топочных экранов до 17 % и прочие поверхности порядка 7 % [1-3].

Для минимизации отложений на внутренней поверхности трубок пароперегревателя необходимо строго контролировать показатели качества пара (табл. 1). В зависимости от типа ВХР в паре возможно наличие аммиака, угольной кислоты, водорода, солей натрия и кремниевой кислоты. Ученые Республики Казахстан, а именно в Карагандинском государственном техническом университете при изучении вопросов высокотемпературной коррозии поверхностей теплообмена выявили, что в перегретом паре высоких, сверхвысоких и сверхкритических параметров соли натрия и кремниевой кислоты находятся в состоянии парового раствора. На предприятиях теплоэнергетики используют углеродистые стали. Выбор конструкционного материала обоснован температурными характеристиками, так углеродистые стали при температурах до 450-500 °С достаточно стойки. Но при незначительном увеличении температуры на 30-50 °С влечет за собой интенсификацию окислительных процессов. Окисление может идти как с внутренней, так и с наружной стороны труб. Такой тип разрушения конструкционного материала относится к пароводяной коррозии, в результате которой увеличивается окалинаобразование. Для анализа отложений с внешней стороны труб необходимо проводить дополнительные исследования, которые будут учитывать состав сжигаемого топлива и тип разрушения. Максимальная температура металла труб из применяемых для перегревателей котлов перлитной 12Х1МФ и аустенитной X18НТ2Т сталей при сжигании топлива должна составлять соответственно не более 585 и 610 °С. Данный диапазон свидетельствует о том, что запас увеличения температуры на последней

ступени пароперегревателя незначителен, поэтому сохраняется риск достижения температуры перегрева конструкционного материала [4-5].

Одной из причин загрязнения пара коррозионно-активными примесями, вызывающими снижение водородного показателя, являются органические вещества, которые разлагаются с образованием кислот. При окислении образуется закись-окиси железа (Fe_3O_4) и выделяется газообразный водород [6]. Помимо железоокисных отложений на внутренней поверхности пароперегревательных трубок могут быть образованы отложения щелочноземельных металлов, а именно соединения кальция и магния, которые попадают в питательную воду с присосами в конденсаторе. Медные отложения присутствуют в том случае, если используются латунные трубки, либо детали насоса, которые содержат медь. По литературным данным основная доля отложений формируется из силикатных соединений, которые присутствуют при высоких давлениях. Также образуются легкорастворимые соединения натрия, которые обладают хорошей растворимостью при высоких параметрах, за счет адсорбции на поверхности и химическим взаимодействием с отложениями. Состав отложений на внутренней поверхности трубок в основном будет варьироваться от технологий подготовки теплоносителя и режима ВХР.

Таблица 1

Показатели качества перегретого и насыщенного пара (по ГОСТ 54405–2011)

Наименование показателя	Норма для котлов				
	промышленных (с пароперегревателем) абсолютным давлением, МПа			Энергетических (с пароперегревателем), абсолютным давлением до 3,9 МПа	
	до 1,4	2,4	3,9	ТЭЦ	ГРЭС
Условное солесодержание (в пересчете на NaCl), мкг/дм^3	820*	410*	250	250	160
Содержание натрия, мкг/дм^3	320*	160*	100	100	60
Содержание свободной углекислоты (в пересчете на CO_2), мг/дм^3	20**			20	10
Содержание свободного аммиака (не связанного с углекислотой), мг/дм^3	Не допускается***			Не допускается	

* Для котлов без пароперегревателя допускается влажность до 1%.

** Для котельных установок, имеющих систему обратных конденсатопроводов общей протяженностью не более 1000 м при числе теплообменных аппаратов не более десяти, допускается содержание свободной углекислоты в паре до 100 мг/дм^3 .

***Допускаемое содержание связанного аммиака следует определять по согласованию с потребителем технологического пара.

Ученый Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного машиностроения Ходырев Б.Н. писал о термо-окисляющей деструкции и о факторах, которые могут влиять на возможность ее протекания. Он писал, что химизм данной реакции до сих пор не изучен, также неизвестны условия протекания данных реакций и состав продуктов. Если обратимся к химическим реагентам, которые добавляются для поддержания ВХР, то выясним, что полностью не изучена роль аминов в защите конструкционного материала от коррозии. Для того чтобы управлять процессами, необходимо знать их механизмы. Безусловно, прямое исследование механизмов деструкции сопряжено с большими сложностями, поэтому целесообразно определить состав компонентов и исследовать возможные пути деструкции данных веществ. Но даже на данном этапе может возникнуть ряд сложностей, а именно в невозможности исследовать течение окислительно-восстановительных реакций без учета участия в них свободных радикалов. Поэтому для прогнозирования продуктов термоллиза необходимо знать какие классы веществ содержатся в твердых отложениях на поверхности трубок пароперегревателей [7-10].

Семенов Н.Н. предположил, что большая часть окислительных процессов легче протекает в жидкой фазе, что и подтверждается окислением сложных углеводов и других органических соединений. Окисление органических кислот является цепной реакцией, так как в результате образуется два активных радикала, которые запускают цепной механизм. На сегодняшний день исследования по составу гумусовых веществ

показывают их сложный состав. Поэтому есть все основания предполагать, что при термодеструкции будут образовываться сложные композиционные составы. Продукты термолитиза будут составлять смесь сложных органических веществ разной структуры. На основании научных исследований выявлено, что данные продукты содержат три-пять видов низкомолекулярных органических кислот и около двух десятков ароматических соединений. Наличие кислот существенно снижает водородный показатель, в результате интенсифицируются процессы коррозии. Строение органических соединений уникально и, казалось бы, процессы деструкции не поддаются описанию. Но, несмотря на столь сложную структуру гуминовых соединений, были выявлены две важные для нас закономерности: диапазон вариаций атомных отношений основных составляющих элементов (С, Н, О, N) не столь широк; у всех гуминовых соединений единый принцип строения. Основная единица гуминовых веществ представляет собой индивидуальное ароматическое кольцо с боковыми алифатическими цепями, определяющими устойчивость молекул в растворе за счет достаточного количества гидрофильных групп. Следовательно, гумусы можно рассматривать как переходную структуру от гидрофобных к гидрофильным соединениям. Давно доказано наличие в гумусах бензольных, пиридиновых колец и фурановых ядер. Ароматические кольца соединены мостиками ($-\text{O}-$, $=\text{N}-$, $-\text{NH}-$, $-\text{CH}_2-$). Содержание аминного азота достигает 70 % общего его количества; 30 % азота входит в состав гетероциклов [11-12].

Российские ученые такие как Е.П. Набоко, Т.И. Чернышова, А.А. Кот, Ю.М. Липов определили, что существует область солесодержания насыщенного пара. По показателю солесодержания можно судить о количестве отложений на поверхности. Также можно выделить безопасный диапазон, при котором будут наблюдаться минимальные отложения или вообще их отсутствие. При установлении допустимых концентраций солей и кремниевой кислоты в паре необходимо стремиться к тому, чтобы отложения в пароперегревателях и в проточной части турбин при этих концентрациях совершенно не получались, либо происходили настолько медленно, что не вызывали бы необходимости в частых остановках котлов и турбин для их промывки и очистки от отложений. При определении количества отложений необходимо учитывать тип применяемых котлов (барабанные или прямоточные). Для барабанных котлов характерен вынос солей из барабана с частицами влаги. В результате на трубах пароперегревателей и лопатках турбин появляются соли, которые содержатся в паре. Особая роль в загрязнении пароперегревателя и турбин принадлежит кремнекислоте. Особенность данного показателя заключается в том, что с увеличением давления растворимость в паре кремнекислоты повышается и как следствие происходит отложение на поверхности оборудования. Поэтому тип применяемых котлов строго нормирует показатели качества теплоносителя. При давлении 10 МПа значительно повышаются требования к содержанию кремниевой кислоты. В таблице 2 приведен примерный состав солевых отложений в перегревателях барабанных котлов с фосфатно-щелочным ВХР [5, 13-14].

Таблица 2

Состав солевых отложений в перегревателях барабанных котлов

Компонент	Солевые отложения, % при		
	Давления пара 3,4 МПа		Давление пара 11,8 МПа
	Первая половина перегревателя	Вторая половина перегревателя	
Na_2SO_4	55,6	20,3	98,84
Na_3PO_4	19,0	7,0	5,0
Na_2CO_3	10,2	12,7	0,00
NaCl	15,6	55,0	0,04
Na_2SiO_3	-	-	0,08

Чистота внутренних поверхностей перегревателей является самым объективным показателем удовлетворительного состояния водного режима станции. Загрязнение перегревателей отложениями – следствие систематических нарушений ВХР. В частности, содержание органических соединений и введение химических реагентов серьезно влияет на эксплуатационные характеристики теплосилового оборудования [15-16].

На эксплуатационные характеристики труб пароперегревателя большое значение оказывает способ расположения их в газоходе. По конструкционным характеристикам различают вертикальные и горизонтальные перегреватели. Каждый вид крепления имеет

свои преимущества. На большинстве станций в типовых схемах перегревателей применяются ширмовые ступени, которые отличаются достаточно сложной конфигурацией и работают в условиях больших неравномерностей тепловосприятий как между отдельными ширмами, так и между трубами в пределах каждой ширмы. При рабочем режиме котла на конструкционный материал труб пароперегревателей оказывают одновременное воздействие:

- топочные газы различной температуры, агрессивности, а также содержания золы, шлак (на наружную поверхность труб) и водяной пар (на внутреннюю поверхность);

- колебания температуры металла из-за работы при переменных режимах или при периодической корректировке соотношения вода – топливо в случае эксплуатации прямоточного котла на базовом режиме;

- колебания температуры металла из-за работы при переменных режимах или при периодической корректировке соотношения вода – топливо в случае эксплуатации прямоточного котла на базовом режиме.

При оценке негативного воздействия на конструкционный материал и на количество внутренних отложений учитываются не только температурный режим, но и эрозионный износ, который усугубляется при увеличении зольности, используемого топлива.

Целью данной работы является анализ состава отложений в трубках пароперегревателей, что позволит определить механизм образования и возможные причины их появления. Лабораторный анализ проводился на образцах вырезок трубопроводов с применением ИК-спектроскопии.

Актуальность данной тематики состоит в анализе подготовки воды и режима ВХР за счет качественного анализа твердых отложений на внутренней поверхности оборудования, а именно трубок пароперегревателей. Данные результаты позволяют расширить знания в данной области.

Научная новизна работы заключается в определении класса веществ, из которых образованы отложения.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на основании полученных данных, возможно, скорректировать ВХР с целью уменьшения отложений на внутренней поверхности трубок пароперегревателей и как следствие снизить коррозионно-эрозионное разрушение.

Материалы и методы

На сегодняшний день основной метод анализа отложений основывается на получении аналитического сигнала. Более современным, точным и научным методом является ИК-спектрофотометрия, которая основывается на поглощении ИК-излучения.

Многоатомная молекула обладает большим числом всевозможных колебаний, в которых принимают участие все ее элементы. Некоторые из этих колебаний в первом приближении можно рассматривать как локальные, связанные с одиночными связями либо функциональными (локализованные колебания), в то время как другие воспринимаются как колебания всей молекулы в целом. Локализованные колебания могут быть валентными, ножничными, маятниковыми, крутильными или веерными. Многие локализованные колебания служат для идентификации функциональных групп.

Инфракрасный спектр состоит из двух областей, что важно учитывать при интерпретации спектров. Условно их можно разделить: выше 1500 см^{-1} и ниже 1500 см^{-1} .

Данные области имеют различное значение. Область свыше 1500 см^{-1} характеризует функциональные группы и спектральные полосы поглощения, полученные в данном диапазоне, характеризуют свойства вещества. Область ниже 1500 см^{-1} характеризуется большим количеством спектральных полос поглощения. И именно эта область характеризует молекулу как целое. Этот участок часто называют областью отпечатков пальцев.

Указанная область используется для установления идентичности вещества с эталонным образцом.

Анализ отложений проводили на инфракрасном спектрофотометре с преобразованием Фурье компании Shimadzu IRAffinity-1S.

Особенность и оправданность использования данного прибора основывается на высокой пропускной способности оптики. Дополняющей функцией является сочетание с системой динамической цифровой юстировки. В качестве мощного керамического источника излучения используется детектор DLATGS. Данный детектор является высокочувствительным и термостабилизированным. Комбинирование данной функции с

оптикой, которая имеет высокую пропускную способность и за счет оптимизации электрической и оптической схем, прибор демонстрирует высочайшее соотношение сигнал/шум (30000:1) и максимальным разрешением 0,5 см⁻¹. Данный показатель очень важен, так как позволяет определять примеси на предельно низком уровне. Стоит уделить особое внимание тому, что прибор ИК-Фурье имеет подвижное зеркало, которое работает очень плавно и точно за счет прецизионного механизма крепления зеркала (FJS). Интерферометр в данном приборе стабилизирован за счёт улучшенной системы динамической цифровой юстировки. Это позволяет почти сразу выполнять измерения, так как время на прогрев прибора ничтожно мало. Состояние интерференции гелий-неонового лазера, используемого в конструкции интерферометра, постоянно отслеживается и сравнивается с состоянием при оптимальных условиях, сохраненным ранее. Дельта данных состояний будет вычисляться за счет процессора цифровой обработки сигналов, после чего происходит смена положения (наклона) неподвижного зеркала, чтобы компенсировать данную разницу. Уникальность данной функции состоит в том, что корректировка положения может происходить даже в момент измерения образца. Для этого необходимо в программном обеспечении активизировать функцию «автоматическая настройка», которая автоматически будет выполнять описанную ранее функцию. Одним из недостатков данного прибора является использование оптики чувствительной к влажности среды, в которой содержится прибор. Для минимизации данного фактора прибор оснащен встроенным автоматическим осушителем для поддержания длительной и стабильной работы прибора. Прибор всегда включен в сеть и постоянно проходит диагностику осушителя, при срабатывании сигнала о замене осушающего агента, необходима срочная замена.

Особенность программы анализа примесей заключается в наличии спектров для более чем 500 выделенных неорганических веществ, органических веществ и полимеров, которые зачастую идентифицируются в качестве примесей.

Спектральные исследования можно проводить во всех агрегатных состояниях и в любых консистенциях, в виде пленки или раствора. В нашем случае проводился анализ твердых отложений, которые образовались на внутренней поверхности труб пароперегревателей. Техника подготовки проб ориентирована на прессование с KBr. При подготовке пробы 1–2 мг исследуемого вещества тщательно растирали вместе с 200–300 мг сверхчистого KBr вручную в агатовой ступке. Поскольку KBr обладает прозрачностью в широкой области спектра от 43 000 до 400 см⁻¹ и не имеет полос поглощения, то при спектроскопическом исследовании регистрируется только спектр тонко измельченного в KBr вещества.

KBr предварительно был просушен и измельчен в агатовой ступке. Данным пунктом нельзя пренебрегать, так как напрямую влияет на сходимость и воспроизводимость результатов измерений. Использование агатовой ступки обусловлено тем, что она имеет симметрично отшлифованные грани и так же хорошо отполированную внутреннюю поверхность, глубокую выемку и удобство использования. Но необходимо учитывать, что при выполнении перетирания ступка должна быть чистой и сухой, так как малейшие загрязнения приведут к значительным искажениям в полученных результатах. Сильное влияние на качество получаемых спектров из-за рассеивания излучения имеет размер частиц в исследуемом образце. Недостаточно измельченные частицы приводят к изменению угла наклона базовых линий и так же появляются сильные шумы в спектрах. Для того чтобы не было эффекта рассеяния частицы исследуемого образца должны быть не более 1 мкм.

Для получения ИК-спектра необходимо всего 1 мг анализируемого вещества в соотношении 1:200–300. Оптимальное соотношение масс вещества и KBr определяется опытным путем по получаемым результатам исследования ИК-спектров.

Для того, чтобы данные были точными необходимо перед прессованием таблеток просушить исследуемое вещество в специальном сушильном шкафу при температуре 110°C порядка 60 минут.

Образец, размолотый вместе с KBr, прессуется с помощью гидравлического пресса в брикет в виде таблетки. Гидравлический пресс выдерживает массу 10 т. Необходимость выдерживания именно такого давления объясняется структурой бромида калия, так как он становится пластичным и формируется «твердый раствор» с исследуемым веществом. Даже в процессе приготовления таблетки необходимо учитывать пути попадания воды, которая искажает результаты измерений. Поэтому для удаления воздуха, который имеет определенную влажность, пресс-форму подключают к вакуумному насосу. Негативное воздействие влаги сказывается на качестве подготовленного материала, делая таблетку

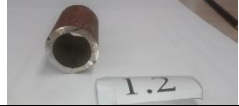
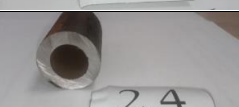
мутной и снижает пропускание. Перед началом эксперимента пресс-форму и порошок КВг прогревают в сушильном шкафу при температуре 40 °С. Это предотвратит конденсацию влаги воздуха на их поверхности. Вода, содержащаяся в КВг даже в минимальном количестве, сразу становится заметной в спектре в виде соответствующих полос поглощения.

Экспериментальные исследования

В качестве исследуемых образцов были взяты вырезки из труб пароперегревателей, отработавшие год, станций Аксуская ГРЭС и ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан», расположенные в Республике Казахстан. Вырезки были выбраны с учетом доступности забора материалов во время капитального ремонта котлов. Обе станции сжигают экибастузский уголь разреза Восточный, зольность которого составляет 38-40%, общая влага в рабочем состоянии топлива, W_p 6,5 %. В таблице 3 приведены данные по образцам и представлены фото.

Таблица 3

Образцы вырезок из труб пароперегревателей станций Аксуская ГРЭС и ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан»

Наименование образца	Место вырезки	Фото образца
Аксуская ГРЭС		
Образец 1.1	Холодная ступень пароперегревателя (ХПП)	
Образец 1.2	Пароперегреватель третьей ступени (ПП 3 ступень)	
Образец 1.3	Потолочный пароперегреватель (ППП)	
Образец 1.4	Пароперегреватель 4-ой ступени (ПП 4 ступень)	
Образец 1.5	Ширмовый пароперегреватель (ШПП)	
ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан»		
Образец 2.1	Нижняя радиационная часть -1 (НРЧ-1) Данный образец имеет трещину, в результате эрозионного износа	
Образец 2.2	Ширмовый пароперегреватель (ШПП-1)	
Образец 2.3	Ширмовый пароперегреватель (ШПП-1)	
Образец 2.4	Ширмовый пароперегреватель (ШПП-1)	

В результате эксперимента были получены ИК-спектрограммы, по которым определялся состав отложений на внутренней поверхности труб пароперегревателей. Спектры были скомпонованы по станционной принадлежности и приведены на рисунках 1 и 2.

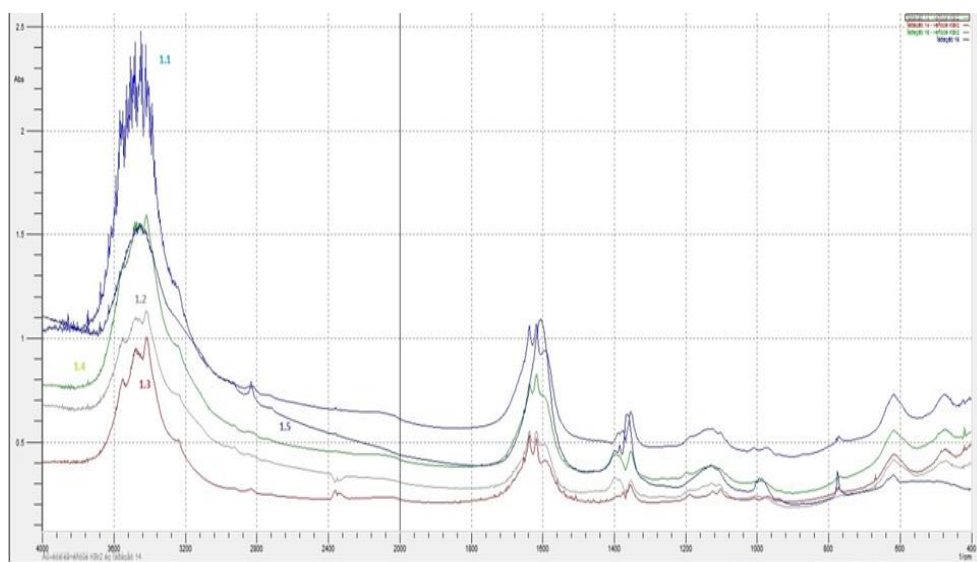


Рис.1. ИК-спектрограммы отложений с внутренней поверхности трубок пароперегревателей Аксуской ГРЭС. *Fig.1. Infrared sediment spectrograms from the inner surface of the Axuska GRES steam superheater tubes.*

В ИК-спектрах образцов трубок пароперегревателей Аксуской ГРЭС, серия полос поглощения при 480 см⁻¹ (ν_1 – FeO), 770 см⁻¹ (острый пик), 1120 см⁻¹ (δ O-H), широкая полоса с максимумом 1150 см⁻¹ характеризует наличие лепидокрокита. Это смешанный оксид-гидроксид железа (III) (Fe₃+O(OH)). Основные полосы поглощения – широкая средняя при 620 см⁻¹, группа полос 1370-1380 (деформационные колебания C-H, диплет 1620 и 1640 см⁻¹, полосы 2840 см⁻¹ и 1920 см⁻¹, (валентные колебания C-H), характер щепления широкой полосы 3200-3600 см⁻¹ указывает на наличие солей гуминовых кислот. Кроме этого возможно присутствие сульфатов (слабая полоса при 1110 см⁻¹, фосфатов (слабая группа пиков с центром 990 см⁻¹, пик при 1590 см⁻¹ и силикатов (слабый пик при 1050 см⁻¹) в качестве примесей. Во всех образцах соотношение оксидов железа и органической части примерно одинаково. Исключение составляет образец 1.5. (образец вырезки трубы ширмового пароперегревателя), где содержание гуматов превалирует, и они имеют несколько измененную структуру, возможно, из-за термодеструкции.

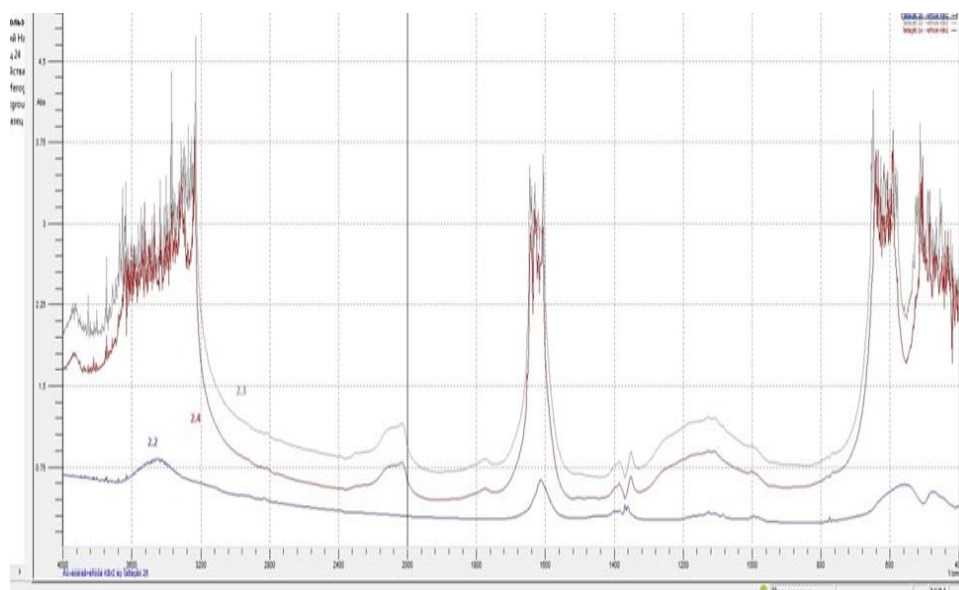


Рис.2. ИК-спектрограммы отложений на внутренней поверхности трубок пароперегревателей ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан» *Fig. 2. IR spectrograms of deposits on the inner surface of superheater tubes of CHPP JSC "Aluminum Kazakhstan"*

В ИК-спектрах трубок пароперегревателей ТЭЦ АО «Алюминий Казахстан» обнаруживаются полосы поглощения сильная ($\nu_1 - \text{FeO}$) 480 см⁻¹, сильная ($\nu_2 - \text{FeO}$) 560 см⁻¹, 1620 см⁻¹, широкая полоса 1000-1200 см⁻¹ с максимумом 1100 см⁻¹, широкая с максимумом 3450 см⁻¹. Этот набор полос характеризует наличие оксида железа (III) – Fe_2O_3 . Кроме этого группа полос в областях 600-630 см⁻¹, 1600-1630 см⁻¹ (сильные сопряженные двойные связи $\text{C}=\text{C}-\text{C}$ и $\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$) и характерные дуплеты в области 1370-1380 см⁻¹ (деформационные колебания $\text{C}-\text{H}$) и группа полос в областях 3200-3300 см⁻¹ и 3900 см⁻¹ характеризует наличие солей гуминовых кислот (гуматы, Hum), это основные компоненты отложений. В некоторых образцах присутствуют острые пики при 3640 см⁻¹ и 3690 см⁻¹, характерные для кристаллических безводных щелочей $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Возможно в виде примеси наличие силикатов – очень слабая полоса при 1000 см⁻¹. И еще менее вероятно наличие сульфатов (1110 см⁻¹). В сравнении образцов можно отметить, что в образце 2.2 оксиды железа составляют большую часть отложений, а в образцах 2.3 и 2.4 большую часть составляют гуматы и еще появляются неорганические щелочи (образец 2.3).

Таким образом отложения на внутренней поверхности представлены продуктами коррозии металла и термоустойчивыми гумусовыми веществами. Последние легко переходят в пар из котловой воды (перегонка с паром) и оседают на поверхности трубок. Также в качестве примесей присутствуют минеральные вещества и силикаты, которые также в небольшом количестве переходят в пар.

Выводы

В результате теоретического исследования было выявлено, что при эксплуатации трубок пароперегревателей необходимо учитывать гидродинамику, которая характеризуется неравномерностью распределения температур и перегрева пара по параллельно включенным трубкам. Данное явление осложняется тем, что по ширине газохода трубы пароперегревателя обогреваются дымовыми газами неравномерно, в средней части газохода трубы получают больше тепла, чем по краям. Как правило, необходимо также учитывать коэффициент теплопередачи, который зависит от состава сжигаемого топлива, а именно его зольности и влажности. Данные критерии влияют на прочностные свойства конструкционного материала, из которого изготовлены трубки пароперегревателей. Но на эксплуатационную надежность трубок оказывают влияние не только внешние факторы, но и состав пара, который движется по трубкам. На внутренней поверхности трубок образуются отложения, которые интенсифицируют коррозионные процессы. Причина разрушения кроется в ВХР, который поддерживается на станции, так как продукты термического распада применяемых реагентов могут быть коррозионно опасны. Исследование отложений с применением ИК-спектроскопии позволит скорректировать ВХР и снизить количество отложений на внутренней поверхности.

В результате практического анализа отложений в трубках пароперегревателей на станциях Республики Казахстан было обнаружено, что коррозионные процессы идут довольно интенсивно, поэтому в отложениях преобладают продукты коррозии. Помимо соединений железа присутствуют термоустойчивые гумусовые вещества, а также замечены следы минеральных веществ и силикатов, которые растворены в паре.

Для снижения внутреннего износа трубок необходимо корректировать ВХР, анализировать применяемые реагенты, а также произвести постадийный анализ теплоносителя на каждом этапе очистки.

Литература

1. Власова А.Ю., Рахматуллин С.С., Окунева Л.А. Экологизация и повышение эффективности традиционной энергетики Польши на примере проекта бурогоугольной тепловой электростанции «TUROW» // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. 2021. С. 45-49.
2. Барочкин Е.В., Виноградов В.Н., Барочкин А.Е. Котельные установки и парогенераторы // ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2018. С. 339. ISBN 978-5-00062-308-4.
3. Барочкин А.Е., Жуков В.П., Шумилова М. С. и др. Оптимизация структуры и режима работы сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2020. С. 55-63.

4. Исаев В.Л., Корябкин А.А., Коневков А.М. Влияние высокотемпературной коррозии поверхностей теплообмена в топках котлов // Карагандинский государственный технический университет. Технические науки. 2019. С. 183-191 DOI: 10.24411/2500-1000-2019-11780.
5. Набоко Е.П., Чернышова Т.И. К вопросу об эксплуатации поверхностей нагрева парогенератора // Карагандинский государственный технический университет. Актуальные вопросы технических наук. 2014. С. 182-191.
6. Vlasov S.M., Vlasova A.Y., Chichirova N.D, et al. Research into bacterial contamination of the coolant of the chemical demineralization scheme at Kazan CHPP-1. Thermal engineering. 2022; 3 (69): 222-226.
7. Ходырев Б.Н., Федосеев Б.С. и др. Нормирование содержания органических веществ в пароводяном тракте энергоблоков, работающих на НКВР // Электрические станции. 2003. № 8. С. 16-19.
8. Ходырев Б.Н., Кричевцов А.Л., Соколюк А.А. Исследование процессов окисления органических веществ в теплоносителе ТЭС И АЭС // Теплоэнергетика. 2010. 7. С. 11-16.
9. Ходырев. Б.Н., Коровин В.А., Щербинина С.Д. и др. Проблемы термолитиза органических веществ в пароводяном контуре ТЭС // Энергетик. 1998. № 7. С. 23.
10. Мартынова О.И., Петров А.Ю. Влияние водно-химических режимов на поведение органических соединений (ацетатов и формиатов) в зоне фазового перехода паровых турбин // Теплоэнергетика. 1977. 12. С. 62-65.
11. Семенов Н.Н. Избранные труды. Т. 1. Цепные реакции. Кн. 2.М.: Наука. 2004.
12. Семенов Н.Н. Избранные труды. Т.3. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М.: Наука. 2005.
13. Кот А.А., Качество пара и отложение солей в пароперегревателях и а лопатках турбин // Электрические станции. 1950. 11. С. 178.
14. Липов Ю.М, Третьяков Ю.М, Котельные установки и парогенераторы. // Москва ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика. 2006. С. 591.
15. Filimonova A., Chichirov A., Chichirova N. et al Organic substances in process waters of a thermal power plant with a combined cycle gas turbine plant and methods for their detection. Lecture notes in civil engineering. 2022:247-256.
16. Filimonova A.A., Chichirova N.D., Chichirov A.A. et al Physical and chemical methods of organic impurities control in the feed water of waste heat boilers of thermal power plants. Journal of physics: conference series. 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1565/1/012028.
17. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Вафин Т.Ф и др. Техничко-экономическая оценка эффективности использования электромембранных технологий на отечественных ТЭС // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетика. 2012. 11-12. С. 14-26.
18. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Филимонов А.Г и др. Повышение эффективности реагентной предварительной очистки воды на казанской ТЭЦ-3 // Проблемы энергетика. 2010. №11-12. С. 53-60.

Авторы публикации

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

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

Власова Алена Юрьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные и тепловые электрические станции», Казанский государственный энергетический университет.

Орлов Александр Андреевич – докторант PhD, Евразийский национальный университет

References

1. Vlasova AYu, Rakhmatullin SS, Okuneva LA. Greening and improving the efficiency of traditional power engineering in Poland on the example of the project of brown coal thermal power plant «TUROW». *Ecological safety in the technosphere space*. 2021, pp. 45-49.
2. Barochkin EV, Vinogradov VN, Barochkin AE. *Boiler plants and steam generators*. Proc. Allowance. FGBOU VO «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin». 2018. P. 339. ISBN 978-5-00062-308-4.
3. Barochkin AE, Zhukov VP, Shumilova MS. et al. Optimization of the structure and operation mode of complex heat and mass transfer systems with multicomponent heat carrier. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2020.pp. 55-63.
4. Isaev VL, Koryabkin AA, Konekov AM. *Influence of high-temperature corrosion of heat exchange surfaces in boiler furnaces*. Karaganda State Technical University. Technical science. 2019. S. 183-191 doi: 10.24411/2500-1000-2019-11780.
5. Naboko EP, Chernyshova TI. *On the issue of operation of heating surfaces of a steam generator*. Karaganda State Technical University. Topical issues of technical sciences. 2014. pp. 182-191.
6. Vlasov SM, Vlasova AY, Chichirova ND. et al. Research into bacterial contamination of the coolant of the chemical demineralization scheme at Kazan CHPP-1. *Thermal engineering*. 2022; 3 (69): 222-226.
7. Khodyrev BN, Fedoseev BS. Rationing of the content of organic substances in the steam-water path of power units operating at NKVR. *Elektricheskie stantsii*. 2003;8:16-19.
8. Khodyrev BN, Krichevstov AL, Sokolyuk AA. Investigation of the processes of oxidation of organic substances in the heat carrier of thermal power plants and nuclear power plants. *Teploenergetika*. 2010;7:11-16.
9. Khodyrev. BN, Korovin VA, Shcherbinina SD. et al. Problems of thermolysis of organic substances in the steam-water circuit of TPP. *Energetik*. 1998;7:23.
10. Martynova OI, Petrov AYu. Influence of water-chemical regimes on the behavior of organic compounds (acetates and formates) in the phase transition zone of steam turbines. *Teploenergetika*. 1977;12:62-65.
11. Semenov NN. Selected works. T.1. *Chain reactions*. Book.2.M.: Science. 2004.
12. Semenov NN. Selected works. T.3. *On some problems of chemical kinetics and reactivity*. M.: Science. 2005.
13. Kot A.A. Steam quality and salt deposition in superheaters and turbine blades. *Power stations*. 1950;11:178.
14. Lipov YuM., Tretyakov YuM. *Boiler installations and steam generators*. Moscow ; Izhevsk: Regular and chaotic dynamics. 2006. P. 591.
15. Filimonova AChichirov A, Chichirova N. et al Organic substances in process waters of a thermal power plant with a combined cycle gas turbine plant and methods for their detection. *Lecture notes in civil engineering*. 2022;247-256.
16. Filimonova AA, Chichirova ND, Chichirov AA. et al Physical and chemical methods of organic impurities control in the feed water of waste heat boilers of thermal power plants. *Journal of physics: conference series*. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1565/1/012028.
17. Chichirova ND, Chichirov AA, Vafin T.F. et al. Technical and economic assessment of the efficiency of using electromembrane technologies at domestic thermal power plants. *Energy problems*. 2012;11-12:14-26.
18. Chichirova ND, Chichirov AA, Filimonov AG. et al. Improving the efficiency of reagent pretreatment of water at Kazan CHPP-3. *Energy problems*. 2010;11-12:53-60.

Authors of the publication

Natalia D. Chichirova – Kazan State Power Engineering University.

Andrey A. Chichirov – Kazan State Power Engineering University.

Alyona Yu. Vlasova – Kazan State Power Engineering University.

Alexander A. Orlov – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan.

Получено ***12.08.2022г***

Отредактировано ***20.08.2022г.***

Принято ***01.09.2022г.***



БИОДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО. ЧАСТЬ II. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ, УЧАСТВУЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ БИОДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАБОЧИХ СРЕД В СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ФЛЮИДНОМ СОСТОЯНИИ

**Мазанов¹ С.В., Зарипов¹ З.И., Гумеров¹ Ф.М., Усманов¹ Р.А.,
Шаповалов² Ю.А.**

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казань, Россия

² Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы,
Республика Казахстан
serg989@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Цель работы заключалась в систематизации результатов работ отечественных и иностранных авторов по теплофизическим свойствам сред и веществ, участвующих в процессе получения биодизельного топлива. МЕТОДЫ. Для измерения изобарной теплоемкости преимущественное использование отдано методам теплопроводящего и сканирующего калориметров, измерение коэффициента теплопроводности методом нагретой нити. Кинематическая и динамическая вязкости измерены, соответственно, на стандартных стеклянных вискозиметрах при атмосферном давлении и по методу падающего груза. РЕЗУЛЬТАТЫ. Приведены результаты исследования широкого спектра теплофизических свойств термодинамических систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива в сверхкритических флюидных условиях. Вниманию уделено плотности, изобарной теплоемкости, теплопроводности, динамической и кинематической вязкости как исходного сырья, так и получаемого биодизельного топлива, представленные в широком диапазоне изменения температур и давлений, включая околокритическую, а также при учете тепловых эффектов, вызванных растворением и изменением структур веществ под воздействием флюидного реагента. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Представленные данные будут необходимы на этапах проектирования и масштабирования той или иной технологии по получению биодизельного топлива, как в лабораторных масштабах, так и на промышленном уровне.

Ключевые слова: плотность; изобарная теплоемкость; теплопроводность; динамическая и кинематическая вязкость; растительные масла; биодизельное топливо; сверхкритическое флюидное состояние.

Для цитирования: 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.

BIODIESEL FUEL. PART II. THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SYSTEMS PARTICIPATED IN THE PROCESS OF OBTAINING BIODIESEL FUEL USING WORKING MEDIA IN THE SUPERCRITICAL FLUID STATE

**SV. Mazanov¹, ZI. Zaripov¹, FM. Gumerov¹, RA. Usmanov¹,
YuA. Shapovalov²**

¹ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

² Kazakh National University named al-Farabi, Almaty, Republic of Kazakhstan
serg989@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The purpose of the work was to systematize the results of the work of domestic and foreign authors on the thermophysical properties of media and substances involved in the process of obtaining biodiesel fuel. *METHODS.* To measure the isobaric heat capacity, the predominant use is given to the methods of heat-conducting and scanning calorimeters, the measurement of the thermal conductivity by the heated filament method. Kinematic and dynamic viscosities are measured, respectively, on standard glass viscometers at atmospheric pressure and by the drop weight method. *RESULTS.* The results of a study of a wide range of thermophysical properties of thermodynamic systems involved in the process of obtaining biodiesel fuel under supercritical fluid conditions are presented. Attention is paid to the density, isobaric heat capacity, thermal conductivity, dynamic and kinematic viscosity of both the feedstock and the resulting biodiesel fuel, presented in a wide range of temperature and pressure changes, including near-critical, as well as taking into account the thermal effects caused by the dissolution and change in the structures of substances under the influence of fluid reagent. *CONCLUSION.* The presented data will be necessary at the stages of designing and scaling a particular technology for the production of biodiesel fuel, both on a laboratory scale and at an industrial level.

Keywords: density; isobaric heat capacity; thermal conductivity; dynamic and kinematic viscosity; vegetable oils; biodiesel fuel; supercritical fluid state.

For citation: Mazanov SV, Zaripov ZI, Gumerov FM, Usmanov RA, Shapovalov YuA. Biodiesel fuel. part ii. thermophysical properties of systems participated in the process of obtaining biodiesel fuel using working media in the supercritical fluid state. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):35-60. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-35-60.

Введение

Проектирование и расчет процессов и аппаратов для реализации СКФ технологий возможен при наличии надежных теплофизических свойств (коэффициенты теплового расширения, изобарной теплоемкости и др.) веществ, участвующих в данной реакции - растительного масла и спирта и их смесей, в широком диапазоне изменения температур и давлений, включая околокритическую, а также при учете тепловых эффектов, вызванных растворением и изменением структур веществ под воздействием флюидного реагента.

Представленные ниже результаты экспериментальных данных по теплофизическим свойствам систем, участвующих в процессе получения биодизельного топлива с использованием рабочих сред в сверхкритическом флюидном состоянии, являются логическим продолжением первой части обзора, посвященному способам получения биодизельного топлива [1], и носят обзорный характер работ преимущественно зарубежных авторов.

Плотность растительных масел.

Одно из наиболее важных теплофизических свойств растительных масел представлено плотностью. Обзор литературы показывает, что существуют очень ограниченные данные о плотности растительных масел при высоких температурах и давлениях. В архиве было найдено всего несколько источников [2-3]. Дальнейший поиск несколько расширил этот список [4-14]. Детальных исследований плотности растительных масел в широком диапазоне температур и давлений нет. Существуют очень ограниченные данные по плотности растительных масел в широком диапазоне температур и давлений. Наибольший разрыв в базе данных обнаружен PvT свойствами измерения при высоких температурах и высоких давлениях. Большинство сообщаемых данных о плотности охватывают ограниченный диапазон температур (от 283 до 388 К) и атмосферное давление (табл.1).

Таблица 1

Плотность растительных масел по литературным данным

Растительное масло	Интервал температур, К	Интервал давлений, МПа	Авторы	Метод измерения
Рапс, кукуруза, соя, молочай, лескерелла	294-383	0,098	Н. Nouredдини [3]	РЭС

Подсолнечник, кукуруза, оливки	298,15	0,098	D. Rudan-Tasic [5]	РУС
Рапс, подсолнечник, соя, пальма, кукуруза, виноградная косточка	283-413	0,098	Esteban [7]	гидрометры
Кастор, менхаден, льняное семя, олива, перилла, сафлор, кунжут, соя	303,313, 333, 353	0,098-150	Acosta [10]	VVP
Подсолнечник, кукуруза, оливки, хлопок, семена, кунжут, соя	293-563	0,098-49,1	Safarov [11]	НВ
Оливки, сафлор, лен, кастор	298÷363	0,098-400	Werner M [12]	интерферометр Жамина
Подсолнечник, оливки	288, 328	0,098-350	Guignon [13]	VTD, VVP
Подсолнечник, кастор, рапс, соя	283,15-363,15	0,098-45	Freitas [14]	VTD

РУС - pycnometer; VVP - variable-volume piezometer; НВ - hydrostatic weighing; VTD - vibrating tube densimeter

Н. Nouredдини [3] представил данные по плотности как функции температуры для ряда растительных масел (сыра, рапса, кукурузы, сои, молочая, кокосового ореха, лескуереллы), а также для восьми жирных кислот в диапазоне от С9 до С22, при температурах их плавления до 110 °С. Измерение плотности выполняли с помощью пикнометров. Константы корреляции, основанные на экспериментальных данных, представлены для расчета плотности жирных кислот и растительных масел в диапазоне температур от 24 °С или температуры плавления вещества до 110 °С. Только одна экспериментальная информация о плотности для набора растительных масел, сообщенная Esteban [7], доступна при температурах от (283 до 413 К). Они измеряли плотность и вязкость 6 образцов растительных масел и 2 образцов дизельного топлива (*Rapeseed, Sunflower, Soybean, Palm, Corn, Grapeseed, Diesel, BD100*) с использованием калиброванных ареометров и вискозиметра гравитационного потока типа Кэннона-Фенске. Coupland и др. [2] обобщили литературные значения теплофизических свойств для ряда пищевых масел при 293 К, в том числе и плотности, в виде ряда эмпирических уравнений для расчета температурной зависимости этих параметров. Halvorsen и соавт. [4] оценили плотность жидкости растительных масел с помощью модифицированного уравнения, предложенного Rackett [16], используя свойства смеси, соответствующие составу жирных кислот, и поправку на форму триглицеридов с точностью до 0,14 %. Rodenbush и др. [6] разработали обобщенный метод оценки плотности жидкости растительных масел и жирных кислот, основанный на критических свойствах жирных кислот и составе масла. Simion и соавт. [9] сообщили новый обобщенный метод для нахождения математических корреляций между температурой и типом масла, с плотностью и вязкостью для десяти растительных масел (оливкового, арахисового, кунжутного, миндального, хлопкового, кукурузных зародышей, подсолнечника, сои, виноградных косточек и льна).

Исследования при высоких давлениях для ряда растительных масел было сделано в работах Acosta и др. [10], Safarov [11], Guignon и соавт. [13], Freitas и др. [14], а также Werner [12]. Acosta и др. [10] сообщили о PVT данных говяжьего хвоста, говяжьего жира, кокосового ореха, пальмы и косточек пальмового масла и касторового масла, менхадена, льняного семени, оливкового масла, периллы, сафлора, кунжута и соевого масла, каждое из которых характеризовалось распределением жирных кислот, йодным числом и значением омыления, а также чистых компонентов трилаурина, триолеина и тридекана. PVT данные были измерены с помощью сильфонного устройства статического типа. Исследования проведены для температур от 303 К до 353 К и давления до 150 МПа с точностью до 0,0001 см³ г⁻¹. Для корреляции плотности исследованных жиров и масел в интервале температур от 303 К до 353 К и давления до 150 МПа использовали уравнение состояния Тейта (EoS) [16], и упрощенное уравнение теории возмущенных жестких цепей (SPHCT) [18]. В [11] сообщается об экспериментальных исследованиях теплофизических свойств, в том числе и плотности, растительных масел (подсолнечника, кукурузы, оливок, хлопчатника, кунжута, сои и др.) в интервале температур 293,8 - 563,4 К и в диапазоне давлений 0,101 - 49,1 МПа. Плотности определены методом гидростатического взвешивания (*HW- hydrostatic weighing*) с точностью до 0,1%. У Guignon и соавт. [13] определены объемные свойства рафинированного подсолнечного масла и рафинированного оливкового масла. Диапазон

давлений до 350 МПа и температур от 15 до 55 °С. Удельный объем при атмосферном давлении определен с помощью денсиметра (*Density Meter DMA5000, Anton – Paar GmbH, Грац, Австрия*) (точность $1 \times 10^{-8} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$). Удельный объем при высоком давлении измерен с помощью цилиндрического пьезометра переменного объема (точность $2 \times 10^{-7} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$). Используемое уравнение состояния типа Тейта позволило рассчитать удельный объем со средней относительной погрешностью менее 0,06 % для обоих масел в диапазоне давлений от 0,1 до 350 МПа и температур от 15 до 55 °С. Freitas и др. [14] опубликованы результаты измерения и моделирования плотности семи растительных масел (соевое, рапсовое, касторовое, пальмовое, подсолнечное, *Aleurites moluccana* и *Jatropha curcas*) при температурах от 283,15 до 363,15 К и давлениях от 0,1 до 45 МПа. Использованы для измерения плотности денситометр с вибрирующей трубкой Anton Paar 512P. Погрешность определения плотности не более $10^{-4} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Данные коррелировались с использованием модифицированного уравнения Тейта-Таммана, и эти данные использовались для оценки прогнозирующих способностей модели Халворсена, подхода, основанного на фрагментах, и пересмотренного метода вклада группы GCVOL. Температурная зависимость плотности масел была описана с OARD (0,34, 1,1 и 1,2 %, соответственно). Werner [12] исследовано влияние давления на теплопроводность и плотность четырех (оливкового, сафлорового, льняного и касторового) масел до 400 МПа в интервале температур от 283 до 333 К. Измерения теплопроводности проводились с помощью адаптированного к высокому давлению метода горячей проволоки, а измерение плотности оливкового масла с помощью интерферометра высокого давления. Плотность оливкового масла определялась с точностью до 0,3 % с помощью интерферометра Jamin.

Плотность биодизельного топлива

В литературе обычно сообщается об измерениях плотности биодизельного топлива, выполненных вблизи температуры окружающей среды (от 285 до 295 К) и атмосферного давления [18-24], и о нескольких измерениях этого свойства сообщалось в более широких диапазонах температур [25-39]. Исследование при высоких давлениях было сделано в работах Pratas и др. [30], Tat и Ван Герпен [31], Albo и др. [32], Miškov и др. [33], Николич и соавт. [34], Aparicio и др. [35], Dzida и Prusakiewicz [36], а также Chhetri и Watts [37] и Schedemann и др. [38]. Для описания плотности чистых метиловых эфиров жирных кислот в работах [30,38-41] использованы различные виды уравнений состояния такие как уравнение состояния Тейта (EoS) [30,35,38], *cubic-plus-association equation of state (CPA EoS)* [39,40] и переведенное по объему уравнение состояния Пенга-Робинсона (PR) (VTPR EoS) [42]. Pratas и др. [30] для корреляции плотности эфиров биодизельного топлива из пальмового (P), соевого (S) и рапсового (R) масел, бинарных (RP, SP, SR) смесей и тройных смесей (SRP) для температур от 283 К до 333 К и давления до 45 МПа использовал уравнение состояния Тейта. Schedemann [38] использовал уравнение Тейта для корреляции данных по метиллинолеату при температурах от 278 до 367 К и давлениях от 0,4 до 130 МПа. Относительные отклонения плотности, полученные из этих корреляций, обычно были ниже 0,01 %. Для прогнозирования данных о плотности эфиров и биодизельного топлива Pratas и др. [30] применили *cubic-plus-association equation of state (CPA EoS)* для корреляции плотности чистого FAME, а рассчитанные параметры чистого компонента были применены для прогнозирования плотности биодизельного топлива с отклонениями в диапазоне от 0,79 % до 2,5 %. CPA EoS сочетает вклад от EoS кубической плотности (EoS Соаве-Редлиха-Квонга) с термином ассоциации, которая учитывает эффекты межмолекулярной водородной связи и сольватации, исчезающей для неассоциированных компонентов, таких как сложные эфиры. Schedemann и др. [38] использовали метод *volume translated Peng-Robinson PR VTPR* для прогнозирования данных о плотности метиллинолеата и биотоплива. Для биодизельного топлива отклонения ≈ 1 % были найдены при 396,8 К и давлениях до 55 МПа, а при температурах ниже 386,9 К и давлениях до 130 МПа отклонения изменялись от 1 до 7 %. Оливейра и соавт. [43] с помощью SAFT EoS прогнозировали плотности FAMEs и биодизелей, измеренных Pratas и др. [30] со средним отклонением в 0,49 %. Донг и соавт. [44] впервые применили уравнение состояния PC-SAFT с использованием методов группового вклада для расчета параметров и прогнозирования FAMEs и плотности биодизельного топлива с отклонением в плотности менее 0,5 %, а для данных плотности топлива, изученных Pratas и др. [30] в пределах 1 %. Метод группового вклада, разработанный для прогнозирования молярного объема (GCVOL) Pratas и др. [45] распространен на высокие давления. Прогнозные значения плотности биодизельного топлива были получены с относительными отклонениями от 0,2 % до 0,7 %. Пересмотренное Мэн и соавт. [46] модифицированное уравнение Spencer [47] позволило прогнозировать плотность биотоплива в широком диапазоне температур (от 298 до 523 К)

при атмосферном давлении с максимальным отклонением в 0,42 %. Используя фундаментальные соотношения термодинамики, в частности, свободной энергии Гельмгольца, плотность биодизельного топлива была предсказана в пределах отклонения 0,6 % для температур между 278 К и 333 К. В работе [48] на основе базы данных экспериментальных (*PVT*) измерений 18 образцов биотоплива для моделирования плотности использовал уравнения состояния Гохаршади – Морсали-Аббаспура (*GMA EoS*) со средним относительными отклонениями в пределах 0,02 %. Из линейной зависимости между плотностью и степенью ненасыщенности (*DU*), которая зависела от состава *FAMEs* биодизельного топлива, получена новая прогностическая модель. Эта модель показала заметные улучшения в контексте прогнозирования плотности при высоком давлении по сравнению с другими уравнениями состояния. Пересчет постоянных модели с корреляцией плотности метилпальмитата [49], метилолеата [30,50] и метиллинолеата [49] давала стандартное отклонение 0,43 %. *Schaschke* и др. [51] провели измерения и моделирование плотности различных дизельных топлив, полученных на британских нефтеперерабатывающих заводах, при повышенных давлениях до 500 МПа и температурах в диапазоне от 298 К до 373 К. Полученные данные коррелировали с использованием модифицированного уравнения Тейта-Таммана, и эти данные использовались для оценки сжимаемости жидкости. *Perdomo* и др. [52] реализована обобщенная теория SAFT-g для моделирования как гидроксильированных, так и обычных биодизельных соединений алкиловых эфиров (*H-FAME*, насыщенный и ненасыщенный *FAME*) для прогнозирования этих свойств в биодизельном топливе путем адекватного представления физического поведения и стереохимии молекул биодизельного топлива. Теория обеспечивает очень хорошее описание поведения равновесия паров жидкостей для химических семейств, используемых для оценки набора параметров. С помощью предложенной модели любое потенциальное биодизельное топливо из любого сырья может быть представлено и смоделировано. *Perdomo* и др. [52] считают реализованный подход многообещающим и широко применимым, поскольку он позволяет варьировать важные молекулярные параметры и оценивать его влияние на макроскопические свойства топлива биодизельных систем.

Плотность систем спирт/масло

Объемные свойства играют важную роль в конструкции непрерывных сверхкритических реакторов, поскольку плотность реагирующей смеси определяет время пребывания в реакторе. Плотность является очень чувствительной переменной по отношению к давлению и температуре вблизи критической области с высокими параметрами проведения процесса ($P = 25\text{--}40$ МПа, $T > 513$ К) и высокими мольными соотношениями «спирт/масло» (40:1 и выше), поэтому она становится критической переменной для правильного управления работой реактора. Однако этот тип информации редко доступен в рабочих условиях. Детальных исследований плотности систем спирт/масло в широком диапазоне температур и давлений нет. Существуют очень ограниченные данные по плотности систем спирт/масло. Наибольший разрыв в базе данных обнаружен для измерения *PvT* свойств спирт/масло в около- и сверхкритическом флюидном состоянии одного из компонентов (спирта) при высоких температурах и высоких давлениях.

В таблице 2 представлена сводка измерений плотности для систем спирт/масло. Литературный опрос показал, что для этих систем под давлением и при высоких температурах данные о теплоемкости ограничены. Поиск литературы проводился на основе собственных изысканий.

Таблица 2

Сводка литературных данных плотности систем спирт/масло

Сырье	Интервал температур, К	Интервал давлений, МПа	Авторы	Метод измерения
Метанол + соевое масло + пропан	543-588	7-21,1	Hegel [53]	изохорный метод
Растительные масла + метанол; кокосовое масло + метанол; метилолеат + метанол	550–630 К	0,098-32	Velez [54]	изохорный метод

Продолжение таблицы 2

Подсолнечное масло + чистый и азеотропный этанол	553–623	12,0–35,0	Velez [55]	изохорный метод
Этилацетат + пальмовое масло	303–673	0,3–15	Komintarachat [56]	изохорный метод
Метанол + пальмовое масло	373–693	1–16	Sakdasri [57]	изохорный метод
Рапсовое масло + этанол	273,15.0÷333,15	0,098	Barabás [58]	плотномер с вибрационной трубкой

Barabás и др. [58] представил данные по плотности как функции температуры десяти бинарных смесей биодизельного топлива, изготовленных из рапсового масла и этанола. Образцы были измерены для восьми температур в диапазоне от 273,15 до 333,15 К с использованием денситометра Anton Paar DMA 4500 М. Константы корреляции, основанные на экспериментальных данных, представлены для расчета избыточного молярного объема и избыточного коэффициента теплового расширения в виде полиномиального уравнения типа Редлиха-Кистера. Исследования плотности при высоких параметрах состояния при различных мольных соотношениях спирт/масло было сообщено в работах Hegel и др. [53], Velez [54,55], Komintarachat и соавт. [56], Sakdasri и др. [57], а также Cotabarren [59]. В этих работах плотность была измерена изохорным методом [60,61], наиболее простым и надежным способом для измерения плотности смеси и нахождения условий гомогенной работы сверхкритических химических реакторов при высокой температуре и давлении. Hegel et al [53] сообщили о PvT системы метанол/соевое масло/пропан. PvT данные были измерены в реакторе с фиксированным объемом. Исследования проведены для температур от 543 К до 588 К и давлений от 7 до 21,1 МПа с точностью до $0,0001 \text{ см}^3 \text{ г}^{-1}$ с фиксацией фазовых переходов, которые заканчиваются либо гомогенной сверхкритической жидкостью, либо плотной жидкой фазой, либо гетерогенной парожидкостной системой. Фазовые переходы описаны с использованием модели GCA-EOS [62,63]. В [54,55] сообщают об экспериментальных исследованиях плотности смеси растительных масел + метанола (кокосовое масло + метанол и метилолеат + метанол) в интервале температур 550–630 К и в диапазоне давлений 0,098–32 МПа. Измерены плотности подсолнечного масла с метанолом для двух различных соотношений спирт / масло, а именно, 40:1 и 25:1. Влияние глобальной плотности на конверсию изучено за длительное время реакции (3–4 часа). Наличие фазовых переходов реагирующих смесей от гетерогенных к гомогенным были получены из экспериментальных результатов.

Velez и др. [61] приводят экспериментальные данные о непрерывном процессе сверхкритического этанолиза подсолнечного масла. Данные были получены для мольного отношения этанола к маслу 40:1 при трех разных температурах (573, 593 и 618 К). Для прогнозирования удельного объема при различных рабочих условиях экспериментальные данные для реакционной смеси [64] были смоделированы с помощью PR-EoS. Sakdasri [57] сообщили об исследованиях фазового поведения системы метанол-пальмовое масло при мольном соотношении 12:1. Измерения проводили при температурах от 363 до 393 К и давлениях от 1 до 4 МПа. Для ограничения влияния возможной реакции переэтерификации, протекающей при температуре выше 423 К, использовались низкие температуры. Результаты опытов сравнивались и моделировались. Сравнительное моделирование фазового равновесия системы метанол – трипальмитин было выполнено с использованием уравнения состояния Пенга – Робинсона (PR EoS) с модифицированными правилами смешивания Гурона – Видала (MHV2) второго порядка в сочетании с универсальным коэффициентом функциональной активности, моделью (UNIFAC) и универсальной квазихимической (UNIQUAC) моделью избыточной свободной энергии Гиббса. Согласие между экспериментальными результатами и результатами моделирования оказалось удовлетворительным, если правила смешивания MHV2 используются в сочетании с моделью UNIQUAC. Для предсказания жидкофазных равновесий переэтерификации пальмового масла сверхкритическим метанолом была применена термодинамическая модель. Изохорным методом было найдено, что в диапазоне температур 373–693 К и диапазоне давлений 1–16 МПа модель предсказывает поведение смеси в целом. Komintarachat [56] приводит данные о плотности смеси этилацетат-пальмовое масло в

сверхкритическом состоянии ($T=303\div 673$ К, $P=0,3\text{--}15$ МПа) при мольных соотношениях 10:1, 20:1 и 30:1. Исследовано влияние мольного соотношения и общей плотности смеси на превращение области жидкость-жидкость в однофазную смесь. Определены приблизительно точки фазового перехода из области жидкость-пар в СКФ область. Cotabarren [59] с использованием уравнения состояния *RK-PR* удалось предсказать плотность смесей на основе подбора параметров чистого соединения и бинарного взаимодействия для данных о давлении пара и плотности насыщенной жидкости и точек насыщения бинарной смеси. Ими смоделировано поведение сверхкритического реактора, используемого для переэтерификации подсолнечного масла. В этой работе показано, что *RK-PR* с несколькими неактивными асимметричными бинарными системами способно точно прогнозировать данные *PvT* на основе корреляции нескольких экспериментальных точек фазового перехода, полученного Velez [54,55]. Они смогли предсказать объемные свойства многокомпонентной системы с помощью уравнения состояния *RK-PR*.

Изобарная теплоемкость

Одним из ключевых теплофизических свойств необходимых для моделирования и тепловых расчетов является теплоемкость. Что касается теплоемкости растительных масел, то они хорошо исследованы при атмосферном давлении [2, 65-68] в широком интервале температур и для них предложены различные расчетные методы [69,70]. О теплофизических свойствах продуктов реакции переэтерификации (сложных эфиров жирных кислот) сообщалось ранее несколькими авторами [27,71-74]. К сожалению, существуют очень ограниченные измерения теплоемкости как растительных масел, так и смеси растительное масло + спирт, особенно в сверхкритической спиртовой среде. Литературное исследование показало, что есть несколько данных о теплоемкости (*C_p*) для смесей растительное масло + спирт в сверхкритических условиях (табл.3).

Таблица 3

Перечень работ и параметров по измерению теплоемкости масел и смесей со спиртом

Вещество	Мольное соотношение спирт масло	Интервал изменения температур, К	Интервал изменения давления, МПа	Неопределенность	Авторы	Метод измерения
Подсолнечник, кукуруза, оливки, хлопок, кунжут, соя	-	293-563	0.098-49,1	2.6	Savarov [11]	MW
Масло рапсовое	—	295, 380	0,098÷1100	n/a	Larsen [75]	THW
Масло оливковое	-	298	1,167÷350	n/a	Bogdan [76]	Производные данные
Масло соевое	-	298	0,1÷600	n/a	Nguyen [77]	THW

MW-method of monotonic warming; THW- transient hot-wire method; IHCC- isothermal heat conduction calorimeter. Производные данные - полученные из акустических (скорости звука) измерений при высоких давлениях.

Timms [65] рассмотрели основные физические свойства, эмпирические физические свойства и фазовое поведение и полиморфизм пальмового масла (PO), пальмового масла из косточек (PK) и кокосового масла (CN). Установили закономерности изменения теплоемкости от йодного числа и температуры. Coupland [2] и др. представили данные по теплоемкости 9 масел (подсолнечного, кукурузного, оливкового, рапсового, хлопкового, арахисового, пальмового, сафлорового, соевого). Coupland и др. [2] также обобщили литературные значения теплофизических свойств для ряда пищевых масел при 293 К, в том числе и теплоемкость в виде ряда эмпирических уравнений для расчета температурной зависимости этих параметров. Только одна экспериментальная работа говорит о теплоемкости для набора растительных масел, сообщенная Fasina [66]. Они доложили о вязкости и удельной теплоемкости двенадцати растительных масел, которые были определены в интервале температур от 35 до 180 °С. Rojas [69] доложили данные о теплофизических свойствах (теплопроводность, теплоемкость, плотность и вязкость) хлопкового, рапсового, подсолнечного, кукурузного и соевого масел. Свойства были измерены при атмосферном давлении в интервале температур 299,15–433,15 К. Теплоемкость определяли нестационарным методом в цилиндрическом бикалориметре. Результаты по теплоемкости от температуры обработали по линейной модели.

Результаты по теплоемкости масел при высоких давлениях представлены в [11,75-

77]. В [11] сообщается об экспериментальных исследованиях теплофизических свойств, в том числе и теплоемкости растительных масел (подсолнечника, кукурузы, оливок, хлопчатника, кунжута, сои и др.) в интервале температур 293,8 - 563,4 К и давлений 0,101 - 49,1 МПа. Теплоемкость определили методом монотонного нагрева с точностью до 2,6 %. Nguyen [77] измерили теплопроводность, температуропроводность, объемную удельную теплоемкость и изобарную удельную теплоемкость пищевых продуктов, а также соевого масла, при температуре 298 К и давлениях до 600 МПа нестационарным методом (двухигольным зондом). Максимальная совокупная неопределенность при измерении теплопроводности, температуропроводности, объемной удельной теплоемкости и изобарической удельной теплоемкости составила 3,1, 6,8, 6,6 и 6,9 %, соответственно. Объемную теплоемкость рапсового масла при давлениях до 1100 МПа при двух температурах (295К, 380К) опубликовал Larsson [75]. Результаты получены нестационарным методом горячей проволоки. Погрешность метода по данным авторов ± 5 %. Bogdan и др. [76] опубликовали результаты расчета теплоемкости оливкового масла при давлениях до 350 МПа через скорость звука при температуре 298 К. Они обнаружили наличие максимума теплоемкости при давлении 128 МПа, что указывает на фазовый переход.

Теплопроводность масел и смесей «спирт/масло».

Высокие параметры проведения процесса проведения реакции переэтерификации растительных масел в суб- и сверхкритическом состояниях спирта требуют информацию о переносных свойствах таких систем, такие как теплопроводность. Что касается теплопроводности растительных масел, то они хорошо исследованы при атмосферном давлении [2,69,78-84] в широком интервале температур и для них предложены различные расчетные методы [84,85]. О теплофизических свойствах продуктов реакции переэтерификации (сложных эфиров жирных кислот) сообщалось ранее несколькими авторами [26,71-73,86]. К сожалению, существуют очень ограниченные измерения теплопроводности как растительных масел, так и смеси растительное масло + спирт и отсутствуют особенно в сверхкритической спиртовой среде. Coupland [2] и др. опубликовали обзор литературных данных по теплопроводности 9 масел (подсолнечного, кукурузного, оливкового, рапсового, хлопкового, арахисового, пальмового, сафлорового, соевого), а также обобщение литературных значения теплофизических свойств для ряда пищевых масел при 293 К (теплопроводность и другие свойства) в виде ряда эмпирических уравнений для расчета температурной зависимости этих параметров. Brock и др. [80] представили экспериментальные данные при температурах от 293 К до 343 К по теплопроводности и динамической вязкости рафинированных растительных масел: сои, кукурузного масла, подсолнечника, хлопкового масла и оливкового масла. Результаты получены с помощью анализатора тепловых свойств (Decagon Inc., модель KD2) нестационарным методом горячей проволоки. Значения теплопроводности представлены в виде линейной модели. Отклонения полученных значений от экспериментальных не превышают точности измерения ± 2 %. Wu и др. [78] доложили о результатах исследования теплопроводности монобутилового эфира этиленгликоля, диметилового эфира, метилэтилкетона, касторового масла и растительного масла в жидкой фазе, близкой к насыщенной методом горячей проволоки с неопределенностью результатов измерения в 2 %. Данные получены в диапазоне температур от 229 до 375 К и атмосферном давлении, скоррелированы как полиномиальная функция температуры с абсолютным средним отклонением от экспериментальных данных менее 0,4 % и максимальным отклонением менее 0,6 %. Более широкий интервал температур представили Rojas и др. [69], они доложили данные о теплофизических свойствах (теплопроводность, теплоемкость, плотность и вязкость) хлопкового, рапсового, подсолнечного, кукурузного и соевого масел. Свойства были измерены при атмосферном давлении в интервале температур 299,15–433,15 К. Теплопроводность определяли стационарным методом коаксиальных цилиндров. Результаты по теплопроводности от температуры обработали по линейной модели. Теплопроводность трех масел (подсолнечного, кукурузного и оливкового) определили Turgut и др. [79] при температуре 298, 313, 333 и 353 К, но уже методом горячей проволоки. Hoffmann и др. [82] сообщили о результатах исследований теплопроводности масел рапса, сои, подсолнечника, пальмы, копры, хлопка и яatroфы в диапазоне температур от температуры окружающей среды до 503 К. Для измерений применен термозонд с горячей проволокой с переменным возбуждением и блокировкой. Воспроизводимость зонда оценивается авторами в 1,2 %, неопределенность данных в 2 %. Zongo [84] опубликовал данные по теплофизическим свойствам, включая и теплопроводность рапсового масла, масла яatroфы до температуры 523 К. В этой статье помимо экспериментальных измерений

и методов оценки свойств растительных масел рассмотрены корреляционные методы с использованием подхода группового вклада для каждого свойства и сравнение экспериментальных данных с прогнозируемыми значениями свойств. Zongo [84] показали, что теплопроводность хорошо предсказывается Sastri-методом с абсолютной погрешностью ниже 7,75 % для масел рапса и яatroфы. Atgur и др. [83] опубликовали работу об исследованиях в диапазоне 298÷353K методом плоского слоя теплопроводности двух масел (подсолнечное масло и кукурузное масло) с неопределенностью до 2 %. Vozárová и др. [81] исследовали температурную зависимость теплопроводности и других теплофизических свойств трех образцов растительных масел: рапсового, подсолнечного и оливкового. Нестационарный метод с источником тепла (метод горячей проволоки) и аппаратом ISOMET 2104 (Applied Precision) использовался для измерения теплопроводности и температуропроводности в интервале температур от 283 К до 313 К. В этом интервале температур теплопроводности представлены линейными зависимостями.

Результаты по теплопроводности масел при высоких давлениях представлены в [11,12,75,77,86,87]. В [11] сообщают об экспериментальных исследованиях теплофизических свойств, в том числе и теплопроводности, растительных масел (подсолнечника, кукурузы, оливок, хлопчатника, кунжута, сои и др.) в интервале температур 293,8 - 563,4 К и давлений 0,101 - 49,1 МПа. Теплопроводность определили методом цилиндрического бикалориметра с точностью до 4,5%. Nguyen [77] измерили теплопроводность, температуропроводность, объемную удельную теплоемкость и изобарную удельную теплоемкость пищевых продуктов, а также соевого масла, при температуре 298 К и давлениях до 600 МПа нестационарным методом (двухигольным зондом). Максимальная совокупная неопределенность при измерении теплопроводности составила 3,1 %. Werner [12] исследовали влияние давления на теплопроводность и плотность четырех масел (оливкового, сафлорового, льняного и касторового) до 400 МПа в интервале температур от 283 до 333 К. Измерения теплопроводности проводились с помощью адаптированного к высокому давлению метода горячей проволоки. Они получили, что барическая зависимость теплопроводности этих растительных масел коррелируется с коэффициентом изотермической сжимаемости, а температурная с изобарическим коэффициентом теплового расширения. Получено хорошее согласие с колебательной теорией теплопроводности Хорроксу и Маклафлина. Из этой модели установлена связь между теплопроводностью и плотностью в виде $(\lambda / \lambda_0) (F / F_0) g$. Исследование теплопроводности рапсового масла при давлениях до 1100 МПа при двух температурах (295K, 380K) опубликовал Larsson [75]. Результаты получены нестационарным методом горячей проволоки. Погрешность метода по данным авторов ± 5 %. Результаты показали, что удельная теплопроводность удваивается при увеличении давления до 1 ГПа.

Динамическая и кинематическая вязкости масел

Одно из наиболее важных теплофизических свойств растительных масел представлено вязкостью. Обзор литературы показывает, что существуют очень ограниченные данные о вязкости растительных масел при высоких температурах и давлениях. Вязкости растительных масел хорошо исследованы при атмосферном давлении [2,66,69,80,88-90], в широком интервале температур и для них предложены различные расчетные методы [9,71,91]. Большинство сообщаемых данных о вязкости охватывают ограниченный диапазон температур (от 283 до 388 К) и атмосферное давление. Coupland и др. [2] обобщили литературные значения теплофизических свойств для ряда пищевых масел при 293 К, в том числе и вязкости, в виде ряда эмпирических уравнений для расчета температурной зависимости этих параметров. Н. Nouredini [88] представил данные по вязкости как функции температуры для ряда растительных масел (сыра, рапса, кукурузы, сои, молочая, кокосового ореха, лескуереллы), а также для восьми жирных кислот в диапазоне от C9 до C22, при температурах их плавления до 383 К. Измерение вязкости выполняли с помощью стеклянных капиллярных кинематических вискозиметров. Константы корреляции, основанные на экспериментальных данных, представлены для расчета вязкости жирных кислот и растительных масел в диапазоне температур от 297 К или температуры плавления вещества до 383 К. Abramovic и др. [89] определяли при температурах от 298,15 до 328,15 К динамические вязкости для ряда растительных масел (нерафинированное подсолнечное масло, рафинированное подсолнечное масло, оливковое масло, рафинированное кукурузное масло, нерафинированное тыквенное масло, смесь рафинированного растительного масла и нерафинированного тыквенного масла). Динамическая вязкость образцов масла определялась с помощью вискозиметра Ubbelohde. Экспериментальные данные по вязкости описаны эмпирическими уравнениями, и

представлены константы корреляции для данных. Несколько больший диапазон температур вязкости сообщили Ogoian и др. [90]. Для восьми типов растительных масел, таких как: оливковое масло, кукурузное масло, подсолнечное масло, масло виноградных косточек, масло сквоша, масло фундука, арахисовое масло и кунжутное масло измерения проведены с помощью вискозиметра Хопплера при температурах 293–353 К. Температурные корреляции вязкости получены с использованием полиномиальной подгонки по экспериментальным данным со средним отклонением от 1,2 % до 5,5 %. Brock и др. [80] представили экспериментальные данные по динамической вязкости и теплопроводности следующих рафинированных растительных масел: риса, сои, кукурузного масла, подсолнечника, хлопкового масла и оливкового масла. Для измерения динамической вязкости в диапазоне температур 293 К–343 К использовался реометр Брукфилда. Из двух моделей описания вязкости наилучшие результаты показала модель вязкости Фогеля с абсолютным средним отклонением до 6,4 %. Fasina [66] с помощью реометра Bohlin измерили вязкости 12 образцов растительного масла: миндальное, рапсовое, кукурузное, виноградное, гальзановое, оливковое, арахисовое, сафлоровое, кунжутное, соевое, подсолнечное и ореховое масла при температурах до 453 К. Результаты аппроксимировали уравнениями по трем моделям (модифицированный WLF, степенной закон и Аррениус). Для описания влияния температуры на вязкость, модифицированная модель WLF дала наилучшее соответствие. Rojas [69] доложили о данных по теплофизических свойствах хлопкового, рапсового, подсолнечного, кукурузного и соевого масел. Вязкость измерена в интервале температур 299,15–433,15 К. Динамическую вязкости (μ) растительного масла определяли с помощью вискозиметра с вращающимся концентрическим цилиндром типа Searle (Rheotest 2.1, Ottendorf-Okrilla, Германия). Экспериментальные данные были использованы для разработки эмпирических корреляций. Средние абсолютные отклонения рассмотренных моделей колеблются от 0,06 % до 0,58 %. Эти корреляции могут использоваться для прогнозирования этих свойств в диапазоне исследованных температур. Anand [91] провели обзор различных видов моделей (корреляций), используемых для оценки вязкости растительного масла и биодизельного топлива, исходя из их состава жирных кислот. Предложенные методологии проверены в широком диапазоне доступных данных вязкости для растительных масел и биодизельного топлива различного состава и для разных температур. Сравнение расчетных значений вязкостей с измеренными для 13 растительных масел и 14 образцов биодизельного топлива показали согласие в пределах предсказанной ошибки в 10 %. В работе [92] Diamante и др. измеряли влияние высоких скоростей сдвига (от 64,5 до 4835 с^{-1}) на абсолютную вязкость различных растительных масел при температурах от 296 К до 363 К. Абсолютные вязкости различных растительных масел определяли на вискозиметре Lamy RM100 (вращающийся вискозиметр с коаксиальным цилиндром). Измерены абсолютные вязкости 14 образцов: масло авокадо (холодного отжима), рапсовое масло, масло виноградных косточек, масло макадамии (холодного отжима), оливковое масло (смесь холодного отжима и рафинированного), арахисовое масло, рапсовое масло (холодного отжима), масло рисовых отрубей, сафлоровое масло (холодного отжима), кунжутное масло, соевое масло, подсолнечное масло и масло грецкого ореха (холодного отжима). Почти все экспериментальные значения различных растительных масел были сопоставлены с опубликованными литературными данными, за исключением масел виноградных косточек, арахиса и грецкого ореха, процентная разница которых составляет 13–17 %. Vozárová и др. [81] исследовали динамические вязкости рапсового, подсолнечного и оливкового масел. Измерения динамической вязкости растительных масел осуществлялись ротационным вискозиметром DV2TLV (Brookfield) в интервале температур от 294 К до 373 К. Измеренные температурные зависимости динамической вязкости показали хорошее согласие с опубликованными результатами. Отличия от данных других авторов обусловлены несколькими факторами (химический состав, способ обработки, условия хранения, термическая история и т. д.), которые влияют на почти каждое физическое свойство масел. Получены уравнения регрессии для температурной зависимости динамической вязкости по типу Аррениуса, с различными значениями коэффициентов для каждого образца в зависимости от вида масла. Еще одна экспериментальная информация о вязкости для набора растительных масел, сообщенная Esteban [7], доступна при температурах от 283 до 413 К. Они измеряли вязкость 6 образцов растительных масел и 2 образцов дизельного топлива (*Rapeseed, Sunflower, Soybean, Palm, Corn, Grapeseed, Diesel, BD100*) с использованием калиброванных ареометров и вискозиметра гравитационного потока типа Кэннона-Фенске. Sahasrabudhe [93] опубликовали результаты исследования теплофизических свойств, в том числе, и вязкости пяти пищевых масел (масло канолы, оливковое масло, соевое масло, арахисовое масло и

кукурузное масло). Вязкость масел измеряли с использованием вискозиметра от комнатной температуры до 473 К с помощью вискозиметра *Brookfield (Brookfield Engineering Laboratories, Inc.; Middleboro MA, США)*. Измеренная динамическая вязкость была затем преобразована в кинематическую вязкость с использованием плотности каждого масла для сравнения с данными математических моделей. Измерения, выполненные при различных настройках оборотов в минуту, подтвердили ньютоновское поведение пяти изученных масел. Температурная зависимости вязкости моделировались с использованием модифицированного уравнения Андраде. Статистический анализ показал значительное влияние температуры и типа масла на значения вязкости; различия между маслами были более заметны при температуре ниже 373 К. Zongo [84] опубликовали данные по теплофизическим свойствам, включая и вязкости рапсового масла, масла ятрофы до температуры 523 К. Вязкости измеряли реометром марки *Rheometer ARES-G2*. В этой статье помимо экспериментальных измерений и методов оценки свойств растительных масел рассмотрены корреляционные методы с использованием подхода группового вклада для каждого свойства и сравнение экспериментальных данных с прогнозируемыми значениями свойств. Zongo [84] показали, что динамическая вязкость хорошо прогнозируется методом *Jöback-Lydersen* выше 350 К. Абсолютное среднее отклонение составило 28,39 % для рапсового масла и 20,42 % для масла ятрофы, что намного выше из-за большого отклонения, наблюдаемого при более низких температурах. Li Zong и др. [71] для расчета теплофизических свойств масел (давление пара, энтальпию испарения, теплоемкость жидкости, энтальпию образования, молярный объем жидкости и вязкость жидкости) предложили метод фрагментной оценки химической составляющей по составу фрагментов и параметрам фрагментов молекулы. Эта работа способствовала созданию банка данных теплофизических свойств триглицеридов, жиров и масел. Simion и соавт. [9] сообщили новый обобщенный метод для нахождения математических корреляций между температурой и типом масла, с плотностью и вязкостью для десяти растительных масел (оливкового, арахисового, кунжутного, миндального, хлопкового, кукурузных зародышей, подсолнечника, сои, виноградных косточек и льна).

Результаты по вязкости масел при высоких давлениях представлены в [94-96]. В [94] сообщается об экспериментальных исследованиях вязкости оливкового масла и составляющих его жирных кислот с использованием вискозиметра высокого давления погружного типа при температуре 293,15 К и давлений 0,101 - 45 МПа. Вязкости определялись методом падающего груза. В [95] увеличили давление в эксперименте для оливкового масла до 150 МПа. Результаты измерений представили в виде экспоненциальной и квадратичной зависимости от давления. Эти уравнения обеспечили хорошее соответствие с экспериментальными данными: экспоненциальное соотношение имеет стандартное отклонение 3,32 % и квадратичное соотношение имеет стандартное отклонение 1,93 %. Mawatari [96] исследовали влияние давления на вязкость и характеристики затвердевания рапсового масла, соевого масла, подсолнечного масла, пальмового масла, кокосового масла, оливкового масла, камелии, горчичного масла, касторового масла, метилового эфира рапса и метилового эфира сои в интервале температур от 293 К до 383 К и давлений до 0,35 ГПа. Для определения вязкости при высоком давлении до 0,35 ГПа и при температуре от 293 К до 383 К растительных масел использовался вискозиметр с падающим шариком высокого давления.

Динамическая и кинематическая вязкости биодизельного топлива

Вязкость образцов биодизельного топлива широко изучена в литературе [91,97-103]. В работе [97] представлены значения коэффициентов кинематической вязкости трех образцов биодизельного топлива, полученных из масла рапса, сои и рыбьего жира в интервале температур от 293 до 573 К. Повторяемость измерений составляет 2 %. В работе Moradi [101] представлены результаты измерения коэффициентов кинематической вязкости нескольких образцов биодизельного топлива, полученных из масел сои, рапса, подсолнечника и отработанных масел, и их смесей с дизельным топливом. Измерения были сделаны при температуре 293-353 К. Погрешность измерений составила 0,2 %. Авторы также разработали предсказывающую модель, которая не зависит от типа биодизельного топлива. В работе Nita [99,100] измерялась вязкость биодизельного топлива в диапазоне температур от 293 до 333 К. Измерения проводились с использованием прибора Anton Paar SVM 3000. Погрешность измерений 0,7 %. Knothe в своей работе [102] измерили коэффициенты кинематической вязкости многочисленных жирных соединений при 40 °C (ASTM D445) с помощью капиллярного вискозиметра *Cannon-Fenske*. Эти данные могут быть использованы для разработки моделей прогнозирования вязкости смеси сложных эфиров жирных кислот, содержащихся в биодизельном топливе. Allen [103] измерил

вязкость биодизельного топлива, полученного из масел рапса, кокоса, пальмы, арахиса и сои. Измерения проводились с использованием микровязкозиметра Paar AMV 200, работа которого основана на методе катящегося шарика. В работе Freitas [104] представлены измерения вязкости семи образцов биодизельного топлива, полученных в результате реакции метанолиза из соевого, пальмового, рапсового масел и смеси соевых и рапсовых метиловых эфиров, с применением 0,5 % гидроксида натрия в качестве катализатора. Температура реакции составила 328 К мольное соотношение метанола к маслу - 5:1. Измерения вязкости проводились при помощи вязкозиметра Anton Paar SVM 3000. Погрешность измерений вязкости менее 0,5 %. В работе [105] проводились измерения вязкости смеси эфиров, произведенных из рапсового, кукурузного и подсолнечного масел. Измерения были сделаны реометром Haake RS50. Albo и др. [32] измерили вязкости метиловых эфиров рапсового масла (RME) и соевого масла (SME) капиллярными вязкозиметрами типа Ubbelohde при 293 К и атмосферном давлении, а при высоких давлениях с использованием вязкозиметра Anton Paar SVM 3000. Относительная расширенная неопределенность измерений вязкости, которые могут быть получены с помощью этого устройства и процедуры оценивалась в 1,3 %. В работе [106] Pratas измерили вязкость семи этиловых эфиров и восьми метиловых. Измерения вязкости и плотности проводили в температурном интервале от 273,15 до 363,15 К при атмосферном давлении с использованием автоматического ротационного вязкозиметра-стабилизатора SVM 3000 Anton Paar. Измеренные экспериментальные данные сравнивались с данными вязкости, ранее сообщавшимися в литературе для тех же систем, которые использовались для оценки трех прогностических моделей. Для этиловых эфиров отклонения находятся в пределах 4 % от литературных данных, а для метиловых 1 %. Isioma и др. [107] опубликовали обзор и провели анализ свойств холодного потока и кинематической вязкости биодизеля собранных из источников, опубликованных в международных журналах. Machado [26] определяли кинематическую вязкость биодизельного топлива при различных температурах (283,15, 293,15, 303,15, 313,15 и 323,15 К), полученного из соевого, кукурузного, подсолнечного и рапсового растительных масел. Вязкость определяли калиброванным стеклянным капиллярным вязкозиметром Cannon-Fenske (размеры 50, 75, 100 и 150) с погрешностью $\pm 0,01$ мПа·с. Для связи данных вязкости в зависимости от температуры, концентрации биодизельного топлива и этанола использовалась полиномиальная модель, адекватно отображающая экспериментальные данные. Sousa и др. [108] предложили метод для количественной оценки содержания биодизельного топлива в продуктах этанолиза и метанолиза, а также в смесях биотоплива и растительного масла различных видов сырья. В основе метода – аналитическая кривая вязкозиметрии. Bair [109] экспериментально измерили вязкости четырех дизельных топлив до 350 МПа и температур до 433 К. Сдвиговую вязкость определяли с помощью вязкозиметра с падающим цилиндром. Зависимость вязкости смазочных масел от температуры и давления отражена корреляцией вязкости: модель свободного объема Дулиттла [110] с погрешностью от 2,2 % до 9,8 % и улучшенная модель Ясутоми [111] с погрешностью от 5,9 % до 8,1 %. Использованная модель термодинамического масштабирования вязкостей по нормализационному параметру Ашерста – Гувера [112] по методу Штиккеля показывает, что для всех жидкостей измеренные вязкости хорошо коррелируются в зависимости от вязкости, температуры и давления с ошибкой в пределах 2,6-3,6 %. В работе [113] Chhetri и др. исследовали вязкости биотоплива из канолового масла, а также для двух видов биодизельного топлива, полученного из непищевых источников, ятрофы и мыльного масла. Вязкости были измерены от 293 К до 523 К и от атмосферного давления до 7 МПа. Для измерения вязкости использовался вязкозиметр ViscoScope. Обработка данных (вязкость от температуры) проведена по модифицированному уравнению Андраде до давления 7 МПа. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными. Duncan и др. [114] получили данные по вязкости образцов биодизельного топлива, метиловых эфиров жирных кислот (FAMES), произведенных из соевого масла, соевого масла из соевых бобов Vistive, масла канолы, переработанного масла канолы в интервале температур 283,15 - 373,15 К и давлений до 131 МПа. Измерения проводились с помощью вязкозиметра высокого давления Cambridge Applied Systems (в настоящее время Cambridge Visidity, Inc.) (система ViscoPro 2000 4-SPL-440 с программным обеспечением Viscolab). Обработка результатов по уравнению Тейта-Литовица показала, что оно хорошо коррелирует данные в широком диапазоне температур и давлений. Отклонение от расчетных данных не более 3,39 %. В другой работе [115] эти же авторы измерили вязкости смеси соевый биодизель и дизель со сверхнизким содержанием серы в различных пропорциях при тех параметрах. Используя уравнение Тейта-Литовица с правилом смешивания Кея авторы описали

экспериментальные данные с абсолютной погрешностью до 1,75 %. В работе [116] *Freitas* сообщили экспериментальные данные вязкостей высокого давления для трех видов биотоплива (соя, рапс и их бинарная смесь). Измерения провели при температурах от 293,15 К до 393,15 К и давлениях от атмосферного до 140 МПа с использованием вискозиметра с вибрирующей проволокой с погрешностью до 1 %. Авторы описали экспериментальные данные с общими средними относительными отклонениями (*OARD*) всего в 3,9 % во всех исследованных диапазонах давлений и температур. Эта корреляция была также расширена для описания вязкостей биодизельных смесей с дизельным топливом с *OARD* всего в 3,3 %. *Habrioux* и др. в работах [117, 118] приводят данные по вязкости эфиров метилкапрата, этилкапрата, этилмиристата и метилмиристата при высоком давлении. Измерения проведены двумя различными методами: вискозиметром с падающим грузом и методом кварцевого резонатора. Диапазон параметров в работе [119] следующий: температура 293,15 - 353,15 К, давление 0,1 - 200 МПа. Предложены корреляции вязкости при высоком давлении для корреляции в пределах экспериментальной неопределенности значений вязкости как функции температуры и давления. Для описания вязкости от плотности и температуры использован термодинамический метод масштабирования. *Robertson* и др. в [119] сообщили об измерении вязкости биотоплива, полученного из подсолнечного масла и смеси биодизельного топлива с минеральным дизельным топливом в условиях высокого давления до 153 МПа и температур 273-298 К. *Schaschke* опубликовал в [120] вязкости биотоплива из сои и рапса, смешанных с минеральным дизельным топливом при температурах от 298 К до 353 К при давлениях до 200 МПа, используя вискозиметр падающего погружного типа. *Schaschke* и др. в [51] провели измерения вязкости различных дизельных топлив, полученных на британских нефтеперерабатывающих заводах, при давлениях до 500 МПа и температурах в диапазоне от 298 К до 373 К. В этом исследовании данные вязкости при высоком давлении получили с использованием термостатически контролируемого вискозиметра высокого давления погружного типа. Для оценки вязкости с давлением использовали значения плотности (уравнение Тейта и экспериментальные данные с использованием аппарата микро-PVT). Описали данные по вязкости логарифмической зависимостью с погрешностью до 2 %.

Актуальность исследования определяется проведенными исследованиями теплофизических свойств рабочих сред процесса получения биодизельного топлива.

Цели и задачи состоят в проведении экспериментального исследования по получению новых данных по плотности, изобарной теплоемкости, теплопроводности, вязкости на апробированных установках.

Научная значимость выражается в формировании профильного сегмента базы данных по теплофизическим свойствам веществ и материалов.

Практическая значимость заключается в применимости данных на этапах моделирования, оптимизации и масштабирования разрабатываемого процесса получения биодизельного топлива.

Материалы и методы

В работе по определению теплофизических свойств состава смеси, участвующих в получении биодизельного топлива, было задействовано следующие материалы:

- рапсовое рафинированное дезодорированное масло первого сорта желтого цвета компании ОАО «Астон», Ростов-на-Дону;
- масло пальмовое рафинированное отбеленное дезодорированное «Пальмастар» фирмы Cargill;
- спирт этиловый пищевой с объемной долей этилового спирта 95%;
- в качестве катализатора был использован оксид алюминия марки АОК-63-22К (производство ОАО «СКТБ «Катализатор», г. Новосибирск, Россия; ТУ – 6-68-196-2011), фазовый состав - смесь гамма- и хи-оксидов.

Измерение плотности растительных масел авторы выполняли с помощью стандартных пикнометров. Дополнительно данные по плотностям получены косвенным путем из измерений коэффициента теплового расширения с точностью до 1 %. Для корреляции плотности исследованных жиров и масел в интервале температур от 303 К до 353 К и давления до 150 МПа использовали уравнение состояния Тейта.

Для измерений изобарной теплоемкости масел и их смесей со спиртом использован модернизированный сканирующий калориметр ИТС-400. Максимальная совокупная неопределенность при измерении изобарной удельной теплоемкости не превышала 2 %.

Измерения теплопроводности проводились с помощью адаптированного к высокому давлению метода горячей проволоки с максимальной неопределенностью в 1,8 %.

Для определения динамической вязкости использовался вискозиметр с падающим шариком высокого давления. Этот же вискозиметр также использовался для непосредственного наблюдения кристаллизации масел при высоком давлении менее 0,35 ГПа. Для описания вязкости растительных масел под высоким давлением использовано корреляционное уравнение.

Результаты и обсуждение

Shamsetdinov и соавторы [121] измерили плотности рапсового и пальмового масел, полученных при давлениях до 49 МПа и 147 МПа и температурах от 298 К до 363 К соответственно. Предел общей неопределенности не превышал 1,5 %.

Измерения теплоемкости сверхкритического этанола с маслами проведены при разных параметрах и мольных соотношениях [122-125]. Измерения теплоемкости этанола с пальмовым маслом проведено при мольных соотношениях 123:1; 192:1 в интервале температур 343-623 К и давлениях 9,8-29,4 МПа. Установлены закономерности изменения теплоемкости от давления, мольных соотношений и способа приготовления смеси. Измерения с рапсовым маслом, проведено с меньшим мольным соотношением спирт/масло близким к стехиометрическим соотношениям (5:1). Теплоемкость этих смесей исследована в интервале температур 303 К-623 К и давлениях 19,6-29,4 МПа. Также были проведены измерения теплоемкости сверхкритического этанола с рапсовым маслом в присутствии гетерогенного катализатора Al_2O_3 при мольных соотношениях 6:1÷30:1 в диапазоне давлений 9,8-29,4 МПа и температур от 303 до 563 К. Авторы установили, что теплоемкость исследуемых смесей уменьшается с увеличением концентрации масла в смеси, кроме мольного соотношения 18:1. Это особенно заметно при давлениях 19,6 и 29,4 МПа. При мольном соотношении 18:1 в интервале температур 320-450 К теплоемкость тройной системы «этанол - рапсовое масло - катализатор» значительно выше теплоемкости тройной системы с другими соотношениями. Катализатор Al_2O_3 не оказывает существенного влияния на увеличение теплоемкости смеси «этанол - рапсовое масло». Все исследования попадают в предел неопределенностей, не превышающих 2,0 %.

Значения теплопроводности рапсового масла при давлениях до 49 МПа и температурах от 298 К до 363 К и пальмового масла в том же интервале температур получены при атмосферном давлении [126]. В исследуемом интервале температуры и давлений отмечено снижение теплопроводности рапсового масла, примерно, на 7–8 %, а пальмового на 4,5 %. I. Gabitov и др. [127] доложили данные теплопроводности смесей (этанол-рапсовое масло) с мольным соотношением спирт/масло 4:1, 18:1 и 50:1. Приведены данные в диапазоне температур 303-363 К и давлений до 30 МПа. Отмечается, что отклонения от закона аддитивности имеют разный характер: при температуре 293 К максимум отклонения приходится на соотношение 18:1, с ростом давления отклонения растут. С ростом температуры характер отклонения приобретает волнообразный характер со смещением гребня в сторону повышения соотношения.

О динамической вязкости рапсового масла при давлениях до 29,4 МПа и температурах от 313 К до 473 К доложили Gabitova и др. [128]. Установлено существенное увеличение динамической вязкости рапсового масла с ростом давления с 13 % при $T=313$ К до 43 % при 473 К. Экспериментальные данные по вязкости от температуры и давления авторы описали степенной зависимостью.

Заключение

Проведен широкий литературный обзор по теме исследования, касающейся теплофизических свойства сред, участвующих в получении биодизельного топлива. Приведены результаты как авторов статьи, так и результаты иностранных авторов. Стоит отметить, что работы авторов статьи проведены на апробированных установках, а результаты имеют предел общей неопределенности, не превышающий 2,0 %. Наблюдается общая сходимости по результатам работ с другими авторами. Также исследования приносят новые данные, касательно результатов по измерению изобарной теплоемкости для тройной системы «этанол-рапсовое масло-катализатор».

Благодарность.

Результаты исследований по работам авторского коллектива проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Литература

1. 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 // Проблемы энергетики. 2022. Т. 24. № 4. С. 16-49.
2. John N. Coupland, D. Julian McClements. Physical Properties of Liquid Edible Oils. JAOCS. 1997. Vol. 74. P. 1559–1564.
3. Noureddini B.C., Teoh L.H. Densities of Vegetable Oils and Fatty Acids. JAOCS. 1992. Vol. 69. № 12. P. 1184-1188.
4. J.D. Halvorsen, W.C. Mammel, Jr., L.D. Clements. Density Estimation for Fatty Acids and Vegetable Oils Based on Their Fatty Acid Composition. 1993. JAOCS. Vol. 70. № 9. P. 875-880.
5. D. Rudan-Tasic, C. Klofutar. Characteristics of vegetable oils of some slovene manufacturers. Acta Chim. Slov. 1999. V. 46(4). P. 511-521.
6. Rodenbush C.M., Hsieh F.H., Viswanath D.D. Density and viscosity of vegetable oils. Journal of the American Oil Chemist Society. 1999. Vol. 76. P. 1415-1419.
7. Bernat Esteban, Jordi-Roger Riba, Grau Baquero, Antoni Rius, Rita Puig. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. Biomass and bioenergy. 2012. Vol. 42. P. 164 -171.
8. S.P. Koh, C.P. Tan, N. Arifin, M.S.A. Yusoff, K. LonG, O.M. Lai. Thermal and viscosity properties of medium- and long-chain triacylglycerol blends. Journal of Food Lipids. 2009. Vol. 16. P. 569–588.
9. Andrei Ionuț Simion, Cristina-Gabriela Grigoraș, Lucian Gheorghe Gavrilă Annals. Mathematical modelling of ten vegetable oils thermophysical properties. study of density and viscosity. Food Science and Technology. 2014. Vol. 15. № 2. P. 371-386.
10. G.M. Acosta, R.L. Smith, Jr., K. Arai. High-Pressure PVT Behavior of Natural Fats and Oils, Trilaurin, Triolein, and n-Tridecane from 303 K to 353 K from Atmospheric Pressure to 150 MPa. J. Chem. Eng. Data. 1996. Vol. 41. P. 961-969.
11. Safarov M.M., Usupov S, Tagoev S. Thermophysical properties of vegetable oils in a wide range of temperatures and pressures. High Temp High Pres. 1999. Vol. 31. P. 43–48.
12. Werner M., Baars A., Eder C., Delgado A. Thermal conductivity and density of plant oils under high pressure. J Chem Eng Data. 2008. Vol. 53 P. 1444–1452.
13. Bérengère Guignon, Cristina Aparicio, Pedro D. Sanz. Volumetric properties of sunflower and olive oils at temperatures between 15 and 55 °C under pressures up to 350 MPa. High Pressure Research. 2009. Vol. 29. № 1. 2009. P. 38–45.
14. S.V.D. Freitas, F.A. Silva, M.J. Pastoriza-Gallego, M.M. Piñeiro, Á.S. Lima, J.A.P. Coutinho. Measurement and Prediction of Densities of Vegetable Oils at Pressures up to 45 MPa. J. Chem. Eng. Data. 2013. Vol. 58. P. 3046–3053.
15. Rackett H.G. Equation of state for saturated liquids. J. Chem. Eng. Data. 1970. Vol. 15. P. 514.
16. Dymond J.H., Malhotra R. The Tait equation: 100 years on. Int. J. Thermophys. 1988. Vol. 9. P. 941–951.
17. Kim C., Vimalchand P., Donohue M.D., Sandler S.I. Local Composition Model for Chainlike Molecules: A New Simplified Version of the Perturbed Hard Chain Theory. AIChE J. 1986. Vol. 32 (1). P. 1726-1734.
18. Torres-Jimenez E., Svoljšak-Jerman M., Gregorc A., Lisec I., Dorado M.P., Kegl B. Physical and chemical properties of ethanol–biodiesel blends for diesel engines. Energy Fuels. 2010. Vol. 24. P. 2002–2009.
19. Enweremadu C.C., Alamu O.J. Development and characterization of biodiesel from shea nut butter. Int Agrophys. 2010. Vol. 24. P. 29–34.
20. Alptekin E., Canakci M. Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. Fuel. 2009. Vol. 88. P. 75–80.
21. Alptekin E., Canakci M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. Renew Energy. 2008. Vol. 33. P. 2623–2630.
22. Doll K.M., Sharma B.K., Suarez P.A.Z., Erhan S.Z. Comparing biofuels obtained from pyrolysis, of soybean oil or soapstock, with traditional soybean biodiesel: density, kinematic viscosity, and surface tensions. Energy Fuels. 2008. Vol. 22. P. 2061–2066.
23. Santos I.C.F., de Carvalho S.H.V., Solleti J.I., Ferreira de La Salles W., Teixeira da Silva de La Salles K., Meneghetti S.M.P. Studies of Terminalia catappa l. oil: characterization and biodiesel production. Biores Technol. 2008. Vol. 99. P. 6545–6549.

24. Tiwari A.K., Kumar A., Raheman H. Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: an optimized process. *Biomass Bioenergy*. 2007. Vol. 31. P. 569–575.
25. Baroutian S., Aroua M.K., Raman A.A.A., Sulaiman N.M.N. Viscosities and densities of binary and ternary blends of palm oil + palm biodiesel + diesel fuel at different temperatures. *J Chem Eng Data*. 2010. Vol. 55. P. 504–507.
26. Mariceli da Silva Machado, Virginia Coimbra Zuvanov, Edwin Elard Garcia Rojas, Abraham Damian Giraldo Zuniga, Bernardo de Sá Costa. Thermophysical properties of biodiesel obtained from vegetable oils: corn, soy, canola and sunflower. *Enciclopédia biosfera. Centro Científico Conhecer – Goiânia*. 2012. Vol.8. № 14. P. 917-924.
27. Huber M.L., Lemmon E.W., Kazakov A., Ott L.S., Bruno T.J. Model for the thermodynamic properties of a biodiesel fuel. *Energy Fuels*. 2009. Vol. 23. P. 3790–3797.
28. Baroutian S., Aroua M.K., Raman A.A.A., Sulaiman N.M.N. Density of palm oil-based methyl ester. *J Chem Eng Data*. 2008. Vol. 53. P. 877–880.
29. Tat ME, Gerpen JH. Measurement of Biodiesel Speed of Sound and Its Impact on Injection Timing. National Renewable Energy Laboratory 2003; NREL/SR-510-31462.
30. Pratas M.J., Oliveira M.B., Pastoriza-Gallego M.J., Queimada A.J., Pineiro M.M., Coutinho J.A.P. High-Pressure Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation, and Cubic-Plus-Association Equation of State (CPA EoS) Modeling. *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. P. 3806–3814.
31. Tat M.E., Van Gerpen J.H. Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Alkyl Monoesters at Elevated Temperatures and Pressures. *J Am Oil Chem Soc*. 2003. Vol. 80. P. 1249-1256.
32. P.A. Giuliano Albo, S. Lago, H. Wolf, R. Pagel, N. Glen, M. Clerck, P. Ballereau. Density, viscosity and specific heat capacity of diesel blends with rapeseed and soybean oil methyl ester. *Biomass and Bioenergy*. 2017. Vol. 96. P. 87-95.
33. Sofija P. Miškov, Gorica R. Ivaniš, Ivona R. Radović, Mirjana L. Kijevčanin. High pressure densities and derived properties of biodiesel fuel produced by heterogeneous transesterification from biowaste. *Thermal science*. 2019. Vol. 23. P. S1757-S1768.
34. Nikolić B.D., Kegl B., Marcović S.D., Mitrović M.S. Determining the speed of sound, density and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel and diesel fuel. *Therm Science*. 2012. Vol. 16. P. S569-S579.
35. Aparicio C., Guignon B., Rodriguez-Anton L.M., Sanz P.D. Determination of Rapeseed Methyl Ester Oil Volumetric Properties in High Pressure (0.1 to 350 MPa). *J. Therm. Anal. Calorim*. 2007. Vol. 89. P. 13–19.
36. Dzida M., Prusakiewicz P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. *Fuel*. 2008. Vol. 87. P. 1941–1948.
37. Chhetri A.B., Watts K.C. Densities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures. *Fuel*. 2012. Vol. 99. P. 210–216.
38. Schedemann A., Wallek T., Zeymer M., Maly M., Gmehling J. Measurement and correlation of biodiesel densities at pressures up to 130 MPa. *Fuel*. 2013. Vol. 107. P. 483–492.
39. Kontogeorgis G.M., Michelsen M.L., Folas G.K., Derawi S., von Solms N., Stenby E.H. Ten years with the CPA (Cubic-Plus-Association) Equation of State Part I (Pure Compounds and Self-Associating System). *Ind. Eng. Chem. Res*. 2006. Vol. 45. P. 4855–4868.
40. Kontogeorgis G.M., Michelsen M.L., Folas G.K., Derawi S., von Solms N., Stenby E.H. Ten years with the CPA (Cubic-Plus-Association) Equation of State Part II (Cross-Associating and Multicomponents System). *Ind. Eng. Chem. Res*. 2006. Vol. 45. P. 4869–4878.
41. Weidlich U., Gmehling J. A modified UNIFAC model. 1. Prediction of VLE, hE, and gamma infinite. *Ind Eng Chem Res*. 1987. Vol. 26(7). P. 1372–1381.
42. Schmid B., Gmehling J. From van der Waals to VTPR: the systematic improvement of the van der Waals equation of state. *J Supercritical Fluids*. 2010. Vol. 55. P. 438–447.
43. Oliveira M.B., Freitas S.V.D., Llovel F., Vega L.F., Coutinho J.A.P. Development of simple and transferable molecular models for biodiesel production with the soft-SAFT equation of state. *Chemical Engineering Research and Design*. 2014. Vol. 92. P. 2898-2911.
44. Dong N.H., Thuy N.T., Tho V.D.S. Predicting the temperature/pressure dependent density of biodiesel fuels. *Petrovietnam J*. 2012. Vol. 10. P. 46-58.
45. Pratas M.J., Freitas S.V.D., Oliveira M.B., Monteiro S.C., Lima A.S., Coutinho J.A.P. Biodiesel Density: Experimental Measurements and Prediction Models. *Energy Fuels*. 2011. Vol. 25. P. 2333–2340.

46. Meng X., Jia M., Wang T. Predicting biodiesel densities over a wide temperature range up to 523 K. *Fuel*. 2013. Vol. 111. P. 216–222.
47. Spencer C.F., Danner R.P. Improved equation for prediction of saturated liquid density. *J Chem Eng Data*. 1972. Vol. 17. P. 236–241.
48. N.M.C. Talavera-Prieto, A.G.M. Ferreira, A.T.G. Portugal, R.J. Moreira, J.B. Santos. Correlation and Prediction of Biodiesel Density. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2014. Vol. 8. No 12. P. 1303-1312.
49. Ndiaye H.I., Habrioux M., Coutinho J.A.P., Paredes M.L.L., Daridon J.L. Speed of sound, density, and derivative properties of ethyl myristate, methyl myristate, and methyl palmitate under high pressure. *J. Chem. Eng. Data*. 2013. Vol. 58. P. 1371-1377.
50. Outcalt S.L. Compressed-liquid density measurements of methyl oleate and methyl linoleate. *J. Chem. Eng. Data*. 2011. Vol. 56. P. 4239-4243.
51. Carl Schaschke, Isobel Fletcher, Norman Glen. Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature. *Processes*. 2013. Vol. 1. P. 30-48.
52. Felipe A. Perdomo, Beatriz M. Millan, Jos L. Aragon. Predicting the physicochemical properties of biodiesel fuels assessing the molecular structure with the SAFT group contribution approach. *Energy*. 2014. Vol. 72. P. 274-290.
53. Hegel P., Mabe G., Pereda S., Brignole E.A. Phase Transitions in a Biodiesel Reactor Using Supercritical Methanol. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. Vol. 46. P. 6360.
54. A. Velez, P. Hegel, G. Mabe, E. A. Brignole. Density and Conversion in Biodiesel Production with Supercritical Methanol. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010. Vol. 49. P. 7666-7670.
55. A.Velez, G. Soto, P. Hegel, G. Mabe, S. Pereda. Continuous production of fatty acid ethyl esters from sunflower oil using supercritical ethanol. *Fuel*. 2012. Vol. 97. P. 703–709.
56. Cholada Komintarachat, Ruengwit Sawangkeaw, Somkiat Ngamprasertsith. Density Determination of Ethyl Acetate-Palm Oil Mixture in Supercritical Condition. *Engineering journal*. 2014. Vol. 19. № 2. P. 29-39.
57. Winatta Sakdasri, Ruengwit Sawangkeaw, Yaocihuatl Medina-Gonzalez, Séverine Camy, Jean-Stéphane Condoret, Somkiat Ngamprasertsith. Experimental Study and Modeling of Phase Equilibrium of the Methanol–Tripalmitin System: Application to Palm Oil Transesterification with Supercritical Methanol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55. P. 5190-5199.
58. István Barabás. Liquid densities and excess molar volumes of ethanol+biodiesel binary system between the temperatures 273.15 K and 333.15 K. *Journal of Molecular Liquids*. 2015. Vol. 204. P. 95-99.
59. Natalia S. Cotabarren, Alexis R. Velez, Pablo E. Hegel, and Selva Pereda. Prediction of Volumetric Data in Supercritical Reactors. *J. Chem. Eng. Data*. 2016. Vol. 61. P. 2669-2675.
60. M. F. Palavra, M. A. Tavares Cardoso, J. A. P. Coelho, M. F. B. Mourato. Density Measurements of Fluids and Their Mixtures at High Pressure. *Chemical Engineering & Technology*. 2007. Vol. 30. P. 689–694.
61. A. Velez, S. Pereda, E. A. Brignole. Isochoric lines and determination of phase transitions in supercritical reactors. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2010. Vol. 55. P. 643–647.
62. Espinosa S., Fornari T., Bottini S., Brignole E.A. Phase Equilibria in Mixtures of Fatty oils and Derivatives with Near Critical Fluids Using the GC-EoS Model. *J. Supercrit. Fluids*. 2002. Vol. 23. P. 91.
63. Ferreira O., Macedo E.A., Brignole E.A. Application of the GCA-EoS Model to Supercritical Processing of Associating Oil Derivatives: Fatty Acids, Alcohols and Triglycerides. *J. Food Eng.* 2005. Vol. 70. P. 579.
64. Sawangkeaw R., Satayanon W., Bunyakiat K., Camy S., Condoret J.-S., Ngamprasertsith S. Continuous Production of Biodiesel with Supercritical Methanol: a Simple Compressible Flow Model for Tubular Reactors. *Int. J. Chem. React. Eng.* 2011. Vol. 9. P. 23-32.
65. Timms R.E. Physical Properties of Oils and Mixtures of Oils. *JAOCS*. 1985. Vol. 62. № 2. P. 241–249.
66. Fasina O.O. Viscosity and Specific Heat of Vegetable Oils as a Function of Temperature: 35°C to 180°C. *International Journal of Food Properties*. 2008. Vol. 11. № 4. P. 738–746.
67. Santos J.C.O., Santos M.G.O., Dantas J.P., Conceicao M.M., Athaide-Filho P.F., Souza A.G. Comparative study of specific heat capacities of some vegetable oils obtained by DSC and microwave oven. *J. Therm. Anal. Cal.* 2005. Vol. 79. P. 283-287.

68. Morad N.A., Mustafa Kamal A.A., Panau F., Yew T.W., Liquid specific heat capacity estimation for fatty acids, triacylglycerols, and vegetable oils based on their fatty acid composition. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2000. Vol. 77. P. 1001-1005.
69. Edwin E. Garcia Rojas, Jane S.R. Coimbra, Javier Telis-Romero. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower, and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties*. 2013. Vol. 16. P. 1620–1629.
70. Yung-Chieh Su, Y.A. Liu. Selection of Prediction Methods for Thermophysical Properties for Process Modeling and Product Design of Biodiesel Manufacturing. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011. Vol. 50. P. 6809–6836.
71. Zong L., S. Ramanathan, C.C. Chen. Fragment-Based Approach for Estimating Thermophysical of Fats and Vegetable Oils For Modeling Biodiesel Production Process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010. Vol. 49. P. 876-886.
72. George Anitescu, Thomas J. Bruno. Fluid properties needed in supercritical transesterification of triglyceride feedstocks to biodiesel fuels for efficient and clean combustion – A review. *J. of Supercritical Fluids*. 2012. Vol. 63. P. 133–149.
73. S.K. Hoekman, Amber Broch, Curtis Robbins, Eric Cenicerros, Mani Natarajan. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. P. 143– 169.
74. Parag Saxena, Sayali Jawale, Milind H Joshipur. A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. P. 395–402.
75. R. Larsson, O. Andersson. Lubricant thermal conductivity and heat capacity under high pressure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J. Journal of Engineering Tribology*. 2000. Vol. 214. P. 337-342.
76. Bogdan M. Leu, Hasan Yavas, Innokenty Kantor, Vitali B. Prakapenka. Specific Heat of Olive Oil to 356 MPa. *J Am Oil Chem Soc.* 2010. V. 87. P. 1517–1520.
77. Loc Thai Nguyen, V.M. Balasubramania, S.K. Sastry. Determination of in-situ thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric specific heat and isobaric specific heat of selected foods under pressure. *UnderInternational Journal of Food Properties*. 2012. V. 15. P. 169–187.
78. Wu J, Liu Z., Jin X., Pan J. Thermal conductivity of some oxygenated fuels and additives in the saturated liquid phase. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2005. Vol. 50. P. 102-104.
79. Alpaslan Turgut, Ismail Tavman, Sebnem Tavman. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method. Thermal conductivities of three different edible oils. *International Journal of Food Properties*. 2009. V. 12. P. 741–747.
80. Brock J., Nogueira M.R., Zakrzewski C., Corazza F.D.C., Corazza M.L., De Oliveira J.V. Experimental measurements of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils. *Ciencia Tecnol. Aliment.* 2008. V. 28. P. 564-570.
81. Vlasta Vozárová, Monika Božiková, Michal Valach, Ľubomír Híreš, Ana Petrović, Ján Csillag, Tomáš Regrut. Comparative study of edible vegetable oils physical properties. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2015. Vol. 19. P. 67-70.
82. J.-F. Hoffmann, J.-F. Henry, G. Vaitilingom, R. Olives, M. Chirtoc, D. Caron, X. Py. Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3omega hot wire method. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. V. 107. P. 105-110.
83. Vinay Atgur, Manavendra G., G.P. Desai. Experimental Investigation of Thermal Conductivity and Specific Heat and Thermal Degradation of Vegetable Oils For A Range Of Temperature Research. *Journal of Chemical and Environmental Sciences*. 2016. V. 4. P. 107-111.
84. Engines Augustin Sampawindé Zongo, Gilles Vaïtilingom, Tizane Daho, Christian Caillol, Jean-François Hoffmann, Bruno Piriou, Jeremy Valette, Bila Gérard Segda, Pascal Higelin. Temperature Dependence of Density, Viscosity, Thermal Conductivity and Heat Capacity of Vegetable Oils for Their Use as Biofuel in Internal Combustion. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2019. V. 9. P. 44-64.
85. Richard A. Perkins, Marcia L. Huber. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivities of Biodiesel Constituent Fluids: Methyl Oleate and Methyl Linoleate. *Energy Fuels*. 2011. V. 25. P. 2383–2388.
86. Horrocks J.K., McLaughlin E. Thermal conductivity of simple molecules in the condensed state. *Trans. Faraday Soc.* 1960. V. 56. P. 206–212.
87. Horrocks J.K., McLaughlin E. Temperature dependence of the thermal conductivity of liquids. *Trans. Faraday Soc.* 1963. V. 59. P. 1709–1716.

88. Nouredдини H., Teoh B.C., Davis Clements L. Viscosities of Vegetable Oils and Fatty Acids. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1992. V. 69(12). P. 1189–1191.
89. H. Abramovic, C. Klofutar. The temperature dependence of dynamic viscosity for some vegetable oils. *Acta Chimica Slovenica*. 1998. V. 45. P. 69–77.
90. Mircea Oroian, Gheorge Gutt. Influence of temperature on the physical properties of vegetable oils. *Journal of Faculty of Food Engineering*. 2015. V. 14. P. 162–170.
91. K. Anand, Avishek Ranjan, Pramod S. Mehta. Estimating the Viscosity of Vegetable Oil and Biodiesel. *Energy Fuels*. 2010. V. 24. P. 664–672.
92. Lemuel M. Diamante and Tianying Lan Absolute Viscosities of Vegetable Oils at Different Temperatures and Shear Rate Range of 64.5 to 4835 s⁻¹. *Journal of Food Processing*. 2014. V. 12. P. 12–17.
93. Shreya N. Sahasrabudhe, Veronica Rodriguez-Martinez, Meghan. O'Meara, Brian E. Farkas. Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. *International journal of food properties*. 2017. V. 20. No. S2. P. S1965–S1981.
94. C. J. Schaschke, S. Abid, M. J. Heslop. High-pressure viscosity measurement of fatty acids and oils. *High Pressure Research*. 2007. V. 27. No. 1. P. 33–37.
95. C. J. Schaschke, S. Allio, E. Holmberg. Viscosity measurement of vegetable oil at high pressure. *Trans IChemE, Part C. Food and Bioproducts Processing*. 2006. V. 84. P. 173–178.
96. Toshifumi Mawatari, Ryusei Fukuda, Hirohito Mori, Sobahan Mia, Nobuyoshi Ohno. High Pressure Rheology of Environmentally Friendly Vegetable Oils. *Tribol Lett*. 2013. V. 51. P. 273–280.
97. R.E. Tate, K.C. Watts, C.A.W. Allen. The viscosity of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 °C. *Fuel*. 2006. № 85. P. 1010–1015.
98. W. Yuan, A.C. Hansen, Q. Zhang, Z. Tan. Temperature dependent kinematic viscosity of selected biodiesel fuels and blends with diesel fuel. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2005. № 82. P. 195–199.
99. I. Nita, S. Geacai. Study of density and viscosity variation with temperature for fuels for diesel engine. *Ovidius Univer. Ann. Chem.* 2011. № 22. P. 57–61.
100. I. Nita, S. Geacai, O. Iulian. Measurements and correlations of physical-chemical properties to composition of pseudo-binary mixtures with biodiesel. *Renewable Energy*. 2011. № 36. P. 3417–3423.
101. G.R. Moradi, B. Karami, M. Mohadesi. Densities and kinematic viscosities in biodiesel-diesel blends at various temperatures. *J. Chem. Eng. Data*. 2012. № 58. P. 99–105.
102. G. Knothe, K.R. Steidley. Kinematic viscosity of biodiesel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*. 2005. № 84. P. 1059–1065.
103. C.A.W. Allen, K.C. Watts, R.G. Ackman, M.J. Pegg. Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition. *Fuel*. 1999. № 78. P. 1319–1326.
104. S. Freitas, M.J. Pratas, R. Ceriani, J.A.P. Coutinho. Evaluation of predictive models for the viscosity of biodiesel. *Energy Fuels*. 2001. № 25. P. 352–358.
105. T.O. de Macedo, R.G. Pereira, J.M. Pardal, A.S. Soares, V.J. de Lameria. Viscosity of vegetable oils and biodiesel and energy generation. *Int. Schol. Sci. Res. Innov.* 2013. № 7. P. 184–189.
106. Maria Jorge Pratas, Samuel Freitas, Mariana B. Oliveira, Sílvia C. Monteiro, Alvaro S. Lima, João A.P. Coutinho Densities and Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters. *J. Chem. Eng. Data*. 2010. V. 55. P. 3983–3990.
107. Nwadike Isioma, Yahaya Muhammad, O'Donnell Sylvester, Demshemino Innocent, Okoro Linus. Cold Flow Properties and Kinematic Viscosity of Biodiesel Universal. *Journal of Chemistry*. 2013. Vol. 1(4). P. 135–141.
108. F.P. Sousa, M.A. Luciano, V.M.D. Pasa. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE). *Fuel Process. Technol.* 2013. V. 109. P. 133–140.
109. S. Bair. The pressure and temperature dependence of volume and viscosity of four Diesel fuels. *Fuel*. 2014. Vol. 135. P. 112–119.
110. Bair S. High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics. *Elsevier Science*. 2007. Vol. 60–61. P. 116–122.
111. Bair S, Mary C, Bouscharain N, Vergne P. An improved Yasutomi correlation for viscosity at high pressure. *Proc Inst Mech Eng Part J. J Eng Tribol*. 2013. V. 227(9). P. 1056–1060.
112. Laesecke A, Bair S. High-pressure viscosity measurements of 1,1,1,2-tetrafluoroethane. *Int J Thermophys*. 2011. Vol. 2(5). P. 925–941.

113. A.B. Chhetri, K.C. Watts. Viscosities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures. *Fuel*. 2012. Vol. 102. P. 789–794.
114. Andrew M. Duncan, Azita Aghosseini, Reece McHenry, Christopher D. Depcik, Susan M. Stagg-Williams, Aaron M. Scurto. High-Pressure Viscosity of Biodiesel from Soybean, Canola, and Coconut Oils. *Energy Fuels*. 2010. V. 24. P. 5708–5716.
115. Andrew M. Duncan, Noorbahiyah Pavlicek, Christopher D. Depcik, Aaron M. Scurto, Susan M. Stagg-Williams. High-Pressure Viscosity of Soybean-Oil-Based Biodiesel Blends with Ultra-Low-Sulfur Diesel Fuel. *Energy Fuels*. 2012. Vol. 26. P. 7023–7036.
116. Samuel V.D. Freitas, J. J. Segovia, M. Carmen Martнn, Johnny Zambrano, Mariana B. Oliveira, Alvaro S. Lima, J.A.P. Coutinho. Measurement and prediction of high-pressure viscosities of biodiesel fuels. *Fuel*. 2014. V. 122. P. 223–228.
117. Matthieu Habrioux, Jean-Patrick Bazile, Guillaume Galliero, Jean Luc Daridon. Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters under High Pressure: Methyl Caprate and Ethyl Caprate. *J. Chem. Eng. Data*. 2015. V. 60. P. 902-908.
118. Matthieu Habrioux, Djamel Nasri, Jean Luc Daridon. Measurement of speed of sound, density compressibility and viscosity in liquid methyl laurate and ethyl laurate up to 200 MPa by using acoustic wave sensors. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2018. V. 120. P. 1-12.
119. L.X. Robertson, C.J. Schaschke. Combined High Pressure and Low Temperature Viscosity Measurement of Biodiesel. *Energy Fuels*. 2010. Vol. 24. P. 1293–1297.
120. C.J. Schaschke. Experimental viscosity measurements of biodiesels at high pressure. *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2016. V. 22(4). P. 453–460.
121. Шамсетдинов Ф.Н., Булаев С.А., Зарипов З.И. Коэффициент теплового расширения растительных масел при высоких давлениях // Вестник Казан. техн. ун-та им А.Н. Туполева. 2011. № 2. С. 11-16.
122. Usmanov R.A., Gabitov R.R., Biktashev Sh.A., Shamsetdinov F.N., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Gazizov R.A., Yarullin R.S., Yakushev I.A. Pilot Unit for Permanent Transesterification of Vegetable Oils in Supercritical Methanol or Ethanol Media. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2011. V. 5. No. 8. P. 1216–1227.
123. R.R. Gabitov, I.R. Gabitov, F.N. Shamsetdinov, T.R. Ahmetzjanov, R.A. Usmanov, Z.I. Zaripov. The heat capacity of the mixture of rapeseed oil and alcohols, are in sub- and supercritical fluid conditions. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012. V.15. No. 9. P. 56-59.
124. S.V. Mazanov, R.A. Usmanov, I.R. Gabitov, F.M. Gumerov, Z.I. Zaripov, R.Z. Musin. Thermophysical bases of catalytic and non-catalytic transesterification of rapeseed oil in ethanol under supercritical fluid conditions. *Butlerov Communications*. 2015. V. 41. No. 1. P. 58-66.
125. R. A. Usmanov, F. M. Gumerov, F. R. Gabitov, Z. I. Zaripov, F. N. Shamsetdinov, I. M. Abdulagatov, in *Liquid Fuels: Types, Properties and Production*. Chap. 3: Nova Science, New York, 2012., p. 99.
126. Р. Р. Габитов, Р. Р. Накипов, Ф. Н. Шамсетдинов, Р. А. Усманов, И. Х. Хайруллин, З.И. Зарипов. Переносные свойства растительных масел // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 21. С. 25-27.
127. И.Р. Габитов, Р.Р. Накипов, З.И. Зарипов. Коэффициенты теплопроводности смеси рапсовое масло – этанол в диапазоне температур 303-363 К и давлений до 30 Мпа // Вестник казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 113-116.
128. А.Р. Габитова, И.Р. Габитов, З.И. Зарипов. Исследование коэффициента динамической вязкости рапсового масла как основы биодизельного топлива в широкой области изменения параметров состояния // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 17. С. 252-254.

Авторы публикации

Мазанов Сергей Валерьевич – канд. техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Зарипов Зуфар Ибрагимович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Гумеров Фарид Мухамедович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Усманов Рустем Айтуганович – д-р техн. наук, Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Шаповалов Юрий Александрович – д-р техн. наук, Казахский национальный университет им. аль-Фараби

References

1. Mazanov SV., Gumerov FM., Usmanov RA., et al. Biodiesel fuel. Part I. Production methods // *Problems of Energy*. 2022;24(4):16-49.
2. Coupland JN, McClements DJ. Physical Properties of Liquid Edible Oils *JAACS*. 1997;74:1559–1564.
3. Nouredдини H, Teoh BC, Clements LD. Densities of Vegetable Oils and Fatty Acids. *JAACS*. 1992;69(12):1184-1188.
4. Halvorsen JD, Mammel WC, Clements LD, et al. Density Estimation for Fatty Acids and Vegetable Oils Based on Their Fatty Acid Composition. *JAACS*. 1993;70(9):875-880.
5. Rudan-Tasic D, Klofutar C. Characteristics of vegetable oils of some slovene manufacturers. *Acta Chim. Slov*. 1999;46(4):511-521.
6. Rodenbush CM, Hsieh FH, Viswanath DD. Density and viscosity of vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemist Society*. 1999;76:1415-1419.
7. Esteban B, Riba JR, Baquero G, et al. Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils. *Biomass and bioenergy*. 2012;42:164 -171.
8. Koh SP, Tan CP, Arifin N, et al. Thermal and viscosity properties of medium- and long-chain triacylglycerol blends. *Journal of Food Lipids*. 2009;16:569–588.
9. Simion AI, Grigoraş CG, Annals LGG. Mathematical modelling of ten vegetable oils thermophysical properties. study of density and viscosity. *Food Science and Technology*. 2014;15(2):371-386.
10. Acosta GM, Smith RL, Arai K, et al. High-Pressure PVT Behavior of Natural Fats and Oils, Trilaurin, Triolein, and n-Tridecane from 303 K to 353 K from Atmospheric Pressure to 150 MPa. *J. Chem. Eng*. 1996;41:961-969.
11. Safarov MM, Usupov S, Tagoev S. Thermophysical properties of vegetable oils in a wide range of temperatures and pressures. *High Temp High Pres*. 1999;31:43–48.
12. Werner M, Baars A, Eder C, et al. Thermal conductivity and density of plant oils under high pressure. *J Chem Eng*. 2008;53:1444–1452.
13. Guignon B, Aparicio C, Sanz PD. Volumetric properties of sunflower and olive oils at temperatures between 15 and 55 °C under pressures up to 350 MPa. *High Pressure Research*. 2009;29(1):38–45.
14. Samuel VDF, Silva FA, Pastoriza-Gallego MJ, et al. Measurement and Prediction of Densities of Vegetable Oils at Pressures up to 45 Mpa. *J. Chem. Eng*. 2013;58:3046–3053.
15. Rackett HG. Equation of state for saturated liquids. *J. Chem. Eng*. 1970;15(4):514-517.
16. Dymond JH, Malhotra R. The Tait equation: 100 years on. *Int. J. Thermophys*. 1988;9:941–951.
17. Kim C, Vimalchand P, Donohue MD, et al. Local Composition Model for Chainlike Molecules: A New Simplified Version of the Perturbed Hard Chain Theory. *AIChE J*. 1986;32(1):1726-1734.
18. Torres-Jimenez E, Svoljšak-Jerman M, Gregorc A, et al. Physical and chemical properties of ethanol–biodiesel blends for diesel engines. *Energy Fuels*. 2010;24:2002–2009.
19. Enweremadu CC, Alamu OJ. Development and characterization of biodiesel from shea nut butter. *Int Agrophys*. 2010;24:29–34.
20. Alptekin E, Canakci M. Characterization of the key fuel properties of methyl ester–diesel fuel blends. *Fuel*. 2009;88:75–80.
21. Alptekin E, Canakci M. Determination of the density and the viscosities of biodiesel–diesel fuel blends. *Renew Energy*. 2008;33:2623–2630.
22. Doll KM, Sharma BK, Suarez PAZ, et al. Comparing biofuels obtained from pyrolysis, of soybean oil or soapstock, with traditional soybean biodiesel: density, kinematic viscosity, and surface tensions. *Energy Fuels*. 2008;22:2061–2066.

23. Santos ICF, de Carvalho SHV, Solleti JI, et al. Studies of Terminalia catappa l. oil: characterization and biodiesel production. *Biores Technol.* 2008;99:6545–6549.
24. Tiwari AK, Kumar A, Raheman H. Biodiesel production from jatropha oil (Jatropha curcas) with high free fatty acids: an optimized process. *Biomass Bioenergy.* 2007;31:569–575.
25. Baroutian S, Aroua MK, Raman AAA, et al. Viscosities and densities of binary and ternary blends of palm oil + palm biodiesel + diesel fuel at different temperatures. *J Chem Eng.* 2010;55:504–507.
26. Machado MS, Zuvanov VC, Rojas EEG, et al. Thermophysical properties of biodiesel obtained from vegetable oils: corn, soy, canola and sunflower. *Enciclopédia biosfera. Centro Científico Conhecer – Goiânia.* 2012;8(14):917-924.
27. Huber ML, Lemmon EW, Kazakov A, et al. Model for the thermodynamic properties of a biodiesel fuel. *Energy Fuels.* 2009;23:3790–3797.
28. Baroutian S, Aroua MK, Raman AAA, et al. Density of palm oil-based methyl ester. *J Chem Eng.* 2008;53:877–880.
29. Tat ME, Gerpen JH. Measurement of Biodiesel Speed of Sound and Its Impact on Injection Timing. *National Renewable Energy Laboratory.* 2003; NREL/SR-510-31462.
30. Pratas MJ, Oliveira MB, Pastoriza-Gallego MJ, et al. High-Pressure Biodiesel Density: Experimental Measurements, Correlation, and Cubic-Plus-Association Equation of State (CPA EoS) Modeling. *Energy Fuels.* 2011;25:3806–3814.
31. Tat ME, Van Gerpen JH. Speed of Sound and Isentropic Bulk Modulus of Alkyl Monoesters at Elevated Temperatures and Pressures. *J Am Oil Chem Soc.* 2003;80:1249-1256.
32. Giuliano Albo PA, Lago S, Wolf H, et al. Density, viscosity and specific heat capacity of diesel blends with rapeseed and soybean oil methyl ester. *Biomass and Bioenergy.* 2017;96:87-95.
33. Miškov SP, Ivaniš GR, Radović IR, et al. High pressure densities and derived properties of biodiesel fuel produced by heterogeneous transesterification from biowaste. *Thermal science.* 2019;23(5):1757-1768.
34. Nikolić BD, Kegl B, Marcović SD, et al. Determining the speed of sound, density and bulk modulus of rapeseed oil, biodiesel and diesel fuel. *Therm Science.* 2012;16:569-579.
35. Aparicio C, Guignon B, Rodriguez-Anton LM, et al. Determination of Rapeseed Methyl Ester Oil Volumetric Properties in High Pressure (0.1 to 350 MPa). *J. Therm. Anal. Calorim.* 2007;89:13–19.
36. Dzida M, Prusakiewicz P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. *Fuel.* 2008;87:1941–1948.
37. Chhetri AB, Watts KC. Densities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures. *Fuel.* 2012;99:210–216.
38. Schedemann A, Wallek T, Zeymer M, et al. Measurement and correlation of biodiesel densities at pressures up to 130 MPa. *Fuel.* 2013;107:483–492.
39. Kontogeorgis GM, Michelsen ML, Folas GK, et al. Ten years with the CPA (Cubic-Plus-Association) Equation of State. Part I (Pure Compounds and Self-Associating System). *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006;45:4855–4868.
40. Kontogeorgis GM, Michelsen ML, Folas GK, et al. Ten years with the CPA (Cubic-Plus-Association) Equation of State. Part II (Cross-Associating and Multicomponents System). *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006;45:4869-4878.
41. Weidlich U, Gmehling J. A modified UNIFAC model. 1. Prediction of VLE, hE, and gamma infinite. *Ind Eng Chem Res.* 1987;26(7):1372–1381.
42. Schmid B, Gmehling J. From van der Waals to VTPR: the systematic improvement of the van der Waals equation of state. *J Supercritical Fluids.* 2010;55:438–447.
43. Oliveira MB, Freitas SVD, Llovel F, et al. Development of simple and transferable molecular models for biodiesel production with the soft-SAFT equation of state. *Chemical Engineering Research and Design.* 2014;92(12):2898-2911.
44. Dong NH, Thuy NT, Tho VDS. Predicting the temperature/pressure dependent density of biodiesel fuels. *Petrovietnam J.* 2012;10:46-58.
45. Pratas MJ, Freitas SVD, Oliveira MB, et al. Biodiesel Density: Experimental Measurements and Prediction Models. *Energy Fuels.* 2011;25:2333–2340.

46. Meng X, Jia M, Wang T. Predicting biodiesel densities over a wide temperature range up to 523 K. *Fuel*. 2013;111:216-222.
47. Spencer CF, Danner RP. Improved equation for prediction of saturated liquid density. *J Chem Eng*. 1972;17:236-241.
48. Talavera-Prieto NMC, Ferreira AGM, Portugal ATG, et al. Correlation and Prediction of Biodiesel Density. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. 2014;8(12):1303-1312.
49. Ndiaye HI, Habrioux M, Coutinho JAP, et al. Speed of sound, density, and derivative properties of ethyl myristate, methyl myristate, and methyl palmitate under high pressure. *J. Chem. Eng*. 2013;58:1371-1377.
50. Outcalt SL. Compressed-liquid density measurements of methyl oleate and methyl linoleate. *J. Chem. Eng*. 2011;56:4239-4243.
51. Schaschke C, Fletcher I, Glen N. Density and Viscosity Measurement of Diesel Fuels at Combined High Pressure and Elevated Temperature. *Processes*. 2013;1:30-48.
52. Perdomo FA, Millan BM, Aragon JL. Predicting the physicochemical properties of biodiesel fuels assessing the molecular structure with the SAFT- γ group contribution approach. *Energy*. 2014;72:274-290.
53. Hegel P, Mabe G, Pereda S, et al. Phase Transitions in a Biodiesel Reactor Using Supercritical Methanol. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2007;46:6360.
54. Velez A, Hegel P, Mabe G, et al. Density and Conversion in Biodiesel Production with Supercritical Methanol. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2010;49(16):7666-7670.
55. Velez A, Soto G, Hegel P, et al. Continuous production of fatty acid ethyl esters from sunflower oil using supercritical ethanol. *Fuel*. 2012;97:703–709.
56. Komintarachat C, Sawangkeaw R, Ngamprasertsith S. Density Determination of Ethyl Acetate-Palm Oil Mixture in Supercritical Condition. *Engineering journal*. 2014;19(2):29-39.
57. Sakdasri W, Sawangkeaw R, Medina-Gonzalez Y, et al. Experimental Study and Modeling of Phase Equilibrium of the Methanol–Tripalmitin System: Application to Palm Oil Transesterification with Supercritical Methanol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016;55(18):5190-5199.
58. Barabás I. Liquid densities and excess molar volumes of ethanol+biodiesel binary system between the temperatures 273.15 K and 333.15 K. *Journal of Molecular Liquids*. 2015;204:95-99.
59. Cotabarren NS, Velez AR, Hegel PE, et al. Prediction of Volumetric Data in Supercritical Reactors. *J. Chem. Eng*. 2016;61(8):2669-2675.
60. Palavra MF, Cardoso MAT, Coelho JAP, et al. Density Measurements of Fluids and Their Mixtures at High Pressure. *Chemical Engineering & Technology*. 2007;30:689–694.
61. Velez A, Pereda S, Brignole EA. Isochoric lines and determination of phase transitions in supercritical reactors. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2010;55:643–647.
62. Espinosa S, Fornari T, Bottini S, et al. Phase Equilibria in Mixtures of Fatty oils and Derivatives with Near Critical Fluids Using the GC-EoS Model. *J. Supercrit. Fluids*. 2002;23:91.
63. Ferreira O, Macedo EA, Brignole EA. Application of the GCA-EoS Model to Supercritical Processing of Associating Oil Derivatives: Fatty Acids, Alcohols and Triglycerides. *J. Food Eng*. 2005;70:579.
64. Sawangkeaw R, Satayanon W, Bunyakiat K, et al. Continuous Production of Biodiesel with Supercritical Methanol: a Simple Compressible Flow Model for Tubular Reactors. *Int. J. Chem. React. Eng*. 2011;9:23-32.
65. Timms RE. Physical Properties of Oils and Mixtures of Oils. *JAOCs*. 1985;62(2):241–249.
66. Fasina OO, Colley Z. Viscosity and Specific Heat of Vegetable Oils as a Function of Temperature: 35 °C to 180 °C. *International Journal of Food Properties*. 2008;11(4):738–746.
67. Santos JCO, Santos MGO, Dantas JP, et al. Comparative study of specific heat capacities of some vegetable oils obtained by DSC and microwave oven. *J. Therm. Anal. Cal*. 2005;79:283-287.

68. Morad NA, Mustafa Kamal AA, Panau F, et al. Liquid specific heat capacity estimation for fatty acids, triacylglycerols, and vegetable oils based on their fatty acid composition. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 2000;77:1001-1005.
69. Rojas EEG, Coimbra JSR, Telis-Romero J. Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower, and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties*. 2013;16:1620–1629.
70. Su YC, Liu YA. Selection of Prediction Methods for Thermophysical Properties for Process Modeling and Product Design of Biodiesel Manufacturing. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011;50:6809-6836.
71. Zong L, Ramanathan S, Chen CC. Fragment-Based Approach for Estimating Thermophysical of Fats and Vegetable Oils for Modeling Biodiesel Production Process. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2010;49(2):876-886.
72. Animescu G, Bruno TJ. Fluid properties needed in supercritical transesterification of triglyceride feedstocks to biodiesel fuels for efficient and clean combustion – A review. *J. of Supercritical Fluids*. 2012;63:133-149.
73. Hoekman SK, Broch A, Robbins C, et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy*. 2012;16:143-169.
74. Saxena P, Jawale S, Joshipur MH. A review on prediction of properties of biodiesel and blends of biodiesel. *Procedia Engineering*. 2013;51:395-402.
75. Larsson R, Andersson O. Lubricant thermal conductivity and heat capacity under high pressure. *Journal of Engineering Tribology*. 2000;214(4):337-342.
76. Leu BM, Yavas H, Kantor I, et al. Specific Heat of Olive Oil to 356 MPa. *J Am Oil Chem Soc.* 2010;87:1517-1520.
77. Nguyen LT, Balasubramaniam VM, Sastry SK. Determination of in-situ thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric specific heat and isobaric specific heat of selected foods under pressure. *UnderInternational Journal of Food Properties*. 2012;15:169-187.
78. Wu J, Liu Z, Jin X, et al. Thermal conductivity of some oxygenated fuels and additives in the saturated liquid phase. *Journal of Chemical and Engineering*. 2005;50(1):102-104.
79. Turgut A, Tavman I, Tavman S. Measurement of thermal conductivity of edible oils using transient hot wire method. *International Journal of Food Properties*. 2009;12:741-747.
80. Brock J, Nogueira MR, Zakrzewski C, et al. Experimental measurements of viscosity and thermal conductivity of vegetable oils. *Ciencia Tecnol. Aliment.* 2008;28:564-570.
81. Vozárová V, Božiková M, Valach M, et al. Comparative study of edible vegetable oils physical properties. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2015;19(2):67-70.
82. Hoffmann JF, Henry JF, Vaitilingom G, et al. Temperature dependence of thermal conductivity of vegetable oils for use in concentrated solar power plants, measured by 3 omega hot wire method. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;107:105-110.
83. Atgur V, Manavendra G, Desai GP. Experimental Investigation of Thermal Conductivity and Specific Heat and Thermal Degradation of Vegetable Oils for A Range Of Temperature. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*. 2016;4:107-111.
84. Zongo EAS, Vařtilingom G, Daho T, et al. Temperature Dependence of Density, Viscosity, Thermal Conductivity and Heat Capacity of Vegetable Oils for Their Use as Biofuel in Internal Combustion. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2019;9(1):44-64.
85. Perkins RA, Huber ML. Measurement and Correlation of the Thermal Conductivities of Biodiesel Constituent Fluids: Methyl Oleate and Methyl Linoleate. *Energy Fuels* 2011;25:2383-2388.
86. Horrocks JK, McLaughlin E. Thermal conductivity of simple molecules in the condensed state. *Trans. Faraday Soc.* 1960;56:206-212.
87. Horrocks JK, McLaughlin E. Temperature dependence of the thermal conductivity of liquids. *Trans. Faraday Soc.* 1963;59:1709-1716.
88. Nouredini H, Teoh BC, Clements DL. Viscosities of Vegetable Oils and Fatty Acids. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1992;69(12):1189–1191.
89. Abramovic H, Klofutar C. The temperature dependence of dynamic viscosity for some vegetable oils. *Acta Chimica Slovenica*. 1998;45(1): 69-77.
90. Oroian M, Gutt G. Influence of temperature on the physical properties of vegetable oils. *Journal of Faculty of Food Engineering*. 2015;14(2):162-170.

91. Anand K, Ranjan A, Mehta PS. Estimating the Viscosity of Vegetable Oil and Biodiesel Fuels. *Energy Fuels*. 2010;24:664–672.
92. Diamante LM, Lan T. Absolute Viscosities of Vegetable Oils at Different Temperatures and Shear Rate Range of 64.5 to 4835 s⁻¹. *Journal of Food Processing*. 2014;12:12-17.
93. Sahasrabudhe SN, Rodriguez-Martinez V, O'Meara M, et al. Density, viscosity, and surface tension of five vegetable oils at elevated temperatures: Measurement and modeling. *International journal of food properties*. 2017;20(2):1965-1981.
94. Schaschke CJ, Abid S, Heslop MJ. High-pressure viscosity measurement of fatty acids and oils. *High Pressure Research*. 2007;27(1):33–37.
95. Schaschke CJ, Allio S, Holmberg E. Viscosity measurement of vegetable oil at high pressure. *Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing*. 2006;84(3):173-178.
96. Mawatari T, Fukuda R, Mori H, et al. High Pressure Rheology of Environmentally Friendly Vegetable Oils. *Tribol Lett*. 2013;51:273–280.
97. Tate RE, Watts KC, Allen CAW. The viscosity of three biodiesel fuels at temperatures up to 300 °C. *Fuel*. 2006;85:1010-1015.
98. Yuan W, Hansen AC, Zhang Q, et al. Temperature dependent kinematic viscosity of selected biodiesel fuels and blends with diesel fuel. *J. Am. Oil Chem. Soc*. 2005;82:195-199.
99. Nita I, Geacai S. Study of density and viscosity variation with temperature for fuels for diesel engine. *Ovidius Univer. Ann. Chem*. 2011;22:57-61.
100. Nita I, Geacai S, Iulian O. Measurements and correlations of physical-chemical properties to composition of pseudo-binary mixtures with biodiesel. *Renewable Energy*. 2011;36:3417-3423.
101. Moradi GR, Karami B, Mohadesi M. Densities and kinematic viscosities in biodiesel-diesel blends at various temperatures. *J. Chem. Eng*. 2012;58:99-105.
102. Knothe G, Steidley KR. Kinematic viscosity of biodiesel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*. 2005;84:1059–1065.
103. Allen CAW, Watts KC, Ackman RG, et al. Predicting the viscosity of biodiesel fuels from their fatty acid ester composition. *Fuel*. 1999;78:1319-1326.
104. Freitas S, Pratas MJ, Ceriani R, et al. Evaluation of predictive models for the viscosity of biodiesel. *Energy Fuels*. 2001;25:352-358.
105. De Macedo TO, Pereira RG, Pardal JM, et al. Viscosity of vegetable oils and biodiesel and energy generation. *Int. Schol. Sci. Res. Innov*. 2013;7:184-189.
106. Pratas MJ, Freitas S, Oliveira MB, et al. Acid Methyl and Ethyl Esters. *J. Chem. Eng*. 2010;55:3983–3990.
107. Nwadi I, Yahaya M, O'Donnell S, et al. Cold Flow Properties and Kinematic Viscosity of Biodiesel Universal. *Journal of Chemistry*. 2013;1(4):135-141.
108. Sousa FP, Luciano MA, Pasa VMD. Thermogravimetry and viscometry for assessing the ester content (FAME and FAEE). *Fuel Process. Technol*. 2013;109:133–140.
109. Bair S. The pressure and temperature dependence of volume and viscosity of four Diesel fuels. *Fuel*. 2014;135:112–119.
110. Bair S. High pressure rheology for quantitative elastohydrodynamics. *Amsterdam: Elsevier Science*. 2007;68:116-122.
111. Bair S, Mary C, Bouscharain N, et al. An improved Yasutomi correlation for viscosity at high pressure. *Proc Inst Mech Eng Part J: J Eng Tribol*. 2013;227(9):1056-60.
112. Laesecke A, Bair S. High-pressure viscosity measurements of 1,1,1,2-tetrafluoroethane. *Int J Thermophys* 2011;32(5):925-41.
113. Chhetri AB, Watts KC. Viscosities of canola, jatropha and soapnut biodiesel at elevated temperatures and pressures. *Fuel*. 2012;102:789–794.
114. Duncan AM, Ahosseini A, McHenry R, et al. High-Pressure Viscosity of Biodiesel from Soybean, Canola, and Coconut Oils. *Energy Fuels*. 2010;24:5708-5716.
115. Duncan AM, Pavlicek N, Depcik CD, et al. High-Pressure Viscosity of Soybean-Oil-Based Biodiesel Blends with Ultra-Low-Sulfur Diesel Fuel. *Energy Fuels*. 2012;26:7023–7036.
116. Segovia JJ, Carmen MM, Zambrano J, et al. Measurement and prediction of high-pressure viscosities of biodiesel fuels. *Fuel*. 2014;122:223-228.

117. Habrioux M, Bazile JP, Galliero G, et al. Viscosities of Fatty Acid Methyl and Ethyl Esters under High Pressure: Methyl Caprate and Ethyl Caprate. *J. Chem. Eng.* 2015;60(3):902-908.
118. Habrioux M, Nasri D, Daridon JL. Measurement of speed of sound, density compressibility and viscosity in liquid methyl laurate and ethyl laurate up to 200 MPa by using acoustic wave sensors. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2018;120:1-12.
119. Robertson LX, Schaschke CJ. Combined High Pressure and Low Temperature Viscosity Measurement of Biodiesel. *Energy Fuels*. 2010;24:1293–1297.
120. Schaschke CJ. Experimental viscosity measurements of biodiesels at high pressure. *Chem. Ind. Chem. Eng.* 2016;22(4):453–460.
121. Shamsetdinov FN, Bulaev SA, Zaripov ZI. The coefficient of thermal expansion of vegetable oils at high pressures. *Vestnik Kazan. tech. University named after A.N. Tupolev*. 2011;2:11-16.
122. Usmanov RA, Gabitov RR, Gumerov FM, et al. Pilot Unit for Permanent Transesterification of Vegetable Oils in Supercritical Methanol or Ethanol Media. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2011;5(8):1216–1227.
123. Gabitov RR, Gabitov IR, Shamsetdinov FN, et al. The heat capacity of the mixture of rapeseed oil and alcohols, are in sub- and supercritical fluid conditions. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012;15(9):56-59.
124. Mazanov SV, Usmanov RA, Gumerov FM, et al. Thermophysical bases of catalytic and non-catalytic transesterification of rapeseed oil in ethanol under supercritical fluid conditions. *Butlerov Communications*. 2015;41(1):58-66.
125. Usmanov R.A., Gumerov F.M., Gabitov F.R., et al. Liquid Fuels: Chap. 3. Types, Properties and Production. Nova Science, 2012. p. 99.
126. Gabitov RR, Nakipov RR, Shamsetdinov FN, et al. Portable properties of vegetable oils. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012;21(15):25-27.
127. Gabitov IR, Nakipov RR, Zaripov ZI. Thermal conductivity coefficients of a mixture of rapeseed oil - ethanol in the temperature range of 303-363 K and pressures up to 30 MPa. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014;6(17):113-116.
128. Gabitova AR, Gabitov IR, Zaripov ZI. Investigation of the coefficient of dynamic viscosity of rapeseed oil as the basis of biodiesel fuel in a wide range of changes in state parameters. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015;17(18):252-254.

Authors of the publication

Sergey V. Mazanov – Ph.D. tech. sciences, Kazan National Research Technological University.

Zufar I. Zaripov - Doctor of engineering sciences, Kazan National Research Technological University.

Farid M. Gumerov – Doctor of engineering sciences, Kazan National Research Technological University.

Rustem A. Usmanov – Doctor of engineering sciences, Kazan National Research Technological University.

Yury A. Shapovalov – Doctor of engineering sciences, Kazakh National University al-Farabi

Получено 01.08.2022г.

Отредактировано 23.08.2022г.

Принято 16.09.2022г.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.3.066:621.3

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-61-73

АНАЛИЗ ПАРКА И ОЦЕНКА КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ 10 кВ ФИЛИАЛА ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР»-«ОРЕЛЭНЕРГО»

Виноградов ¹А.В., Лансберг ²А.А.

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

²Филиал ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», г. Орел, Россия

winaleksandr@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. Анализ парка и оценка коммутационного ресурса выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». МЕТОДЫ. В работе на основе базы данных филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» был произведен анализ парка высоковольтных выключателей 10 кВ, выявлены типы применяемых выключателей, их доли в составе парка выключателей. Исследован парк выключателей по техническим характеристикам, в том числе номинальным токам и токам предельной отключающей способности в соответствии с ГОСТ Р 52565-2006 и ГОСТ 687-78, а также действующими стандартами технической организации ПАО «Россети». РЕЗУЛЬТАТЫ. В ходе исследования было выявлено, что парк выключателей 10 кВ, установленных в распределительных устройствах подстанций с высшим напряжением 35-110 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» представлен 1833 коммутационными аппаратами, среди которых: 1197 выключателей с маломасляными дугогасительными камерами, 636 выключателей – с вакуумными, что составляет, соответственно 65% и 35% парка. При этом 1009 коммутационных аппаратов имеют номинальный ток 630 А, а 366 коммутационных аппаратов – 1000 А, 1526 единиц оборудования имеет номинальный ток отключения 20 кА. Выполнено сравнение маломасляного выключателя типа ВМП и вакуумного выключателя ВВВ с современным вакуумным выключателем серии ВВ/TEL с точки зрения коммутационного ресурса с целью обоснования его применения для замены указанных выключателей на конкретных линиях электропередачи. ВЫВОДЫ. Выявление параметров парка выключателей 10 кВ позволяет разрабатывать рациональные планы по замене оборудования. Анализ коммутационного ресурса разных типов выключателей позволяет выбрать оборудование с лучшими характеристиками.

Ключевые слова: парк выключателей 10 кВ; высоковольтный выключатель; коммутационный ресурс; отключающая способность.

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А. Анализ парка и оценка коммутационного ресурса выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети центр»-«Орелэнерго» // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 61-73. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-61-73.

ANALYSIS OF THE FLEET AND EVALUATION OF THE SWITCHING RESOURCE OF 10 kV SWITCHES OF THE BRANCH OF PJSC «ROSSETI CENTER»- «ORELENERGO»

Vinogradov ¹A.V., Lansberg ²A.A.

¹FGBNU «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», Moscow, Russia

²Filial PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», Orel, Russia
winaleksandr@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* Analysis of the fleet and evaluation of the switching resource of 10 kV switches of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo». *METHODS.* In the work, based on the database of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo», an analysis of the fleet of 10 kV high-voltage switches was carried out, the types of switches used, their shares in the fleet of switches were identified. The park of circuit breakers was investigated according to technical characteristics, including rated currents and currents of maximum breaking capacity in accordance with GOST R 52565-2006 and GOST 687-78, as well as the current standards of the technical organization of PJSC «Rosseti». *RESULTS.* In the course of the study, it was revealed that the fleet of 10 kV switches installed in switchgear substations with a higher voltage of 35-110 kV of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenergo» is represented by 1833 switching devices, among which: 1197 switches with low-oil arc extinguishing chambers, 636 switches with vacuum, which is, respectively, 65% and 35% of the park. At the same time, 1009 switching devices have a rated current of 630 A, and 366 switching devices – 1000 A, 1526 pieces of equipment have a rated cut-off current of 20 kA. A comparison of a low-oil switch of the VMP type and a vacuum switch BBB with a modern vacuum switch of the BB/TEL series from the point of view of the switching resource in order to justify its use to replace these switches on specific power lines. *CONCLUSIONS.* Identification of the parameters of the 10 kV circuit breaker fleet makes it possible to develop rational plans for equipment replacement. Analysis of the switching resource of different types of switches allows you to choose equipment with the best characteristics.

Keywords: 10 kV switch park; high-voltage switch; switching resource; breaking capacity.

For citation: Vinogradov AV, Lansberg AA. Analysis of the fleet and evaluation of the switching resource of 10 kv switches of the branch of pjsc «Rosseti Center»-«Orelenergo». *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):61-73. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-61-73.

Введение (Introduction)

Надёжность систем электроснабжения зависит от надёжности применяемого в их составе оборудования. Среди общего парка электрооборудования значительную долю занимают коммутационные аппараты, преимущественно высоковольтные выключатели. Они используются для оперативного управления режимами работы энергосистемы и выполнения переключений, коммутации рабочих токов, отключения токов коротких замыканий с целью своевременного устранения аварийных режимов и недопущения выхода из строя электрооборудования, нарушения устойчивости энергосистемы и предотвращения массового недоотпуска электроэнергии. Персоналом электросетевых организаций реализуется стратегия планово-предупредительного ремонта для поддержания в работоспособном состоянии оборудования, в том числе выключателей, совершенствуются методы контроля технического состояния и диагностирования электрооборудования [1-4]. Оценивается влияние типов применяемых высоковольтных выключателей на функционирование электрических сетей, в том числе на появление коммутационных перенапряжений, также снижающих надёжность систем электроснабжения за счёт воздействия на изоляцию оборудования электрических сетей [5].

Важным направлением эксплуатации высоковольтных выключателей является оценка их коммутационного ресурса. С целью планирования стратегии планово-предупредительного ремонта при эксплуатации парка высоковольтных выключателей необходимо определять остаточный ресурс при коммутации рабочих токов и токов коротких замыканий для каждого выключателя. В работе [6] рассмотрены разные методы оценки расхода коммутационного ресурса на примере высоковольтного выключателя У-110-2000-40: на основе данных завода изготовителя, технической диагностики, показателей надёжности выключателя и вероятности его безотказной работы. Автором сделаны выводы,

что ни один из существующих методов в полной мере не позволяет определить расход коммутационного ресурса выключателя, в связи с чем в настоящее время требуется разработка комплексного метода для оценки технического состояния выключателей и разработки стратегии планово-предупредительных ремонтов.

В работе [7] произведена аналитическая оценка влияния схемных параметров на примере МЭС Центра на коммутационный ресурс современных элегазовых высоковольтных выключателей 110-500 кВ. Так, авторами отмечено, что в МЭС Центра в эксплуатации преимущественно находятся выключатели с номинальными токами отключения 31,5 кА и 40 кА. С учетом статистических сведений авторами было выявлено, что в линии 110 кВ за весь срок эксплуатации в 25 лет выключатель произведёт отключение 42-75 токов КЗ со средним значением 3,5 кА, что не приведёт к расходу его ресурса раньше, чем закончится нормативный срок службы [7].

Разработан способ (патент №2249828) определения коммутационного ресурса выключателя, заключающийся в экспериментальном определении допустимого числа циклов «включение-отключение» при разных токах коммутации. Недостатком способа является то, что он не позволяет при разных токах коммутации оценить расходование коммутационного ресурса выключателя и действующее значение остаточной величины коммутационного ресурса.

Данный вопрос решен в способе (патент №2554635) оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей в зависимости от величины коммутируемого тока. Так, уменьшение коммутационного ресурса при текущей коммутации протекающего тока можно определить по формуле (1):

$$P_c = \frac{I_t^2}{I_{o\text{ ном}}^2}, \quad (1)$$

где I_t – действующее значение коммутируемого тока, кА;

$I_{o\text{ ном}}$ – номинальная коммутационная способность выключателя, кА.

Остаточный коммутационный ресурс P_o определяется по формуле (2) как разность между установленным коммутационным ресурсом P_k и полученным значением сработанного коммутационного ресурса при коммутируемом токе I_t :

$$P_o = P_k - P_c, \quad (2)$$

где P_o – остаточный коммутационный ресурс, о.е.;

P_k – начальное значение коммутационного ресурса, о.е.;

P_c – сработанный коммутационный ресурс при отключении тока I_t , о.е.

На основании разработанного метода в работе [8] была произведена оценка расхода коммутационного ресурса при разных значениях коммутируемого тока для трех типов выключателей: воздушного ВВД-220Б-40/2000, маломасляного ВМТ-220Б-40/2000, элегазового ВЭК-220-40/2000 с предельной отключающей способностью 40 кА. Полученные значения расхода коммутационного ресурса для данных типов выключателей позволили выявить зависимость расхода коммутационного ресурса P_c от тока коммутации I_t .

Как отмечено в работе [9], недостатком существующих методов оценки расхода коммутационного ресурса высоковольтных выключателей является их оценка на моделях, а не действующих электроустановках. В связи с этим была произведена оценка коммутационного ресурса высоковольтного выключателя 110 кВ ЗАР1DT-145/ЕК производства компании «SIEMENS» с отключающей способностью 31,5 кА, установленного на подстанции 110/35/10/6 кВ «Советская», у которой максимальный ток трехфазного КЗ на шинах 110 кВ составляет 13,2 кА [9]. Исходя из предложенной в указанной работе формулы (3), позволяющей определить число допустимое число коммутаций при коммутационной способности P_k и сработанном ресурсе P_c при токе I_t [9]:

$$n = \frac{P_k}{P_c}, \quad (3)$$

где n – число коммутаций при текущем сработанном ресурсе P_c и полном коммутационном ресурсе P_k [9].

Исходя из вышеизложенного можно резюмировать, что практическую значимость имеет определение коммутационного ресурса при коммутациях токов различной величины, находящихся в эксплуатации старых высоковольтных выключателей 10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», с

планированием мероприятий по техперевооружению путем установки современных выключателей с определением их коммутационного ресурса на тех же электроустановках.

Цель работы: выполнить анализ парка и оценку коммутационного ресурса выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

Материалы и методы исследования (Materials and methods)

Для исследования были использованы данные по срокам службы, техническим характеристикам, техническому состоянию высоковольтных выключателей 10 кВ, хранящиеся в базе данных SAP Logon электросетевой организации ПАО «Россети Центр и Приволжье».

Анализ технического состояния электрооборудования осуществлялся в соответствии с диапазонами, указанными в Приказе Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. №676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей».

Техническое состояние высоковольтных выключателей 10 кВ было определено для каждого выключателя исходя из результатов диагностических исследований, при этом специалистами филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» не учитывались коммутируемые выключателями токи нормального и аварийных режимов ввиду отсутствия возможности их измерения на каждом объекте, что не позволяет достоверно судить об действующем техническом состоянии выключателей. Данные по техническому состоянию парка выключателей 10 кВ, представленные в данной работе, были получены с учетом результатов местного контроля и диагностики.

Оценка сроков службы парка высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» производилась на основании следующих положений. Согласно «ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия» и «ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия» высоковольтные выключатели изготавливаются на срок службы до 30 лет, при этом срок среднего или капитального ремонта для разных типов выключателей может варьироваться в диапазоне от 8 до 12 лет. Таким образом, анализ срока эксплуатации высоковольтных выключателей, установленных в распределительных устройствах филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», представим в виде трех диапазонов: срока до первого среднего или капитального ремонта (до 12 лет), от превышающего срок среднего или капитального ремонта до предельно допустимого срока службы (12-30 лет), превышающий допустимый срок службы (более 30 лет).

Анализ технических характеристик выключателей, в частности номинальных токов выключателей $I_{ном}$ и номинальных токов отключения выключателей $I_{о, ном}$ - производился в соответствии со значениями, указанными в ГОСТ Р 52565-2006 и ГОСТ 687-78.

Для сравнения расхода коммутационного ресурса маломасляного и вакуумного выключателей старых серий с вакуумным новой серии были выбраны 2 высоковольтных выключателя 10 кВ: маломасляный типа ВПМ-10-20/630, установленный в 1991 году на отходящем фидере №3 от подстанции 35/10 кВ «Бакланово» в Орловском районе, и вакуумный типа ВВВ-10-4-400, установленный в 1982 году на отходящем фидере №2 от подстанции 10/0,4 кВ от подстанции 35/10 кВ «Росстани» в Ливенском районе. Рассматриваемые выключатели в соответствии со внутренним стандартом ПАО «Россети» «СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» необходимо менять на современные вакуумные выключатели, среди которых в настоящее время целесообразно выбрать выключатель производства группы компаний «Таврида Электрик» типа ВВ/TEL-10-1000/20 с номинальной отключающей способностью 20 кА и номинальным током 1000 А [10].

Сведения о технических характеристиках маломасляного и вакуумного выключателей, установленным на подстанциях 35/10 кВ «Бакланово» и 35/10 кВ «Росстани», а также предполагаемого к установке современного вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики выключателей 10 кВ, оцениваемых по расходу коммутационного ресурса

Подстанция	Отходящая линия 10 кВ	Тип выключателя	Конструкция выключателя	$I_{ном}$ А	$I_{отк.}$ А
<i>Действующие выключатели</i>					
35/10 кВ «Росстани»	Фидер №2	Вакуумный	ВВВ	400	4
35/10 кВ «Бакланово»	Фидер №3	Маломасляный	ВПМ	630	20
<i>Предполагаемые к установке выключатели</i>					
35/10 кВ «Росстани», 35/10 кВ «Бакланово»	Фидер №2, Фидер №3	Вакуумный	ВВ/TEL	1000	20

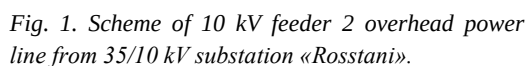
Для расчета расхода коммутационного ресурса выключателей необходимо знать значения токов короткого замыкания в представленных отходящих линиях. В связи с этим были использованы значения токов короткого замыкания на шинах 10 кВ подстанций 35/10 кВ «Бакланово» и 35/10 кВ «Росстани», составляющие 1041 А и 1641 А, рассчитанные персоналом службы релейной защиты филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Расчет был произведен по методике, рассмотренной в работе [11] в соответствии со стандартом «ГОСТ Р 52735-2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. Дата введения 2008-07-01». Результаты расчета представлены на рисунках 1-2.

Расход коммутационного ресурса и оценку допустимых коммутаций целесообразно производить по методике, рассмотренной в работе [9]. При этом следует учитывать следующие положения по коммутационному ресурсу выключателей. Согласно ГОСТ 687-78, старые высоковольтные выключатели допускали для каждого полюса выключателя количество операций отключения (ресурс по коммутационной стойкости) при токах короткого замыкания и при нагрузочных токах, представленное в таблице 2.

Таблица 2

Допустимый коммутационный ресурс для высоковольтных выключателей, выпущенных в соответствии с ГОСТ 678-78.

Виды выключателей	Наименьшее допустимое количество операций отключения при токах в диапазонах 30-60% / 60-100% $I_{о,ном}$ при значениях $I_{о,ном}$, кА				
	До 20	20-31,5	40	50	63
	30-60 / 60-100	30-60 / 60-100	30-60 / 60-100	30-60 / 60-100	30-60 / 60-100
Уровень А					
Воздушные	17 / 10	14 / 8	12 / 7	7 / 4	7 / 4
Маломасляные	12 / 7	9 / 5	7 / 4	7 / 4	7 / 4
Уровень Б					
Виды выключателей	Наименьшее допустимое количество операций отключения при токах в диапазонах 60-100% $I_{о,ном}$ при значениях $I_{о,ном}$, кА				
	До 20	20-31,5	40	50	63
Воздушные	30	25	20	18	10
Маломасляные	20	18	15	10	6
Элегазовые	10	7	6	6	6
Вакуумные	30	25	20	18	10



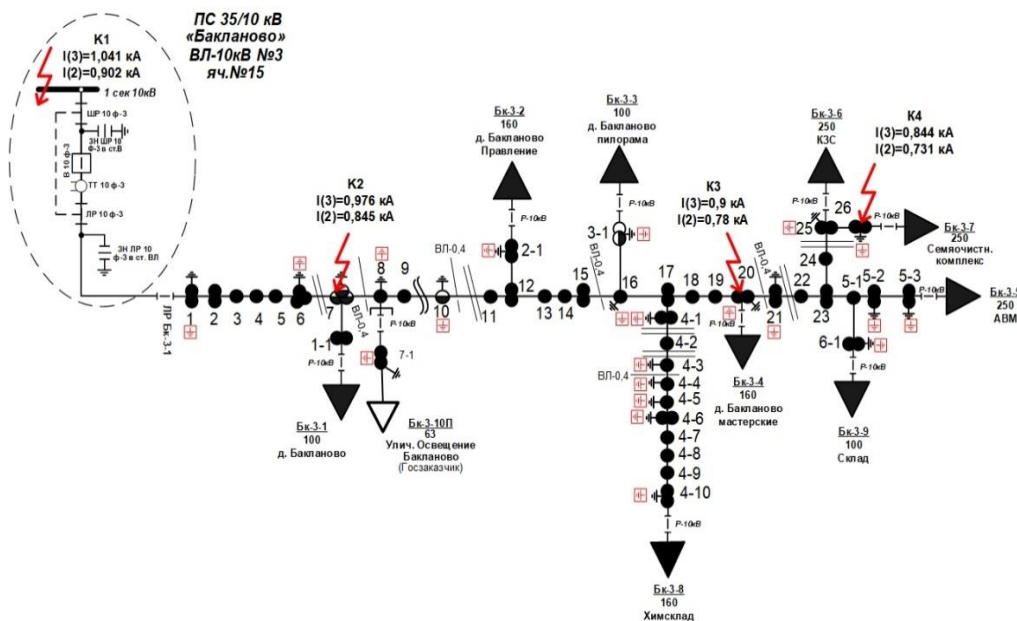


Рис.2. Схема ВЛ 10 кВ фидер №3 от подстанции 35/10 кВ «Бакланово».

Fig.2 - Scheme of 10 kV feeder 3 overhead from 35/10 kV substation «Baklanovo».

Исходя из этого для вакуумного выключателя ВВВ-10-400/4 коммутационный ресурс R_k следует принять равным 30 допустимым отключениям тока предельной коммутационной способности $I_{o\text{ ном}}$ 4 кА, при этом механический ресурс выключателя согласно техническим характеристикам [12] составляет 50000 коммутаций, а для маломасляного выключателя ВПМ-10-20/630, согласно инструкции по эксплуатации [13], коммутационный ресурс R_k равен 10 допустимым отключениям тока $I_{o\text{ ном}}$ 20 кА и 17 отключениям тока 12 кА при механическом ресурсе 2500 коммутаций.

В свою очередь, предполагаемый к замене выключатель типа ВВ/TEL-10-1000/20 был выпущен в соответствии с ГОСТ Р 52565-2006, в котором установлено допустимое число коммутаций, представленное в таблице 3.

Таблица 3

Допустимый коммутационный ресурс для высоковольтных выключателей, выпущенных в соответствии с ГОСТ 52565-2006

Виды выключателей	Допустимое число коммутаций при значениях тока $I_{o\text{ ном}}$, кА			
	До 31,5	40	50	53
Газовые	20	15	12	8
Вакуумные	25	20	18	10

В соответствии с данными таблицы 3 для высоковольтного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 с предельной отключающей способностью 20 кА следовало бы принять допустимое число коммутаций – 25, при этом в руководстве по эксплуатации выключателя [10] коммутационный ресурс задан 100 допустимыми коммутациями номинального тока отключения, а механический – 150000 коммутаций. Таким образом, данные значения коммутационного и механического ресурса для рассматриваемых высоковольтных выключателей позволят оценить расход коммутационного ресурса при коммутации токов нормальных и аварийных режимов в различных точках исследуемых сетей.

Результаты исследования

В настоящее время парк высоковольтных выключателей 10 кВ, установленных в распределительных устройствах подстанций с высшим напряжением 35-110 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» представлен 1833 коммутационными аппаратами, среди которых: 1197 выключателей с масляными дугогасительными камерами, а 636 выключателей – с вакуумными, - что составляет, соответственно, 65% и 35% парка.

На рисунке 3 представлены данные о типах применяемых в Орелэнерго вакуумных высоковольтных выключателей. Большая часть парка представлена 259-ю современными выключателями типа ВВ/TEL, которые составляют 41% от общего количества. Данные выключатели выпускает группа компаний ООО «Таврида Электрик», и они являются одним из рекомендованных к применению типов выключателей 10 кВ компанией ПАО «Россети» при сооружении и реконструкции подстанций [14]. Среди парка вакуумных выключателей

10 кВ современными являются только 498 из 636 единиц оборудования, что составляет 78% от общего количества.

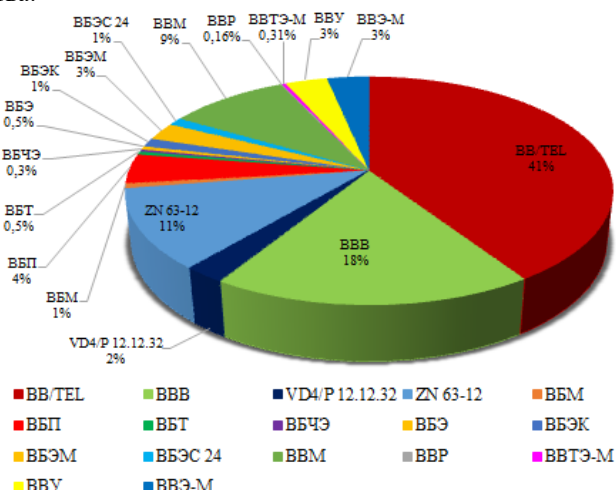


Рис. 3. Типы конструктивного исполнения вакуумных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

Fig. 3. Types of design design of vacuum circuit breakers of 10 kV branch of PJSC «Russian Grids Center»-«Orelenenergo».

На рисунке 4 представлены типы применяемых в Орёлэнерго маломасляных выключателей 10 кВ.

Так, наибольшая часть парка представлена следующими типами высоковольтных выключателей: 29% - 344 горшковых маломасляных выключателя типа ВМГ, 24% - 283 выключателя типа ВК, 15% - 184 выключателя типа ВМПП.

Согласно пункту 7.13 «СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» при сооружении и реконструкции подстанций в распределительном устройстве должны планироваться к установке вакуумные выключатели. Таким образом, доля современного оборудования парка высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», которая при 498 современных вакуумных выключателях 10 кВ из 636 и общем количестве маломасляных выключателей 1183 составит 27%.

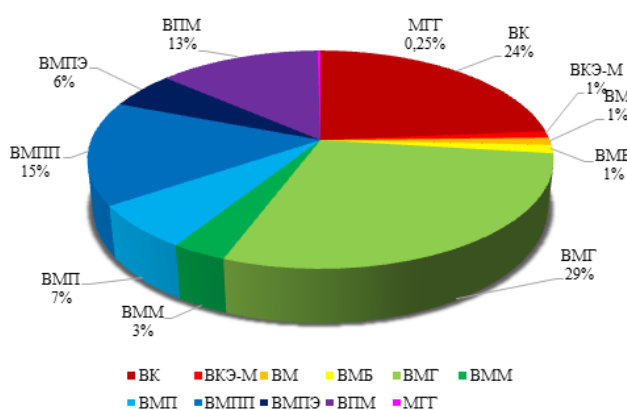


Рис. 4. Типы конструктивного исполнения маломасляных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

Fig. 4. Types of structural design of low-oil switches of 10kV branch of PJSC «Russian Grids Center»-«Orelenenergo».

В результате анализа технического состояния высоковольтных вакуумных и маломасляных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» было выявлено, что 1175 выключателей парка имеют очень хорошее техническое состояние, характеризующееся индексом технического состояния равным или превышающим 85%. В хорошем техническом состоянии с индексом в диапазоне 70-85% находятся 587 выключателей, составляющие 32% парка. При этом 70 высоковольтных выключателей 10 кВ находятся удовлетворительном техническом состоянии с индексом 50-70%, формирующим 4% от общего парка. Один высоковольтный выключатель типа ВПМ-10-

20/6300, установленный на подстанции 35/10 кВ «Судбищи» в 1964 году, находится в неудовлетворительном техническом состоянии с индексом 41%, что требует в ближайшее время реализации мероприятий по техническому ремонту выключателя, либо его замене на современный вакуумный выключатель.

В ходе анализа сроков службы высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» было выявлено, что срок эксплуатации, не превышающий срок среднего ремонта в 12 лет, не превысили 340 выключателей, что составляет 18% парка. При этом наименьший срок эксплуатации имеет вакуумный высоковольтный выключатель типа ВВ/TEL-10-20/630, установленный на подстанции 110/10 кВ «Речица» в 2021 году. Срок эксплуатации от 12 лет до 30 лет имеют 487 высоковольтных выключателей, что составляет 27% парка. Сроком эксплуатации, превысившем нормативный срок службы в 30 лет, характеризуются 1006 выключателей, что составляет 55% парка. Наибольший срок эксплуатации, составляющий 63 года, имеют 2 выключателя типа ВМБ-10-200-5,8, установленные на подстанции 35/10 кВ «Тросна» в 1958 году.

На рисунке 5 представлен анализ номинальных токов высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Было выявлено, что 1009 коммутационных аппаратов имеют номинальный ток 630 А, а 366 коммутационных аппаратов – 1000 А, в совокупности, составляющие 75% парка высоковольтных выключателей.

При этом в парке высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» имеется 110 выключателей с номинальными токами 320 А, 600 А, 3000 А и 3200 А, составляющих 6% парка. Они не соответствуют ряду номинальных токов согласно ГОСТ Р 52565-2006.

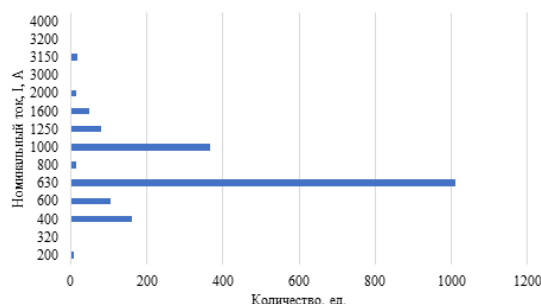


Рис. 5 Номинальные токи выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

Fig. 5 Nominal currents of 10 kV switches of the branch of PJSC «Russian Center» -«Orelenargo».

На рисунке 6 представлен анализ номинальных токов отключения парка высоковольтных выключателей филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго». Большая часть парка высоковольтных выключателей в количестве 1526 единиц имеет номинальный ток отключения 20 кА, что составляет 83% от общего количества.

В парке высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» имеется 59 коммутационных аппаратов с номинальными токами отключения 2 кА, 5,8 кА, 9,7 кА 43,5 кА, 45 кА (3% парка), которые не соответствуют современным значениям номинальных токов производимых в настоящее время выключателей согласно ГОСТ Р 52565-2006.

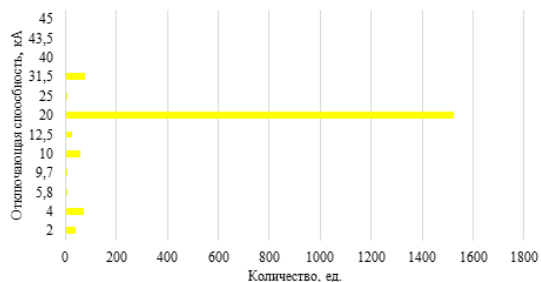


Рис. 6. Предельная отключающая способность выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

Fig. 6. The maximum deactivation of 10 kV switches of the branch of PJSC «Russian Grids Center»-«Orelenargo».

Произведем оценку остаточного ресурса маломасляного высоковольтного выключателя ВМП-10-20/630 с номинальным током 630 А и отключающей способностью 20 кА, установленного на отходящей линии 10 кВ (фидер №2) от подстанции 35/10 кВ

«Росстани», а также современного вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 с номинальным током 1000 А и отключающей способностью 20 кА по формулам (1-3) в соответствии с рассмотренной в работе [9] методикой.

Исходя из проведенных расчетов, можно произвести сравнение данных выключателей при коммутации диапазона токов разных значений, характерных для сети, питаемой от ПС «Бакланово». Зависимость допустимого числа отключений для выключателей ВВ/TEL-10-1000/20 и ВМП-10-20/630 с отключающими способностями 20 кА $I_{o\text{ ном}}$ при симметричных и несимметричных коротких замыканиях разных значений токов до номинального тока отключения представлена на рисунке 7.

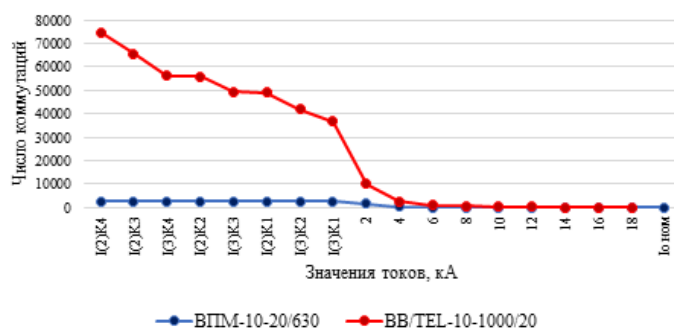


Рис. 7 Допустимое число коммутаций для выключателей ВВ/TEL-10-1000/20 и ВМП-10-20/630 с отключающей способностью 20 кА.

Fig. 7 Permissible number of switches for BB/TEL-10-1000/20 and WMP-10-20/630 circuit breakers with 20 kA deactivation ability.

Полученные зависимости, представленные на рисунке 7, позволяют сделать вывод, что при возникновении на рассматриваемой линии симметричных и несимметричных замыканий выключатель ВМП-10-20/630 сможет осуществить до 2500 коммутаций, а ВВ/TEL-10-1000/20 – от 36911 до 74856 коммутаций в зависимости от точки короткого замыкания и ее удаленности от секции шин 10 кВ, вблизи которых значения токов КЗ максимально. В свою очередь, при номинальном токе отключения 20 кА устаревший маломасляный выключатель ВМП-10-20/630 сможет осуществить 10 коммутаций, а современный вакуумный – 100 коммутаций. Данные соотношения позволяют выявить преимущества изготавливаемой в настоящее время современной вакуумной коммутационной техники.

Следует отметить, что в расчете допустимого числа коммутаций было учтено, что у выключателя ВМП-10-20/630 при коммутируемых токах до 60% $I_{o\text{ ном}}$ ресурс составляет 17 допустимых коммутаций предельной отключающей способности 20 кА, а свыше 60% $I_{o\text{ ном}}$ – 10 коммутаций.

Аналогично можно оценить расход коммутационного ресурса выключателей ВВ/TEL-10-1000/2 и ВВВ-10-400/4 при отключении токов от значений аварийных режимов, возникающих на ВЛ 10 кВ (фидер №2), отходящей от подстанции 35/10 кВ «Росстани», до предельных отключающих способностей выключателей.

Расход коммутационного ресурса (сработанный ресурс) рассматриваемых выключателей при коммутации значений токов от симметричных и несимметричных коротких замыканий в других точках ВЛ 10 кВ фидера №2 от подстанции 35/10 кВ «Росстани» и до значений предельных отключающих способностей выключателей 4 кА и 20 кА представлен на рисунке 8.

Так, при коммутации тока двухфазного короткого замыкания в точке К4 со значением 0,3 кА коммутационный ресурс выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 составляет более 440000 коммутаций. Данное расчетное значение с учетом механического ресурса выключателя ограничивается значением 150000 циклами отключения. При этом для аналогичной точки возникновения замыкания устаревший вакуумный выключатель типа ВВВ-10-400/4 с предельной отключающей способностью 4 кА способен произвести 5333 коммутации.

В свою очередь, для рассматриваемых точек короткого замыкания допустимое число коммутаций устаревшего вакуумного выключателя ВВВ-10-400/4 от 178 до 5333, а у современного вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 – от 14854 до 150000. При этом у устаревшего вакуумного выключателя ВВВ-10-400/4 при коммутации токов аварийных режимов в рассматриваемых точках будет расходоваться 0,006 относительных единиц (о.е.)

о.е. до 0,168 о.е. коммутационного ресурса, а у современного вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 - от 0,001 о.е. до 0,007 о.е. коммутационного ресурса.

При этом при коммутации предельной коммутационной способности у устаревшего вакуумного выключателя ВВВ-10-400/4 допускается 30 коммутаций при каждой из которых будет расходоваться 1 о.е. коммутационного ресурса, а современного вакуумного выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 с предельной коммутационной способностью 20 кА при коммутации тока 4 кА допускает производство 2500 отключений при каждом из которых будет расходоваться 0,04 о.е. коммутационного ресурса.

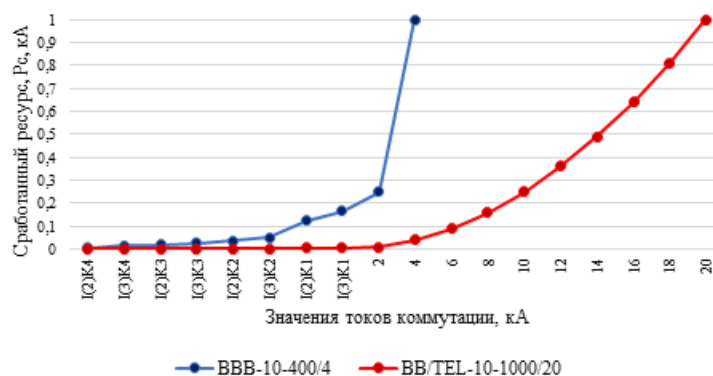


Рис. 8. Зависимость сработавшего ресурса от токов коммутации для выключателей ВВВ-10-400/4 и ВВ/TEL-10-1000/20 с отключающими способностями $I_{о\text{ ном}}$ 4 кА и 20 кА.

Fig. 8. Switching current dependency for ВВВ-10-400/4 and ВВ/TEL-10-1000/20 circuit breakers with $I_{о\text{ ном}}$ 4 kA and 20 kA.

Таким образом, для выключателя ВВ/TEL-10-1000/20 при его установке на ВЛ 10 кВ фидере №2 от подстанции ре №2 от подстанции 35/10 кВ «Росстани» можно выделить 3 диапазона расхода коммутационного ресурса: от нуля до точки $I_{(3)К1}$ со значением 1,641 кА где не происходит расходование коммутационного ресурса; зона неустойчивого горения дуги в диапазоне от точки $I_{(3)К1}$ со значением 1,641 кА до 2 кА с практически линейной зависимостью ресурса от тока; диапазон от 2 кА до отключающей способности выключателя 20 кА, характеризующийся выраженной нелинейной зависимостью в соответствии с предложенным методом.

Заклучение или Выводы (Conclusions)

1. В работе был произведен анализ парка высоковольтных выключателей 10 кВ, установленных в распределительных устройствах подстанций с высшим напряжением 35-110 кВ в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», в ходе которого было выявлено, что среди 1833 коммутационных аппаратов 1197 выключателей с масляными дугогасительными камерами, а 636 выключателей – с вакуумными, - что составляет, соответственно, 65% и 35% парка. При этом доля современных вакуумных выключателей составляет 27%. Чаще всего (1009 выключателей) имеют номинальный ток 630 А, а также (366 выключателей) – 1000 А. Порядка 83% парка высоковольтных выключателей имеют номинальный ток отключения 20 кА. Полученные технические характеристики позволяют сформировать концепции техперевооружения парка высоковольтных выключателей 10 кВ филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

2. В ходе сравнения расхода коммутационного ресурса и допустимого числа коммутаций устаревшего маломасляного выключателя ВМП-10-20/630 и устаревшего вакуумного выключателя ВВВ-10-400/4 с современным вакуумным выключателем ВВ/TEL-10-1000/20 было выявлено, что при коммутации токов коротких замыканий в рассматриваемых линиях современным выключатель ВВ/TEL-10-1000/20 по сравнению с устаревшим выключателем ВМП-10-20/630 может осуществить от 36911 до 74856 коммутаций при максимальном количестве 2500 у устаревшего выключателя. В свою очередь, современный вакуумный выключатель ВВ/TEL-10-1000/20 по сравнению с устаревшим вакуумным выключателем ВВВ-10-400/4 при коммутации токов аварийных режимов расходует от 0,001 о.е. до 0,007 о.е. коммутационного ресурса, при 0,006 о.е. до 0,168 о.е. у устаревшего выключателя. Полученные характеристики позволяют выявить значительное преимущества изготавливаемой в настоящее время вакуумной коммутационной техники.

3. Таким образом, инвестиционная программа филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» в части техперевооружения устаревших вакуумных выключателей 10 кВ

может быть направлена на приобретение современных вакуумных выключателей отечественного производства ВВ/TEL-10-630/20 и ВВ/TEL-10-1000/20 с номинальными токами 630 А и 1000 А и предельной отключающей способностью 20 кА, или их аналогов. Это позволит повысить надежность и эффективность функционирования электросетевого комплекса в Орловской области.

Литература

1. Seung-Bok Choi, Fauziah Shahul Hamid and Liyuan Han. Research on High Voltage Circuit Breaker Mechanical Faults Online Monitoring // Applied Mechanics and Materials. 2014. Volume 521, pp. 362-365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.521.362>.
2. Guishu Liang, Hejin Yuan, and Baoshu Li. A Fault Diagnosis Method of High Voltage Circuit Breaker Based on Moving Contact Motion Trajectory and ELM // Mathematical Problems in Engineering. 2016.
3. Yang Z.-Z., Xu J.-Y., Li B., Liu Y. Design of monitoring system for mechanical status of high voltage vacuum circuit breaker // High Voltage Apparatus. 2013. V. 49, no. 8, pp. 26–34.
4. Chen J., Hu Z., Su X. Key technology design to on-line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker // High Voltage Apparatus. 2014. V. 50, No. 4, pp. 108–112.
5. Tahir Midhat Lazimov, Samir Ali Huseyn Akhundov. Research on Influence of High-Voltage Circuit Breakers' Characteristics on Switching Overvoltages and Overcurrents. Conference: Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO-2003At: Bursa, Turkey. DOI:10.13140/RG.2.1.4216.7205.
6. Андреев Д.А., Назарычев И.А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. № 2. 2008. С. 69-84.
7. Балаков Ю.Н., Шунтов А.В. О фактическом коммутационном ресурсе выключателей // Энергобезопасность и энергосбережение. №6. 2009. С. 35-38.
8. Муссонов Г.П., Снопкова Н.Ю., Гаврилов А.В. Учет величины коммутируемого тока для определения остаточного коммутационного ресурса высоковольтных выключателей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. №12 (95). С. 205-210.
9. Виноградов А.В., Бородин М.В., Лансберг А.А., Псарев А.И., Сорокин Н.С. Анализ типов высоковольтных коммутационных аппаратов и оценка остаточного ресурса выключателей, установленных на подстанциях с высшим напряжением 35-110 кВ филиала ПАО «МРСК Центра»-«Орелэнерго» // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021. Т. 13. №1 (49). С. 118-127.
10. ВВ/TEL. Вакуумный выключатель. Руководство по эксплуатации. Доступно по: https://www.tavrida.com/upload/iblock/1db/ter_vcb15_booklet.pdf. Ссылка активна на 11.12.2021.
11. Виноградов А.В., Капитонов А.И., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Фомин И.Н. Определение токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционированной реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания // Вестник аграрной науки Дона. 2021. № 1 (53). С. 34-43.
12. ВВВ-10-2/320У2. Электрические сети. Доступно по: <https://leg.co.ua/info/vyklyuchateli/vvv-10-2/320u2.html>. Ссылка активна на: 12.12.2021.
13. Эксплуатация выключателей ВПМ-10. Электрические Сети. Служба подстанций. Доступно по: <https://www.ruscable.ru/doc/documentation/instruction-32.html>. Ссылка активна на: 05.12.2021.
14. Раздел I. Первичное оборудование, материалы и системы, допущенные к применению на объектах ПАО «Россети» на 04.09.2020. Доступно по: http://www.rosseti.ru/investment/science/attestation/doc/razdel_I_04.09.2020.pdf. Ссылка активна на: 29.09.2020.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

Лансберг Александр Александрович – инженер отдела энергосбережения и повышения энергоэффективности филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго».

References

1. Seung-Bok Choi, Fauziah Shahul Hamid and Liyuan Han. *Research on High Voltage Circuit Breaker Mechanical Faults Online Monitoring*. Applied Mechanics and Materials. 2014. Volume 521, pp. 362-365. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.521.362>.
2. Guishu Liang, Hejin Yuan, and Baoshu Li. *A Fault Diagnosis Method of High Voltage Circuit Breaker Based on Moving Contact Motion Trajectory and ELM*. Mathematical Problems in Engineering. 2016.
3. Yang Z.-Z., Xu J.-Y., Li B., Liu Y. *Design of monitoring system for mechanical status of high voltage vacuum circuit breaker*. High Voltage Apparatus. 2013. V. 49, no. 8, pp. 26–34.
4. Chen J., Hu Z., Su X. *Key technology design to on-line monitoring of mechanical characteristics for intelligent vacuum circuit breaker*. High Voltage Apparatus. 2014;50(4):108–112.
5. Tahir Midhat Lazimov, Samir Ali Huseyn Akhundov. *Research on Influence of High-Voltage Circuit Breakers' Characteristics on Switching Overvoltages and Overcurrents*. Conference: Third International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO-2003At: Bursa, Turkey. doi:10.13140/RG.2.1.4216.7205.
6. Andreev D.A., Nazarychev I.A. Analysis of methods for estimating the switching resource of high-voltage switches. *Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2008;2:69-84.
7. Balakov Yu.N., Shuntov A.V. On the actual switching resource of switches. *Energy security and energy conservation*. 2009;6:35-38.
8. Monsonov G.P., Snopkova N.Yu., Gavrilov A.V. Taking into account the magnitude of the switched current to determine the residual switching resource of high-voltage switches. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2014;12 (95):205-210.
9. Vinogradov A.V., Borodin M.V., Lansberg A.A., Psarev A.I., Sorokin N.S. Analysis of types of high-voltage switching devices and evaluation of the residual life of switches installed at substations with a higher voltage of 35-110 kV of the branch of PJSC IDGC of Centre-Orelenergo. *Bulletin of the Kazan State Energy University*. 2021;13:1 (49):118-127.
10. BB/TEL. Vacuum circuit breaker. Operation manual. Available at: https://www.tavrida.com/upload/iblock/1db/ter_vcb15_booklet.pdf. Accessed: 11.12.2021.
11. Vinogradov A.V., Kapitonov A.I., Lansberg A.A., Sorokin N.S., Fomin I.N. Determination of short-circuit currents in a rural 10 kV electrical network sectioned by reclosers for remote monitoring of their operation. *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2021;1 (53):34-43.
12. BBB-10-2/320 U2. Electrical networks. Available at: <https://leg.co.ua/info/vyklyuchateli/vvv-10-2/320u2.html>. Accessed: 12.12.2021.
13. Operation of VPM-10 switches. Electrical Networks. Substation service. Available at: <https://www.ruscable.ru/doc/documentation/instruction-32.html>. Accessed: 05.12.2021.
14. Section I. Primary equipment, materials and systems approved for use at the facilities of PJSC ROSSETI on 04.09.2020. Available at: http://www.rosseti.ru/investment/science/attestation/doc/razdel_I_04.09.2020.pdf. Accessed: 09.09.2020.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM.

Alexander A. Lansberg – the branch of PJSC Rosseti Center-Orelenergo.

Получено 30.08.2022г.

Отредактировано 14.09.2022г.

Принято 21.09.2022г.



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВА ИНДУКЦИОННОГО ЗАРЯДНОГО ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО СПОСОБА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Сафин ¹А.Р., Козырев ²А.Б., Петров ¹Т.И., Низамиев ¹М.Ф., Басенко ¹В.Р.,
Лямзина ¹Д.Ю.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Инзарус», г. Москва, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, sarkazan@bk.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Отсутствие зарядной инфраструктуры является одной из главных причин отказа от использования электромобилей в России. Решением может стать разработка мобильных установок заряда электротранспорта (МУЗЭ). Для реализации действительно конкурентоспособного продукта необходимо учесть все возможные типы зарядок электротранспорта, и не только стандартные, CHAdeMO, CCS и т.д., но и беспроводную зарядку на базе устройства индукционного зарядного (УИЗ). Поэтому цель данной работы – начальный этап разработки УИЗ, путем моделирования двух вариантов реализации блока согласования УИЗ, сравнение полученных результатов, и для выбранной схемы разработка устройства физического моделирования, разработка рабочей конструкторской документации (РКД) оснастки и инструмента для изготовления УИЗ. МАТЕРИАЛЫ. УИЗ основан на принципе магнитной индукции, поэтому моделирование производилось для двух вариантов реализации блока согласования бесконтактной зарядки, рассчитывались частота и значение индуктивностей связанных катушек, и на базе полученных результатов сделаны выводы о оптимальном расстоянии, при котором сохраняется необходимое значение КПД. Для физического моделирования процесса бесконтактной зарядки электротранспорта разработана модель калибратора, и рассчитаны и выбраны топологии и геометрия ферритовых пластин. РЕЗУЛЬТАТЫ. На основе моделирования выбрана схема реализации УИЗ с регулировкой емкости конденсатора и разработана конструкторская документация калибратора 6-осного для тестирования, на базе этих результатов разработана рабочая конструкторская документация оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ, где представлены топологии антенн и геометрия ферритовых пластин передатчика и приемника. НИОКР выполнены в ООО «Инзарус» и ФГБОУ ВО «КГЭУ». ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование УИЗ дает большие возможности для развития мобильных зарядных станций, так как увеличивает количество возможных подключений. Однако для данного оборудования критично важен КПД и расстояние, на котором возможна передача электроэнергии, без больших потерь, поэтому уже на этапе моделирования необходимо максимально точно выбрать параметры катушек, и используемую схему. Для разрабатываемой МУЗЭ определены оптимальные решения в области моделирования и тестирования УИЗ.

Ключевые слова: устройство индукционное зарядное; беспроводная передача; платформа, конденсатор; зарядка электротранспорта, передатчик, приемник.

Для цитирования: Публикация статьи осуществлена в рамках проекта «Организация высокотехнологичного производства мобильных установок заряда электротранспорта высокой мощностью с интегрированной системой накопления электроэнергии», Соглашение №075-11-2021-048 с Минобрнауки РФ от 25 июня 2021 г.

Для цитирования: Сафин А.Р., Козырев А.Б., Петров Т.И., Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Лямзина Д.Ю. Определение параметров катушек индуктивности устройства индукционного зарядного для бесконтактного способа зарядки электротранспорта // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С.74-83. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83.

DETERMINATION OF INDUCTOR PARAMETERS OF INDUCTION CHARGING DEVICE FOR CONTACTLESS METHOD OF CHARGING ELECTRIC TRANSPORT

AR. Safin¹, AB. Kozyrev², TI. Petrov¹, MF. Nizamiev¹, VR. Basenko¹, DYU. Lyamzina¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Limited Liability Company "Inzarus", Moscow, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>, sarkazan@bk.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The lack of charging infrastructure is one of the main reasons for the refusal to use electric vehicles in Russia. The solution could be the development of mobile electric vehicle charge units (MCSEU). To implement a truly competitive product, it is necessary to take into account all possible types of electric vehicle charging, and not only standard ones, CHAdeMO, CCS, etc., but also wireless charging based on an induction charger (IC). Therefore, the purpose of this work is to model the two main types of IC implementation, compare the results obtained, and develop a physical modeling model for the selected scheme.

MATERIALS. IC is based on the principle of magnetic induction, so the simulation was carried out for two options for implementing contactless charging, the frequency and value of the inductances of the coupled coils were calculated, and based on the results obtained, conclusions were drawn about the optimal distance at which the required efficiency value is maintained. For physical modeling of the process of non-contact charging of electric vehicles, a calibrator model has been developed, and ferrite plates have been calculated.

RESULTS. Based on the simulation, a scheme for the implementation of the IC with adjustable capacitor capacitance was chosen, the topologies of antennas and the geometry of ferrite plates and a design documentation of a 6-axis calibrator for testing were developed. R&D was carried out at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSPEU".

CONCLUSION. The use of IC provides great opportunities for the development of mobile charging stations, as it increases the number of possible connections. However, efficiency and charging distance are critical for this equipment, therefore, already at the modeling stage, it is necessary to select the parameters of the coils as accurately as possible, and the circuit used. For the developed MCSEU, within the framework of Resolution 218, optimal solutions were identified in the field of modeling and testing of IC.

Keywords: induction charger; wireless transmission; platform; capacitor; electric vehicle charging; transmitter, receiver.

The publication of the article was carried out within the framework of the project «Organization of high-tech production of mobile high-power electric transport charge units with an integrated energy storage system», Agreement No. 075-11-2021-048 with the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated June 25, 2021.

For citation: Safin AR, Kozyrev AB, Petrov TI, Nizamiev MF, Basenko VR, Lyamzina DYU. Determination of inductor parameters of induction charging device for contactless method of charging electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):74-83. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-74-83.

Введение

Перспективы применения резонансной беспроводной передачи электроэнергии существуют во многих сферах, в частности, данную технологию можно эффективно использовать для зарядки электротранспорта [1].

В литературе представлены различные методы беспроводной передачи энергии, такие как индуктивная передача энергии, беспроводная передача энергии с помощью магнитной передачи [2], емкостная беспроводная передача энергии [3] и беспроводная передача энергии с помощью индуктивной связи [4]. Последний метод является одним из наиболее широко используемых методов, который был признан подходящим для зарядки электромобиля. Математическое представление данного метода зарядки широко представлено в литературе.

Текущие разработки автомобильных компаний и исследовательских институтов показывают, что в течение следующих десяти-двадцати лет инфраструктура зарядки во

время вождения может быть развернута для широкого использования. Многие компании ищут способы не только расширить диапазон электромобилей за счет беспроводной зарядки, но и сделать процесс зарядки полностью автоматическим [5]. Но одной из больших проблем, с которыми сталкиваются производители электромобилей, является проблема динамической зарядки. Для беспроводной зарядки электромобилей можно выделить емкостную и резонансную индуктивную беспроводную передачу энергии. Некоторые исследования показывают, что эффективность и удельная мощность при индуктивной зарядке намного выше, чем при емкостной [6]. В то же время индуктивные параметры существенно зависят от типоразмера катушек связи [7]. Многие исследователи работают над тем, как можно передать максимальную мощность на приемную площадку и повысить общую эффективность электромобилей в динамических условиях. Но эффективность большинства работ для индуктивной зарядки ниже 90 процентов [8]. Другим фактором, влияющим на общую эффективность, является несоосность передающей и принимающей катушки при зарядке электромобиля. Эффективность будет уменьшаться с увеличением рассогласования между катушкой передатчика и катушкой приемника, в работе [9] коэффициент связи уменьшается с 1,6 до 0,2 при 20%-ной несоосности между катушками по сравнению с состоянием без несоосности. Для выравнивания магнитного поля и уменьшения потока рассеяния можно использовать различные типы экранирующих материалов [10]. Таким образом, существует проблема в низком КПД беспроводной зарядки, и проблемы несоосности между приемником и передатчиком.

По результатам исследований в устройствах, с большим энергопотреблением, таких как зарядные устройства для гибридных автомобилей, КПД достигает 90% [11]. Таким образом, каждая стадия преобразования энергии при беспроводной зарядке (DC/AC/DC преобразование) требует от себя КПД в 97 - 98%. Для достижения таких значений КПД необходимо тщательное предварительное проектирование данных устройств [12].

Рассмотрим основные преимущества системы беспроводной системы на базе индуктивно-резонансного метода:

1. Удобство и простота системы в эксплуатации вследствие того, что существует большое количество вариантов расположения источника относительно приемника.
2. Универсальность источника – данное преимущество выражается в возможности заряда нескольких приемников, даже с учетом разных требований к электропитанию.
3. Расстояние для эффективной передачи энергии может быть увеличено за счет использования резонансных ретрансляторов.

Высокая степень управления уровнем мощности и расстояний между устройствами на основе высоко резонансной беспроводной передачи энергии позволяет разнообразить конфигурацию устройств [13].

Область применения этих устройств находится в очень больших границах, от очень низких уровней мощности для беспроводных датчиков и электронных устройств, потребляющих менее одного Вт и до мощных устройств для промышленных систем и электрических транспортных средств, требующих более чем 3 кВт [14,15].

Научная значимость заключается в усовершенствовании конструкции устройств беспроводной передачи данных, основанное на моделировании двух вариантов реализации блока согласования УИЗ. Практическая значимость – получение новых типов устройств беспроводной передачи данных, предназначенных для заряда электротранспорта, и разработка конструкторской документации для создания 6-осного калибратора.

Материалы и методы моделирования беспроводной системы передачи электроэнергии

На рисунке 1 изображен внешний вид (общий и без верхней крышки) разработанной платформы индукционного устройства индукционного зарядного.

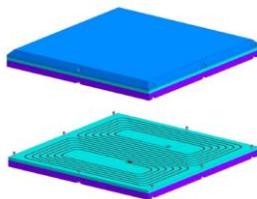


Рис.1 Модель платформы индукционной (сверху – внешний вид, снизу – вид без верхней крышки)

Fig. 1. Induction platform model (top view, bottom view without top cover)

За основу устройства индукционного зарядного взята схемотехника, аналогичная промышленным индукционным нагревателям. Для выполнения требований по уровню

зарядной мощности была выбрана установка ВЧ-20А, позволяющая обеспечить частоту 85 кГц. За основу линейного преобразователя напряжения взят *Siemens Sinamics DCP 4Q*.

Основными параметрами систем беспроводной передачи энергии являются частота и значение индуктивностей связанных катушек. В данном разделе представлены результаты математического моделирования эквивалентной схемы УИЗ (рис.2.), включающие в себя моделирование влияния параметров блока генераторного (влияние потерь на генерацию) и блока согласования (параметров конденсатора с переменной ёмкостью) на параметры УИЗ (Отчет ООО «Инзарус» - Схема деления МУЗЭ (в части УИЗ)).

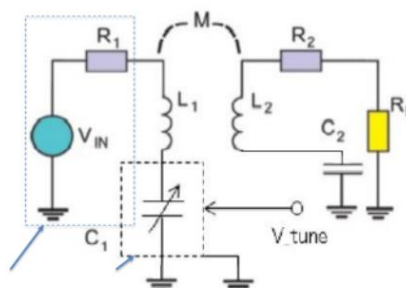


Рис. 2. Эквивалентная схема УИЗ: 1 – Блок генераторный, 2 – Блок согласования

Fig. 2. Equivalent circuit UIC: 1 - Generator unit, 2 - Matching unit

Математическое моделирование №1.

По стандарту беспроводной передачи энергии A4WP была выбрана резонансная частота $\omega=6.78$ МГц, индуктивность передающей катушки $L_1=362,6$ мкГн и ёмкость конденсатора с переменной ёмкостью (блока согласования) $C_1=60$ пФ. Блок согласования предназначен для сохранения КПД системы, при изменении расстояния между передающим и принимающим устройствами.

Для принимающего резонатора было решено использовать катушку индуктивностью $L_2=30,4$ мкГн и конденсатор ёмкостью $C_2=0,7$ нФ. В соответствии со всеми заявленными параметрами катушки индуктивности имеют следующие характеристики, представленные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики источника

Внутренний диаметр, мм	50
Внешний диаметр Di, мм	122,8
Диаметр проводника d, мм	1
Расстояние между витками s, мм	0,5
Число витков катушки N	60

Таблица 2

Характеристики приемника

Внутренний диаметр, мм	5
Внешний диаметр Di, мм	0,6
Диаметр проводника d, мм	0,1
Расстояние между витками s, мм	45
Число витков катушки N	70

Представленные параметры катушек индуктивности определяются по формуле 1:

$$L = \frac{r^2 + N^2}{8r + 11w} \quad (1)$$

где

L - Индуктивность в мкГн,

r - радиус до центра катушки,

w - ширина катушки,

N - число витков.

Введем понятие $k = d + s$ – шаг катушки.

Тогда $r = \frac{D_i + kN}{2}$ и $w = kN$, в итоге, задавшись требуемой индуктивностью,

диаметром провода, шагом намотки и внутренним диаметром катушки мы можем найти число витков и внешний диаметр катушки.

Используя стандартные формулы для расчета катушек индуктивности, получаем, что добротности катушек соответственно равны $Q_1=245,8$ и $Q_2=92,8$. Учитывая, что k - коэффициент связи между катушками, взаимная индуктивность будет определяться по формуле 2. Результат представлен на рисунке 3.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (2)$$

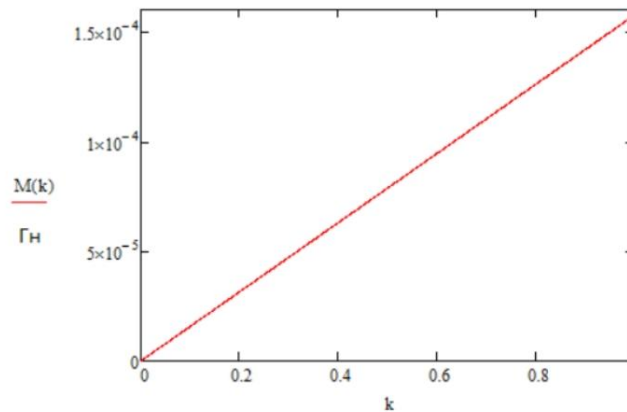


Рис. 3. График зависимости взаимной индукции M от коэффициента связи между катушками k Fig. 3. Mutual inductance M vs. coupling coefficient between coils k

Сопротивления потерь в системе равны $R_1=1,5$ Ом (потери в блоке генераторном) и $R_2=1$ Ом. Исходя из значения индуктивной связи $M=3$ мкГн, используя формулу 3, получаем сопротивление нагрузки устройства $R_L=16,6$ Ом.

$$R_L = R_2 \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_1 R_2}} \quad (3)$$

Эффективная добротность всей системы Q_m определяется по формуле 4 и равняется $Q_m=151$ при $k=1$.

$$Q_m = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (4)$$

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что данная система имеет максимальную добротность $Q_m=151$. При максимальной добротности КПД системы составляет 98,6 %.

При увеличении расстояния между устройствами можно сохранить КПД системы регулируя параметры блока согласования, можно определить, что сохранение КПД системы возможно при изменении расстояния не более чем на 1 мм. Следовательно, данное решение не имеет практического применения из-за слишком малого расстояния. Соответственно сравнивая случаи, когда в блоке согласования используется линейный конденсатор и нелинейный, можно сказать, что такой конденсатор не повышает КПД.

Математическое моделирование №2.

Проведём математическое моделирование для высоко резонансных систем с теми же катушками и конденсаторами и посмотрим, как в них может влиять блок согласования с переменной емкостью на КПД системы.

Опираясь на результаты ранее проведённого моделирования, можем выделить некие особенности высоко резонансной системы по сравнению с нерезонансной.

Коэффициент связи между катушками находится по формуле 5:

$$k = \frac{\omega M}{2\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5)$$

Следует заметить, что расстояние между передатчиком и приёмником в разы больше, и составляет 200 мм (рис. 4).

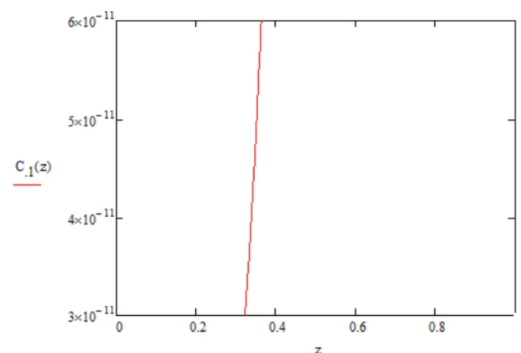


Рис. 4. График зависимости коэффициента связи от расстояния

Fig. 4. Plot of relationship coefficient versus distance

Если включить регулировку и поменять ёмкость блока согласования с 30 пФ до 19,5 пФ, то на некотором расстоянии можно будет сохранить КПД, влияние регулировки продемонстрировано на рисунке 5.

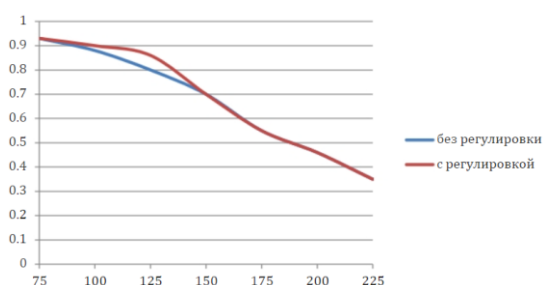


Рис. 5 График зависимости КПД от расстояния при изменении ёмкости C1

Fig. 5. Plot of dependence of efficiency on distance when capacitance C1 changes

Из рисунка 4 видно, что КПД такой системы можно удерживать на высоком уровне на расстоянии до 12 сантиметров.

Отдельно стоит упомянуть, что в такой системе существуют свои недостатки. Например, при использовании регулировки нелинейного конденсатора увеличиваются потери в системе, которые напрямую влияют на КПД всего устройства. Потери возникают из-за увеличения сопротивления конденсатора, т. е. из-за увеличения ESR (эквивалентного последовательного сопротивления) управляемого конденсатора.

При проектировании систем беспроводной передачи электроэнергии главным образом стоит обратить внимание на характеристики и параметры элементов, входящих в эту систему. Потери в каждом из элементов определяют КПД всей системы.

Разработка оборудования, предназначенного для проверки характеристик УИЗ

Для проверки характеристик устройства индукционного зарядного ФГБОУ ВО «КГЭУ» разработана конструкторская документация на «Калибратор 6-осный» ЛРЕН. 296375.001 СБ (рис. 6), который предназначен для физического моделирования процесса беспроводной передачи энергии между платформой индукционной и принимающим устройством, расположенным на электромобиле.

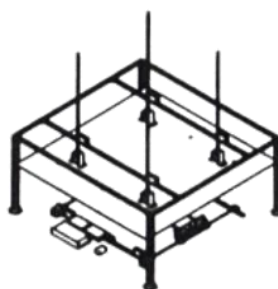


Рис. 6 Сборочный чертеж Калибратора 6-осного

Fig. 6. Assembly drawing of the Calibrator 6-axis

Комплект приемников (принимающих устройств) являются устройствами для моделирования эквивалентной нагрузки электромобиля и соответственно планируются к вхождению в состав технологической оснастки.

Передачик предназначен для передачи энергии переменного электромагнитного поля при бесконтактном способе зарядки на приемник. Формованная топология передатчика (ЛРЕН. 411519.001) включается в состав платформы индукционной. Является разъемным устройством.

Несколько приемников требуются для тестирования различных конструктивных вариантов беспроводной передачи энергии заряжаемого электромобиля. Различные марки электромобилей с функцией беспроводной зарядки имеют разные конфигурации приемных антенн, дорожные просветы и соответственно расстояние от передающей до приемной антенны. Расположение обмоток, площадей передатчика и приемника напрямую определяют эффективность беспроводной передачи энергии.

Исходя из теории распространения радиоволн и антенн – эффективная площадь, коэффициент использования, ширина апертуры антенн, расстояние между передатчиком и приемником, геометрия антенн являются основополагающими физическими параметрами, определяющими энергетическую эффективность передачи.

Планируется, что индукционная платформа будет выносным коммутируемым для беспроводной зарядки электромобиля. Данное устройство должно располагаться на асфальтовом, бетонном или грунтовом покрытии на достаточном удалении от контейнера. Процесс заряда должен происходить следующим образом: автомобиль должен заехать визуально таким образом, чтобы индукционная платформа оказалась примерно на уровне встроенного приемного устройства под капотом. Руководство по выставлению автомобиля устанавливается каждым автопроизводителем.

Индукционная платформа должна содержать систему связи на основе Bluetooth, которую она использует для связи с зарядным устройством на автомобиле, чтобы определить максимальную скорость заряда, состояние заряда и другую информацию.

Несколько датчиков в принимающем устройстве должны использовать сигнал от индукционной платформы, работающей на холостом ходу, для триангуляции площадки и отображения информации о целеуказании водителю на дисплее в автомобиле.

На основе результатов, полученными ООО «Инзарус» (Технический отчет - Исходные данные к рабочей конструкторской документации (РКД) оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ (1 очередь)), ФГБОУ ВО «КГЭУ» была разработана рабочая конструкторская документация (РКД) оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ. В данном документе была разработана документация для создания калибратора (для примера на рисунке 7 представлен сборочный вид передатчика).

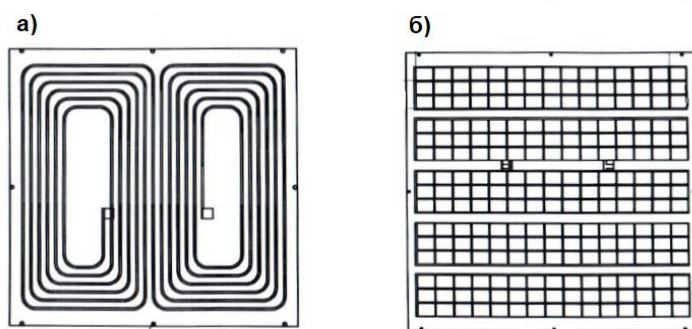


Рис.7. Сборочный вид передатчика оснастки и инструмента: а) вид сверху; б) вид снизу

Fig. 7. Assembly view of the repetition: a) top view; b) type of base

Разные классы транспорта различаются, в том числе дорожным просветом (клиренсом). Поэтому были разработаны 3 вида приемников на 3 вида клиренса. Различие приемников заключается в количестве и радиусе витков, а также количеством и толщиной используемых ферритовых пластин. На рисунке 8 представлена топология и геометрия разработанных антенн, используемых в приемниках и передатчике.

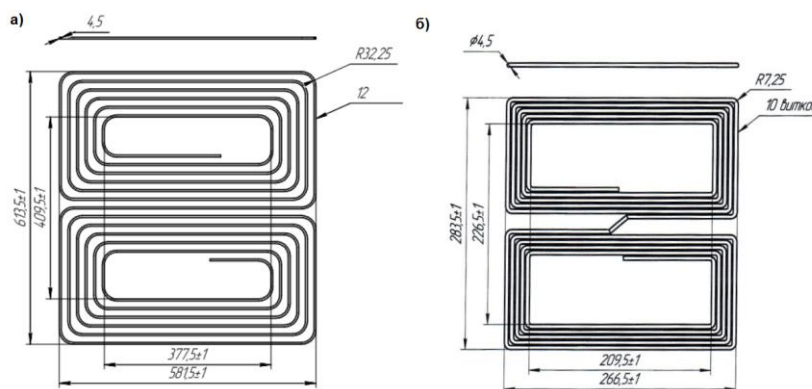


Рис. 8. Топология и геометрия антенн:
а) передатчика; б) приемник

Fig. 8. Topology and geometry of antennas: a) transmitter; b) receiver

Результаты

Таким образом, на основе результатов анализа существующих литературных данных и моделирования различных типов резонансных систем выбрана схема с регулировкой емкости в блоке согласования (Отчет ООО «Инзарус» - Схема деления МУЗЭ (в части УИЗ)).

Разработана конструкторская документация калибратора 6-осного для проверки характеристик устройства индукционного зарядного (ЛРЕН. 296375.001).

Разработаны топологии антенн и геометрия ферритовых пластин, используемых в комплекте оснастки и инструмента для изготовления МУЗЭ (ЛРЕН. 296375.002, ЛРЕН. 296375.003)

Полученные результаты использованы при разработке РКД на комплект приемников, предназначенных для приема электромагнитного излучения, а также РКД на передатчик, предназначенного для передачи электромагнитного излучения на приемник.

Заключение

Из литературного обзора [1-6] сделан вывод, что наиболее перспективным вариантом реализации беспроводной зарядки электротранспорта является резонансная индуктивная зарядка. Однако главным недостатком является снижение КПД в зависимости от расстояния, таким образом, необходимо правильно рассчитать параметры катушек УИЗ [7], что и было проведено в данной статье.

Расчеты, приведенные в главе «Методы и материалы моделирования беспроводной системы передачи электроэнергии», подтверждают, что возможно получение КПД выше 90% для индуктивной беспроводной зарядки, по сравнению с работами [9,11], и доказывают результаты, полученные в работе [12].

В работе сравниваются самые известные технологии беспроводной зарядки и моделируется резонансная индуктивная зарядка. Ключевые компоненты УИЗ были изучены с точки зрения компенсационной топологии и конструкции катушки. Разработаны и определены две модели, без регулирования и с регулированием емкости конденсатора. В результате две используемые модели были рассмотрены для получения значений взаимной индуктивности, результаты были сопоставлены и сделаны выводы, что при регулировании емкости, необходимое КПД сохраняется на большем расстоянии, что позволит получить устройства, описываемые в работах [13-15].

Метод используется для резонанса частоты катушки передатчика и частоты катушки приемника. Показан расчет мощности нагрузки и КПД для воздушного зазора до 200 мм. В статье определяются основные принципы УИЗ, и данное исследование будет расширено для будущих работ в этой области.

Представленная работа включала моделирование нового типа устройства УИЗ для обеспечения высокоэффективной зарядки аккумулятора электромобиля. Извлеченные данные из экспериментов по моделированию демонстрируют общую хорошую производительность предложенного алгоритма. В статье также рассмотрены конструктивные особенности антенн передатчика и приемников УИЗ, разработана конструкторская документация калибратора 6-осного.

В качестве последующего исследования будут рассмотрены вопросы, связанные с эффективностью используемых преобразователей, при этом будут рассмотрены трудности управления системой.

Литература

1. 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.
2. Y. Shin, J. Park, H. Kim, S. Woo, B. Park, S. Huh, et al. Design Considerations for Adding Series Inductors to Reduce Electromagnetic Field Interference in an Over-Coupled WPT System. *Energies*. 14 (2021), p. 2791.
3. J. Dai, D.C. Ludois. «Capacitive Power Transfer Through a Conformal Bumper for Electric Vehicle Charging». *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, 4 (2016), pp. 1015-1025.
4. F. Musavi, W. Eberle. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electron*, 7 (2014), pp. 60-66.
5. Y. Yang, M. El Baghdadi, U. Lan, Y. Benomar, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles, *Energies*. 2018. V. 11. no. 7. p. 1716.
6. Z. Younes, I. Alhamrouni, S. Mekhilef, M. Reyesudin, A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Eng J*, 12 (2021), pp. 1985-1994.
7. A.M. Hussien, H.M. Hasanien, S.F. Mekhamer, Sunflower optimization algorithm-based optimal PI control for enhancing the performance of an autonomous operation of a microgrid, *Ain Shams Eng J*. 12 (2021), pp. 1883-1893.
8. R. Godoy, E. Maddalena, G. Lima, L. Ferrari, V. Pinto, and J. Pinto. Wireless charging system with a non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications, *Eletrônica de Potência*. 2016. V. 21, no. 1. pp. 42–51.
9. D. Baros, N. Rigogiannis, P. Drougas, D. Voglitsis, and N. P. Papanikolaou, «Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT», *IEEE Access*. V. 8, pp. 227834–227846, 2020.
10. Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н. и др. Изучение конструктивных особенностей мобильных установок заряда электротранспорта для разработки эскизной конструкторской документации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 3(51). – С. 15-24.
11. D. Niculae, M. Iordache, M. Stanculescu, M. L. Bobaru and S. Deleanu, "A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic," 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2019, pp. 1-4
12. Mehrjerdi H., Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. - 2020. - № 37. - P. 157-177.
13. Добровольская Л.А. Передача энергии в системе из двух контуров для беспроводной зарядки технических устройств // *The Scientific Heritage*. 2020. №44-1 (44).
14. Z. Danping, L. Juan, C. Yuchun, L. Yuhang and C. Zhongjian, "Research on Electric Energy Metering and Charging System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle," 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), 2019, pp. 252-255.
15. R. Yuan, Z. Jiang, Z. Yi, S. Zhao, S. Wang and K. Song, «Research on electric energy metering key technology of electric vehicle wireless charging», *Electrical Measurement & Instrumentation*, Vol. 55, pp. 11-16, Aug. 2018.

Авторы публикации

Сафин Альфред Робертович – профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Козырев Андрей Борисович – сотрудник ООО «Инзарус».

Петров Тимур Игоревич – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Низамиев Марат Фирденатович – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Лямзина Дарья Юрьевна – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov AN, et.al. Development of technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Energy problems*. 2021;23(5);100-114.
2. Shin Y, Park J, Kim H, et al. Design Considerations for Adding Series Inductors to Reduce Electromagnetic Field Interference in an Over-Coupled WPT System. *Energies*. 2021;14;2791.
3. Dai J, Ludois DC. *Capacitive Power Transfer Through a Conformal Bumper for Electric Vehicle Charging*. IEEE J Emerg Sel Top Power Electron. 2016;4;1015-1025.
4. Musavi F, Eberle W. Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electron*. 2014;7;60-66.
5. Y. Yang, M. El Baghdadi, U. Lan, Y. Benomar, J. Van Mierlo, and O. Hegazy, «Design methodology, modeling, and comparative study of wireless power transfer systems for electric vehicles» *Energies*. 2018;11(7):1716.
6. Younes Z, Alhamrouni I, Mekhilef S, et.al. A memory-based gravitational search algorithm for solving economic dispatch problem in micro-grid. *Ain Shams Eng J*. 2021;12;1985-1994.
7. Hussien AM, Hasanien HM, Mekhamer SF. Sunflower optimization algorithm-based optimal PI control for enhancing the performance of an autonomous operation of a microgrid. *Ain Shams Eng J*. 2021;12;1883-1893.
8. Godoy R, Maddalena E, Lima G, et.al. ‘Wireless charging system with a non-conventional compensation topology for electric vehicles and other applications. *Eletrônica de Potência*. 2016;21;1;42-51.
9. Baros D, Rigogiannis N, Drougas P, et.al. *Transmitter side control of a wireless EV charger employing IoT*. IEEE Access. 2020;8;227834–227846.
10. Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov AN, et.al. The study of the design features of mobile electric transport charge installations for the development of draft design documentation. *Vestnik KSPEU*. 2021;13;3(51);15-24.
11. Niculae D, Iordache M, Stanculescu M, et.al. *A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic*. 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). 2019;1-4.
12. Mehrjerdi H, Hemmati R. Stochastic model for electric vehicle charging station integrated with wind energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020;37;157-177.
13. Dobrovolskaya LA. Power transfer in a two-loop system for wireless charging of technical devices. *The Scientific Heritage*. 2020;44-1;44.
14. Danping Z, Juan L, Yuchun C, et.al. *Research on Electric Energy Metering and Charging System for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicle*. 2019 4th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE). 2019;252-255.
15. Yuan R, Jiang Z, Yi Z, et.al. Research on electric energy metering key technology of electric vehicle wireless charging. *Electrical Measurement & Instrumentation*. 2018;55;11-16.

Authors of the publication

Alfred R. Safin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey B.Kozyrev – LLC «Inzarus», Moscow, Russia.

Timur I. Petrov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Darya Yu. Lyamzina – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 13.08.2022г.

Отредактировано 09.09.2022г.

Принято 10.09.2022г.



ПРЕДИКТИВНАЯ ОЦЕНКА РИСКОВ ПРЕРЫВАНИЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НЕФТЕДОБЫЧИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ

Левин В.М., Гужов Н.П.

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать процедуру принятия решений о выводе в ремонт оборудования в системе электроснабжения объектов нефтедобычи по критерию минимального риска. Обосновать эффективность ее практического применения в задачах управления ремонтами оборудования со стратегией «по техническому состоянию» на основе риск-ориентированного подхода. *МЕТОДЫ.* При решении поставленных задач применялись: метод блок-схем для расчета показателей структурной надежности распределительной электрической сети при изменениях её оперативного состава и технического состояния элементов (оборудования), метод прогноза рисков нарушения электроснабжения в цепи каждого технологического потребителя с учетом возможности резервирования и наложения аварийного восстановления основного элемента на плановый ремонт резервного, сценарный подход для определения сценариев изменения риска отказов электроснабжения при изменениях эксплуатационного состояния схемы электрической сети. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В результате решения задач рассчитаны значения показателей структурной надежности исследуемой распределительной электрической сети при наиболее вероятных сценариях изменения ее оперативного состава и технического состояния оборудования, рассмотрены особенности интегральной оценки технического состояния объектов класса напряжения 6 кВ в условиях их эксплуатации. Получены функции прогноза вероятностей нарушения электроснабжения объектов нефтедобычи в зависимости от интегральной оценки их технического состояния, которые наряду с тяжестью последствий отказов позволяют прогнозировать риски. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Разработана вычислительная процедура, включающая математические модели и алгоритм приоритизации оборудования со стратегией «по техническому состоянию» при выводе его в ремонт на основе прогноза рисков нарушения электроснабжения потребителей. На конкретном примере произведена верификация расчетных моделей и алгоритма, показана эффективность разработанной вычислительной процедуры и ее применимость при решении практических задач управления ремонтами электрооборудования объектов нефтедобычи на основе риск-ориентированного подхода.

Ключевые слова: *распределительная сеть; управление ремонтами; оборудование; риск нарушений электроснабжения; вероятность отказа; индекс технического состояния; структурная надежность.*

Благодарности: *Статья подготовлена по результатам научно-исследовательской работы в рамках договора «Разработка стандарта и методических документов для оптимизации системы технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования ДО ПАО «Газпром нефть» по техническому состоянию и наработке».*

Для цитирования: Левин В.М., Гужов Н.П. Предиктивная оценка рисков прерывания электроснабжения потребителей нефтедобычи с учетом изменения значимых факторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 84-96. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-84-96.

PREDICTIVE RISKS ASSESSMENT OF POWER SUPPLY INTERRUPTION TO OIL PRODUCTION CONSUMERS, TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN SIGNIFICANT FACTORS

VM. Levin, NP. Guzhov

**Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia**
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0880-3989>, levin@power.nstu.ru

Summary: *THE GOAL.* To develop a decision-making procedure for the commissioning of equipment in the power supply system of oil production facilities in accordance with the minimum risk criterion. To substantiate the effectiveness of its practical application in the tasks of equipment repair management with the "technical condition" strategy based on a risk-oriented approach. *METHODS.* When solving the tasks, the following methods were used: the flowchart method for calculating the structural reliability indicators of the distribution electrical network with changes in its operational composition and technical condition of elements (equipment), the method for predicting the risks of power supply disruption in the circuit of each technological consumer, taking into account the possibility of reserving and imposing emergency recovery of the main element on the planned repair of the backup, scenario approach for determining scenarios for changing the risk of power supply failures when the operating state of the electrical network circuit changes. *RESULTS.* As a result of solving the problems, the values of the structural reliability indicators of the studied distribution electrical network are calculated under the most likely scenarios of changes in its operational composition and technical condition of equipment, the features of the integrated assessment of the technical condition of objects of voltage class 6 kV in their operating conditions are considered. The functions of forecasting the probabilities of power supply failures of oil production facilities are obtained depending on the integral assessment of their technical condition, which, along with the severity of the consequences of failures, make it possible to predict risks. *CONCLUSION.* A computational procedure has been developed that includes mathematical models and an algorithm for prioritizing equipment with a strategy "according to technical condition" when putting it into repair based on a forecast of the risks of power supply disruption to consumers. On a concrete example, the verification of calculation models and algorithm was carried out, the effectiveness of the developed computational procedure and its applicability in solving practical problems of managing repairs of electrical equipment of oil production facilities based on a risk-oriented approach was shown.

Keywords: *distribution network; repair management; equipment; risk of power supply failures; probability of failure; technical condition index, structural reliability.*

Acknowledgments: *The article was prepared based on the results of the research work under the contract "Development of standards and methodological documents to optimize the system of maintenance and repair of power equipment at PJSC Gazprom Neft's subsidiaries according to the technical condition and operating time".*

For citation: Levin VM., Guzhov NP. Predictive risks assessment of power supply interruption to oil production consumers, taking into account changes in significant factors. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):84-96. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-84-96.

Введение

Высокий уровень аварийности и увеличение времени восстановления прерываний электроснабжения потребителей в электрических сетях 6 (10) кВ общего и специального назначения в целом объясняется повышенным износом основных производственных фондов при ненадлежащем качестве технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) в период нескольких последних десятилетий [1]. В этой связи наряду с осуществлением традиционных плановых эксплуатационных воздействий на объекты распределительных сетей данного класса напряжения актуально принятие дополнительных действенных мер по снижению аварийности и повышению надежности электроснабжения потребителей. Одной из таких мер служит организация массового перевода электрооборудования (ЭО) сетей 6 (10) кВ со стратегии регламентированного планово-предупредительного ремонта (ППР) на стратегию «по техническому состоянию». Современная нормативная база^{1,2} концептуально

¹ Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики. Приказ Минэнерго РФ от 25.10.2018 года №1013. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/542610975>. Ссылка активна на 15 августа 2022.

меняет подходы к выбору организации ремонтов ЭО распределительных сетей с учетом профиля рисков. Это придает актуальность совершенствованию методологической поддержки риск-ориентированного подхода (РОП) в рамках ТОиР ЭО «по техническому состоянию» [2-5].

Особую группу объектов представляют электрические сети систем электроснабжения напряжением 6 (10) кВ, питающие потребителей нефтепромыслов. На сегодняшний день многие методологические аспекты РОП применительно к такого рода объектам либо находятся в зачаточном состоянии, либо вовсе отсутствуют.

Методология РОП в управлении ремонтами ЭО 6 (10) кВ нефтегазодобычи включает следующие компоненты [6-8]:

1) расчет и прогнозирование показателей надежности электроснабжения технологических потребителей при отказах ЭО с учетом степени резервирования и оперативного состава сети;

2) оперативную оценку тяжести последствий нарушений электроснабжения потребителей нефтепромысловых объектов, включающей ущерб от потерь добычи нефти;

3) интегральную оценку фактического технического состояния каждой единицы ЭО с закрепленной стратегией «по техническому состоянию» на основе результатов неразрушающего контроля и технического диагностирования;

4) разработку критериев и правил корректировки периодичности ТОиР ЭО со стратегией «по техническому состоянию» по результатам интегральной оценки его фактического технического состояния;

5) разработку критериев и правил корректировки трудоемкости ремонтных воздействий, прикладываемых к ЭО со стратегией «по техническому состоянию», на основе технологических карт и дефектных ведомостей;

6) формирование планов-графиков ППР ЭО на предстоящий период и их корректировка в соответствии с разработанными правилами;

7) анализ профиля рисков, ранжирование объектов ремонта по критерию минимального риска, разработку сценариев реализации РОП с выбором наиболее эффективного из них.

В статье детально рассмотрен и обсужден один из ключевых компонентов методологии РОП, а именно предиктивный анализ профиля рисков и ранжирование объектов ремонта в системах электроснабжения (СЭС) нефтепромыслов на основе прогноза вероятности нарушений электроснабжения потребителей при различном оперативном составе, степени резервирования схемы и техническом состоянии ЭО.

Материалы и методы исследования

Предиктивная оценка вероятности нарушений электроснабжения технологических потребителей нефтепромыслов при учете ряда влияющих факторов требует решения следующих задач: 1) выделение факторов, значимых для системы с точки зрения эксплуатационной надежности её элементов (оборудования); 2) разработка сценариев вариации единичных факторов при их взаимном сочетании; 3) выполнение расчетов структурной надежности СЭС. Среди факторов, оказывающих влияние на структурную надежность СЭС, наибольшую значимость имеют степень резервирования элементов схемы, её оперативный состав, а также техническое состояние оборудования.

При назначении сценариев изменений структурной схемы СЭС целесообразно рассматривать наиболее вероятные ситуативные состояния, в которых она может пребывать в процессе эксплуатации. К ним относится, например, аварийное отключение основной цепи питания потребителя при отказе одного из последовательно соединенных элементов (в этом случае электроснабжение осуществляется только по резервной цепи), одновременное функционирование основной и резервной цепей (полное резервирование); наложение аварийного восстановления основной цепи на плановый ремонт резервной, др.

Для расчетов структурной надежности СЭС наиболее адекватен метод блок-схем, который использует преобразование исходной схемы электроснабжения в эквивалентную с применением последовательно-параллельных соединений элементов [9-11]. Показатели безотказности и восстанавливаемости рассчитываются для каждого технологического потребителя, как при отсутствии, так и при наличии резервирования в цепи его питания. При наличии структурного резервирования в цепи питания потребителя целесообразно рассмотреть наложение аварийного восстановления основного элемента на плановый ремонт резервного. Общая схема решения выглядит следующим образом. Рассмотрим её на

² Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Приказ Минэнерго России от 26.07.2017 №676. Доступно по: www.ti-ees.ru/fileadmin/f/activity/laws/pr676_260717.pdf. Ссылка активна на 15 августа 2022.

обобщенном примере (рис. 1).

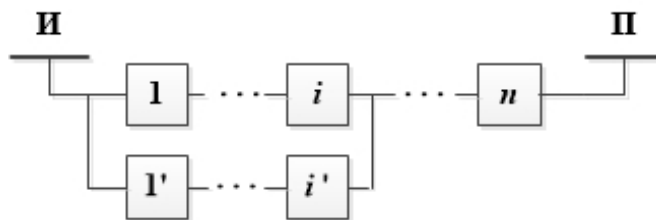


Рис. 1 – Структурная схема СЭС

Fig. 1 – Block diagram of the PSS

На рисунке 1 представлена структурная схема электроснабжения потребителя (П) от источника (И), в которой элементы преимущественно соединены друг с другом последовательно, однако часть из них имеет резервирование по параллельной цепи.

Определение вероятности нарушений электроснабжения потребителя в схеме СЭС (рис. 1) включает:

- расчет результирующих значений параметра потока отказов и времени восстановления для основной (резервной) цепи питания П при последовательном соединении элементов:

$$\omega_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad T_{\text{Врез}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot T_{\text{В}i} / \omega_{\text{рез}}, \quad (1)$$

где ω_i (год⁻¹) и $T_{\text{В}i}$ (час) – осредненные значения параметра потока отказа и времени восстановления i -й единицы ЭО определенного типа;

- расчет результирующих показателей надежности электроснабжения при параллельном соединении i -го и j -го элементов в цепи питания П:

$$\omega_{\text{рез}} = \omega_i \cdot \omega_j \cdot (T_{\text{В}i} + T_{\text{В}j}), \quad T_{\text{Врез}} = T_{\text{В}i} \cdot T_{\text{В}j} / (T_{\text{В}i} + T_{\text{В}j}); \quad (2)$$

- расчет результирующей вероятности нарушения электроснабжения П в схеме СЭС при ее актуальном состоянии по выражениям (1) или (2) (без учета или с учетом резервирования):

$$Q_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^n Q_i = \omega_{\text{рез}} \cdot T_{\text{Врез}} / 8760; \quad (3)$$

- расчет результирующей вероятности нарушения электроснабжения П в схеме СЭС при наложении аварийного восстановления основной i -ой цепи на плановый ремонт j -й, резервной:

$$Q_{\text{рез}} = Q_i \cdot Q_j = \frac{\omega_{\text{рез}i} \cdot T_{\text{Врез}i}}{8760} \cdot \frac{\mu_j \cdot T_{\text{П}j}}{8760}, \quad (4)$$

где: μ_j и $T_{\text{П}j}$ – частота и продолжительность плановых простоев ЭО j -й резервной цепи.

Отличие фактического технического состояния ЭО от идеального, которое могут вызывать различного рода неисправности, должно проявляться в изменениях показателей его безотказности и восстанавливаемости. Подобное влияние отражается увеличением последних, а вместе с ними и вероятности отказов ЭО при ухудшении фактического технического состояния. Интегральную оценку фактического состояния ЭО принято² осуществлять по значению индекса технического состояния (ИТС), который изменяется в диапазоне от 100% (идеальное состояние) до нуля (аварийное состояние). Пересчет ИТС производится с периодичностью, установленной внутренними регламентами ТООР энергопредприятия, но не реже одного раза в год. При этом пересчету подлежат ИТС только тех единиц оборудования (ЕО), для которых получен актуальный набор оперативных данных, прежде всего, результатов применения методов неразрушающего контроля и технического диагностирования. Для остальных ЕО ИТС принимается равным значению, рассчитанному на предыдущем этапе принятия решений. Следует отметить, что базовая методика оценки ИТС не предназначена для ЭО 6 (10) кВ. Учет специфики объектов ремонта (ОР) указанного назначения и класса напряжения при определении интегральной оценки их технического состояния вызвал к жизни ряд публикаций [12, 13]. Результаты разработок подтвердили свою адекватность и опробованы реальной практикой применения в системе управления ТООР ЭО нефтепромыслов. Разработанные принципы закрепляют объектно-ориентированный подход для определения показателя интегральной

оценки состояния. Это означает, что в качестве единицы рассматриваются ОР – воздушные или кабельные линии (ВЛ, КЛ), трансформаторные подстанции (ТП, КТП), а не их отдельные конструктивные элементы. Как отмечалось в [14] информационной основой расчета ИТС ОР служат листы осмотра с указанными в них обнаруженными отклонениями от нормы (дефектами). Как и в базовой методике, расчеты ИТС ОР производятся с применением соответствующих весовых коэффициентов, которые определяются по методу анализа иерархий на основе матрицы парных сравнений. В таблицах 1 и 2, в качестве примера реализации разработанной методики приведены фрагменты расчетов фактических значений ИТС для ОР типа КТП 6(10)/0,4 кВ и ВЛ 6 кВ по реальным данным о количестве и критичности обнаруженных в них дефектов.

Для включения в математическую модель расчета показателей эксплуатационной надежности (3), (4) фактического значения ИТС k -го ОР СЭС, отличного от 100%, потребуется дополнить вышеприведенную схему вычислений следующими пунктами:

- расчет вероятности безотказной работы k -го ОР с ИТС < 100%:

$$P'_k = \exp(-\omega_k \cdot \Delta t) \cdot J_{OPk}, \quad (5)$$

где $J_{OPk} = \text{ИТС} / 100\%$ – значение индекса технического состояния в относительных единицах;

- расчет осредненного значения параметра потока отказа k -го ОР с ИТС < 100%:

$$\omega'_k = \frac{1}{\Delta t} \ln(P'_k); \quad (6)$$

- расчет результирующего параметра потока отказа в цепи j -го потребителя с k -м ОР, для которого фактическое значение ИТС < 100%:

$$\omega'_{резj} = \omega'_{1j} + \dots + \omega'_{kj} + \dots + \omega'_{nj}; \quad (7)$$

- расчет результирующей вероятности нарушения электроснабжения j -го потребителя при отказе k -го ОР с ИТС < 100%:

$$Q'_{резj} = 1 - \exp(-\omega'_{резj} \cdot \Delta t) \quad (8)$$

Таблица 1

Фрагмент расчета ИТС объекта ремонта – КТП 6(10)/0,4 кВ по информации о выявленных дефектах

ФУ	Группа	Наименование дефекта	Кол-во дефектов	Критичность дефекта	Вес ФУ	ИТС ФУ	ИТС ОР, %
Площадка КТП	Строительная часть	Дефекты плит и блоков / свай	1	1	0,04	0,25	51
РУ ВН	РУ ВН	Отсутствие предупредительных плакатов в РУ 6-20 кВ	2	1	0,2	0,88	
Силовой трансформатор	Трансформатор	Наличие течи масла	1	1	0,36	0,44	
РУ НН	РУ НН	Наличие повреждения предохранителя (перегорание плавкой вставки, отсутствие патрона предохранителя в РУ 0,4 кВ)	3	1	0,2	0,83	
Заземляющее устройство	Заземление	Состояние контура заземления: обрыв	1	1	0,2	0	

Таблица 2

Фрагмент расчета ИТС объекта ремонта – ВЛ 6 кВ Л 1.2 по информации о выявленных дефектах

ФУ	Группа	Наименование дефекта	Кол-во дефектов	Критичность дефекта	Вес ФУ	ИТС ФУ	ИТС ОР, %
Опора	Изоляция	Наличие отклонения поддерживающей подвески	4	0	0,75	0,91	71,4
		Наличие коррозии арматуры и шапок изоляторов, эрозии/микротрещин защитной оболочки	1	0			
Пролет	Фазные провода	Наличие коррозии провода	2	0	0,25	0,125	
		Наличие вытяжки провода из соединительного/натяжного зажима. Дефект соединения провода	1	1			

В формулах (5) и (8) интервал времени Δt задает горизонт планирования корректирующих воздействий при управлении ремонтами электрооборудования СЭС. Его значение целесообразно принять в пределах календарного года ($\Delta t = 1$ год), что согласуется с периодом актуализации фактических значений ИТС ОР.

Использование выражений (5) – (8) позволяет рассчитать и построить в формате номограмм зависимости вида $Q_{рез j}(J_{ор k})$, по которым возможна предиктивная оценка результирующей вероятности нарушений электроснабжения j -го потребителя при отклонении фактического значения ИТС k -го ОР от идеального. Анализ профилей рисков при принятии решений по управлению ТОиР ЭО нефтепромыслов предполагает оценку и ранжирование технологических потребителей по важности с точки зрения нарушений электроснабжения каждого из них при отказе какого-либо ОР в схеме СЭС. Степень важности j -го потребителя эквивалентна тяжести нежелательных последствий при реализации рискованного события, которая определяется математическим ожиданием ущерба $M[Y]_j$.

В [14] убедительно показано, что для формирования адекватного критерия принятия решений по ТОиР может быть использована одна из составляющих непроизводственного ущерба, связанная с недовыработкой продукции (потерями добычи нефти):

$$M[Y]_j = \bar{P}_{нагр j} \cdot \bar{D}_j \cdot \Delta t_{нд j} \cdot \xi_0. \quad (9)$$

Здесь: $\bar{P}_{нагр j}$, $\bar{D}_j$, $\Delta t_{нд j}$ – индивидуальные осредненные данные j -го потребителя: электрическая нагрузка (кВт); удельная производительность (тонна/кВтч); время перерыва электроснабжения (час); ξ_0 – удельная стоимость потерь нефти (рубль/тонна).

Таким образом, риск (R_j) прерывания электроснабжения любого j -го потребителя как инструмент принятия решений определяется степенью его важности и вероятностью возникновения ключевого рискованного события [15-17]. Уровень суммарного риска в СЭС служит критерием для ранжирования ОР с точки зрения их приоритетизации, а также допускает прогнозирование в зависимости от изменения значимых факторов. Матрица рисков [18] представляет собой таблицу в декартовой системе координат, в ячейках которой по горизонтали откладывается важность технологических потребителей, а по вертикали – вероятность рискованного события. На пересечении строк и столбцов матрицы проставляются значения прогнозируемых рисков в СЭС, рассчитываемые по выражению:

$$R_j = M[Y]_j \cdot Q_{рез j}. \quad (10)$$

Предиктивная оценка рисков нарушений электроснабжения потребителей и процедура принятия решений по управлению ремонтами ЭО в зависимости от состава схемы СЭС, степени ее резервирования и технического состояния ОР выполняется в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Выбираются наиболее вероятные сценарии ситуационного изменения схемы СЭС и варьируемые факторы (например, ИТС, $0 \leq J_{орk} \leq 1$ с шагом 0,1 для $k = \overline{1, n}$).

2. Назначаются наиболее ответственные ОР в схеме СЭС, для которых с определенной периодичностью могут быть актуализированы фактические значения ИТС.

3. Для каждого сценария эволюции схемы СЭС выполняются вычисления показателей надежности электроснабжения j -го технологического потребителя нефтедобычи ($j = \overline{1, m}$) по расчетным моделям (1) – (4) и (5) – (8) при вариации значений $J_{орk}$ для отдельного либо каждого ОР с закрепленной стратегией «по техническому состоянию».

4. По формуле (9) выполняется расчет тяжести последствий нарушений электроснабжения для каждого j -го технологического потребителя нефтедобычи ($j = \overline{1, m}$) с последующим ранжированием потребителей по важности.

5. Для назначенных сценариев строятся номограммы в координатах результирующей вероятности нарушений электроснабжения каждого j -го технологического потребителя нефтедобычи ($j = \overline{1, m}$) от индекса технического состояния наиболее ответственного ОР в цепи его питания.

6. Предиктивная оценка рисков нарушений электроснабжения потребителей в СЭС при реализации любого из сценариев выполняется согласно выражению (10) с использованием полученных в пунктах 4 и 5 алгоритма ущербов и номограмм $Q_{резj}(J_{орk})$.

7. Производится формирование матрицы рисков с приоритизацией ОР в СЭС по критерию минимального риска и проверкой выполнения установленных ограничений по уровню эксплуатационной надежности и располагаемым ресурсам энергокомпании.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим реализацию разработанных вычислительной процедуры и алгоритма на примере конкретной СЭС (рис. 2). Фрагмент реальной схемы СЭС нефтепромысла состоит из двух кустовых площадок с установленными двухтрансформаторными подстанциями: ТП1 (2х630 кВА) и ТП2 (2х1000 кВА). Подстанции запитаны от распределительного устройства 6,3 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) по двум воздушным линиям электропередачи на железобетонных опорах, выполненным по магистральной схеме проводом марки АС-95. Удаленность от ГПП до ТП1 – 4 км, от ТП1 до ТП2 – 3 км. Повышенная надежность электроснабжения потребителей, запитанных от ТП1, обеспечивается установкой реклоузеров на ВЛ Л2.1 и Л2.2 для автоматического отключения участков сети к ТП2 при возникновении на них повреждений.

Осредненные значения мощностей нагрузок технологических механизмов нефтепромысловых объектов по каждому из вводов 6 кВ ТП1 и ТП2, а также их удельные производительности приведены в таблице 3. Для расчета показателей надежности в таблице 4 представлены справочные данные³ по элементам расчетной схемы СЭС (рис. 2).

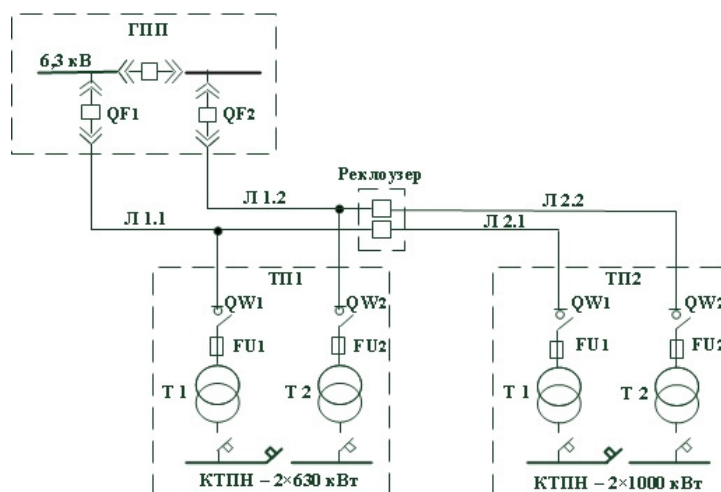


Рис. 2. Схема электроснабжения нефтяного месторождения Fig. 2. Power supply scheme of an oil field

³ РД 34.20.574 СО 153-34.20.574 Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками. – Москва : Союзтехэнерго, 1985. – 16 с.

Таблица 3

Среднегодовые значения мощностей нагрузок и удельных
производительностей технологических механизмов

Объекты СЭС нефтепромысла		$\bar{P}_{\text{нагр } j}$, кВт	$\bar{D}_j$, тонн/кВт·ч
ТП1	T1	340	2,8
	T2	360	3,0
ТП2	T1	560	3,9
	T2	550	3,5

В дальнейших рассуждениях в рамках примера, иллюстрирующего реализацию разработанной методики и алгоритма, будем рассматривать один из магистральных участков распределительной сети 6 кВ, например, Л1.1 в качестве основного, а второй (Л1.2) – в качестве резервного. Аналогично для подстанции ТП2, трансформатор Т1 – основной, Т2 – резервный.

В качестве наиболее вероятных сценариев оперативного состояния рассматриваемой схемы СЭС целесообразно принять следующие:

1. Магистральный участок распределительной электрической сети 6 кВ Л1.1 (основной) выведен из работы, нагрузки Т1 с ТП1 и ТП2 по шинам 0,4 кВ переведены на Т2 этих подстанций, ИТС k -го ОР изменяется в заданных пределах $0 \leq J_{\text{ОР}k} \leq 1$ с шагом $\Delta J_{\text{ОР}k} \leq 0,1$.

Таблица 4

Показатели надежности и плановых ремонтов элементов СЭС

Элемент	Параметр потока отказов ω , год ⁻¹	Время восстановления T_B , час	Частота плановых ремонтов μ , год ⁻¹	Время планового простоя T_P , час
ВЛ 6 кВ, одноцепная, на 1 км	0,25	6	0,2	5
Трансформатор 6 кВ	0,035	8	0,25	8
Ячейка выключателя 6 кВ, внутренней установки	0,015	6	0,25	7
Ячейка предохранителя 6 кВ	0,05	2,5	0,15	2,5
Ячейка выключателя нагрузки 6 кВ, внутренней установки	0,002	2,5	0,15	2,5

2. В работе обе ВЛ (полное резервирование), ИТС k -го ОР переменный $0 \leq J_{\text{ОР}k} \leq 1$.

3. В работе обе ВЛ, состояние аварийного восстановления основного элемента k -го ОР накладывается на плановый ремонт резервного при условии $(0 \leq J_{\text{ОР}k} \leq 1)$.

Во всех намеченных сценариях наиболее ответственными ОР являются магистральные участки распределительной сети Л1.1 и Л1.2, а также Т1 и Т2 наиболее загруженной подстанции ТП2, для которых ИТС может служить варьируемым фактором.

В таблице 5 представлены результаты расчета по формул (1) – (4) результирующих значений показателей надежности электроснабжения потребителей, получающих электроэнергию от подстанций ТП1 и ТП2 при реализации сценария 1 с идеальным техническим состоянием всех ОР ($J_{\text{ОР}k} = 1$).

Таблица 5

Результирующие значения показателей надежности электроснабжения потребителей

Потребители	Показатели надежности электроснабжения потребителей
ТП1	$\omega_{\text{рез1}} = 0,015 + 0,25 \cdot 4 + 0,002 + 0,05 + 0,035 = 1,102 \text{ год}^{-1};$ $T_{\text{Врез1}} = \frac{0,015 \cdot 6 + 0,25 \cdot 4 \cdot 6 + 0,002 \cdot 4 + 0,05 \cdot 3 + 0,035 \cdot 8}{1,102} = 5,92 \text{ час};$ $Q_{\text{рез1}} = 1,102 \cdot 5,92 / 8760 = 7,447 \cdot 10^{-4}.$
ТП2	$\omega_{\text{рез2}} = 0,015 \cdot 2 + 0,25 \cdot 7 + 0,002 + 0,05 + 0,035 = 1,867 \text{ год}^{-1};$ $T_{\text{Врез2}} = \frac{0,015 \cdot 2 \cdot 6 + 0,25 \cdot 7 \cdot 6 + 0,002 \cdot 4 + 0,05 \cdot 3 + 0,035 \cdot 8}{1,867} = 5,96 \text{ час};$ $Q_{\text{рез2}} = 1,867 \cdot 5,96 / 8760 = 12,702 \cdot 10^{-4}.$

Расчеты результирующих вероятностей нарушений электроснабжения потребителей ТП1 и ТП2 для каждого из намеченных сценариев оперативного состояния схемы СЭС выполнены по выражениям (5) – (8) и представлены на рисунке 3.

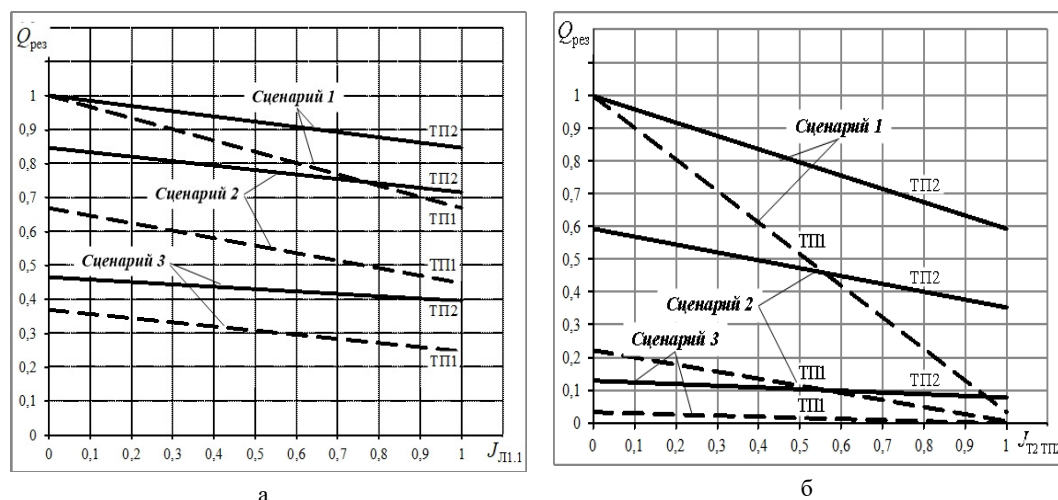


Рис. 3 – Номограммы $Q_{резj}(J_{OPk})$ для прогнозирования результирующей вероятности нарушений электроснабжения потребителей нефтедобычи:
а – объект ремонта ВЛ 6 кВ; б – объект ремонта КТПН 6/0,4 кВ

Fig. 3 – Nomograms $Q_{резj}(J_{OPk})$ to predict the resulting probability of power supply disruptions to oil production consumers:
а – 6 kV overhead line repair facility; б – 6/0.4 kV complete transformer substation repair facility

Полученные номограммы представляют собой зависимости типа $Q_{резj}(J_{OPk})$ и обеспечивают предиктивную оценку результирующей вероятности нарушений электроснабжения j -го потребителя нефтедобычи при изменении фактического значения ИТС каждого k -го ОР. Как показали исследования, возможность их аппроксимации линейным полиномом:

$$Q_{резj} = a \cdot J_{OPk} + b \quad (11)$$

обеспечивается применением метода наименьших квадратов со степенью доверия 1,0. Здесь: a и b – константы аппроксимации (о.е.), значения которых приведены в таблице 6.

Как отмечено выше, важность потребителя с точки зрения тяжести нежелательных последствий нарушений электроснабжения в СЭС, возникающих при отказах ЭО, измеряется математическим ожиданием ущерба, рассчитываемым по формуле (9). Для рассматриваемого примера этот расчет выглядит следующим образом:

$$M[Y]_{ТП1} = (340 \cdot 2,8 + 360 \cdot 3,2) \cdot 0,0028 \cdot 45000 = 264978 \text{ руб.}$$

$$M[Y]_{ТП2} = (560 \cdot 3,9 + 550 \cdot 3,5) \cdot 0,0028 \cdot 45000 = 513324 \text{ руб.}$$

Здесь: время перерыва электроснабжения с учетом действия автоматики ввода резерва составляет $\Delta t_{нд} = 0,0028$ час; удельная стоимость потерь добычи нефти принята на уровне 100 \$/баррель, что соответствует $\xi_0 = 45000$ руб./тонна.

Таблица 6

Значения констант аппроксимации при формировании номограмм предиктивной оценки $Q_{резj}(J_{OPk})$

ОР с ИТС ≤ 100%	Потребители	Сценарии изменения оперативного состава схемы СЭС					
		1		2		3	
		Коэффициенты аппроксимации					
		a	b	a	b	a	b
ВЛ 6 кВ (Л1.2)	ТП1	− 0,3322	1,0	− 0,1222	0,3677	− 0,2218	0,6678
	ТП2	− 0,1546	1,0	− 0,0720	0,4655	− 0,1307	0,8454
КТПН 6/0,4 кВ (ТП2)	ТП1	− 0,9656	1,0	− 0,2136	0,2212	− 0,0332	0,0344
	ТП2	- 0.4058	1,0	− 0,2411	0,5942	− 0,0533	0,1314

Для выполнения предиктивной оценки уровней суммарного риска непроизводительных потерь добычи нефти потребителями СЭС (формула 10) по каждому из намеченных сценариев воспользуемся результатами расчета фактических значений ИТС

ОР: ТП2 ($J_{орк} = 0,714$) и Л1.2 ($J_{орк} = 0,510$), приведенными в таблицах 1 и 2, а также номограммами, аппроксимированными выражением (11) и данными таблице 6.

Так в случае эволюции схемы сети по сценарию 1 и вариации фактических значений ИТС $\leq 100\%$ k -го ОР результаты применения вычислительной процедуры для оценки уровня рисков и приоритизации ОР приведены в таблице 7 и на рисунке 4.

Таблица 7

Результаты применения вычислительной процедуры для формирования матрицы рисков по сценарию 1

ОР с ИТС $\leq 100\%$	Потребитель	Вероятность $Q_{рез}$, о.е.	Тяжесть последствий $M[Y]$, млн. руб.
Л1.2	ТП1	0,831	0,295
	ТП2	0,921	0,513
ТП2	ТП1	0,311	0,295
	ТП2	0,710	0,513

Матрица рисков (рис. 4) демонстрирует, что в обоих случаях Л1.2 является наиболее приоритетным ОР, не смотря на различие в видах необходимого технического воздействия, определяемого фактическим значением его ИТС (51%): для ТП2 – усиленный контроль технического состояния, неотложный ремонт; для ТП1 – ремонт по результатам планового диагностирования. Ранг приоритетности ремонта КТПН 6/0,4 кВ (ТП2), имеющего более высокий ИТС (71,4%), определяет: для ТП2 – ремонт по результатам планового диагностирования; для ТП1 – плановое диагностирование.

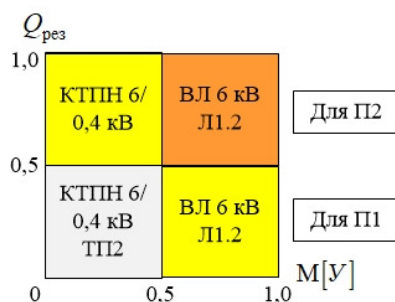


Рис. 4. Матрица рисков для сценария 1 схемы СЭС

Fig. 4. Risk matrix for scenario 1 of the PSS scheme

Аналогично представленному расчету выполняются расчеты для сценариев 2, 3 эволюции схемы СЭС.

Реальные условия эксплуатации, рассмотренные в примере, объясняют полученные результаты приоритизации ТОиР объектов ремонта с точки зрения надежности электроснабжения потребителей нефтепромысла. Вполне очевидным является тот факт, что высший ранг приоритетности ТОиР для обеспечения надежности функционирования каждого из потребителей (ТП1, ТП2) в схеме СЭС принадлежит наиболее ответственному ОР – магистральному участку ВЛ 6 кВ (Л1.2).

Предложенная методика предиктивной оценки вероятности нарушений электроснабжения потребителей и управления ремонтами энергообъектов в схеме СЭС в отличие от ранее известных подходов [19, 20], основанных на экспертных решениях, представляется более перспективной, поскольку главным образом опирается на научно-обоснованные положения теории надежности восстанавливаемых технических систем.

Применение номограмм (11) в качестве регулярного инструмента прогнозирования вероятностей нарушений электроснабжения каждого из нефтепромысловых объектов является оригинальным решением, которое совместно с расчетом ущербов от непроизводительных потерь добычи нефти обеспечивает предиктивную оценку рисков для приоритизации ОР. Некоторым произволом может быть отмечено назначение сценариев эволюции схемы СЭС и состава работающего ЭО, однако это объясняется практическими задачами эксплуатации нефтепромысловых объектов. Объемная на первый взгляд вычислительная процедура методики на самом деле не создает сложностей в применении, зато гарантирует достаточную достоверность и обоснованность получаемых результатов.

Заключение

1. Отечественные нефтегазодобывающие компании, исповедующие философию риск-ориентированного подхода в управлении энергетическими активами, остро нуждаются в регулярном инструментарии для предиктивного анализа и оценки рисков непроизводственных потерь добычи нефти при нарушениях электроснабжения объектов нефте - газодобычи. При этом одним из важных достоинств методологической поддержки является ее базирование не только на экспертных оценках, но и на научно-обоснованных положениях теории надежности сложных восстанавливаемых технических систем.

2. В статье предложена и обсуждена методика предиктивной оценки рисков нарушений электроснабжения потребителей нефтедобычи с учетом вариации оперативного состава схемы СЭС и фактического технического состояния ЭО. Одним из ключевых разделов методики является применение номограмм для прогноза вероятности прерываний электроснабжения каждого из нефтепромысловых объектов месторождения, получение которых базируется на методах расчета структурной надежности СЭС.

3. Разработанная вычислительная процедура методики, включающая математические модели и операционный алгоритм, апробирована на примере типовой СЭС нефтепромысла с реальными параметрами и условиями эксплуатации. Полученные результаты оправдывают заявленные ожидания как по удобству практического применения методики, ее аналитическим опциям, так и по уровню достоверности и обоснованности количественных оценок.

Литература

1. Грабчак Е.П. Надежное электроснабжение – это приоритет для всех энергетиков // Энергетическая политика. 2021. №7 (161). С. 4-9. doi: 10.46920/2409-5516_2021_7161_4.
2. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies // International Journal of Engineering Research & Technology. 2021. 10(10), pp. 388-393. doi: 10.17577/IJERTV10IS100149.
3. Манукян М.М., Гредасова Е.Е. Риск-ориентированный подход, основанный на оценке отказов и нарушения целостности оборудования в работе нефтеперерабатывающих производств. В сб. 11 Международной научной конференции «Институты и механизмы инновационного развития: мировой опыт и российская практика», Казань. 2021. – С. 324-328.
4. Kisuule M., Hernando-Gil I., Serugunda J. et al. Stochastic Planning and Operational Constraint Assessment of System-Customer Power Supply Risks in Electricity Distribution Networks. Sustainability. 2021. 13, 9579. <https://doi.org/10.3390/su13179579>.
5. Овчинникова Т.И., Потоцкий Е.П., Фирсова В.М. Риск-ориентированный подход при оценке опасностей в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. (2–1). С. 199-208. doi: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.
6. Хайдер С., Финкельштейн М., Лисанов М.В. и др. Кручинина И.А. Зарубежный опыт использования риск-ориентированного подхода при эксплуатации технических устройств на нефтегазовых объектах // Безопасность труда в промышленности, 2015. №8. С. 24-30.
7. Антоненко И.Н. Риск-ориентированный подход к управлению производственными активами энергетики // Энергоэксперт. 2020. №1 (73). С. 26-33.
8. Kongezos V., Jellum E. Industrial Asset Management strategies for the Oil & Gas sector, IET International Conference of Asset Management in London, November 27th. 2012, pp. 1-6.
9. Секретарев Ю.А., Левин В.М. Риск-ориентированные модели управления ремонтом оборудования в системах электроснабжения с монопотребителем // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии, 2021. №14 (1). С. 17-32. doi: 10.17516/1999-494X-0295.
10. Ndawula, M.B., Djokic, S.Z., Hernando-Gil, I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. Energies. 2019. 12, 531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>
11. Обоскалов В. П. Проблемы расчета структурной надежности систем электроснабжения с использованием вероятностного эквивалентирования // Электричество. 2015. №12. С. 4-12.
12. Боярова Д.А. Индекс технического состояния для оборудования 0,4-6(10) кВ энергообъектов нефтедобычи. В сб. XV Всероссийской научной конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 6–10 декабря 2021. Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2021. Ч. 4. С. 7-12.

13. Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д.А. К вопросу об управлении ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2022. Т.24. №1. С. 39-51. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.

14. Levin V.M., Guzhov N.P., Chernenko N.A. et al. Optimization of impacts parameters on the equipment of electrical networks during operation according to the technical condition. 2020 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1089. 2021, 012017. doi: 10.1088/1757-899X/1089/1/012017.

15. Абгарян Л.С. Выявление основных рисков нефтедобывающей компании и предложение основных путей их преодоления // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2017. № 1 Доступно по: <https://ekonomika.snauka.ru/2017/01/13889>. Ссылка активна на 15 августа 2022.

16. Костюков В.Н., Костюков Ал.В., Костюков Ан.В. Мониторинг риска эксплуатации оборудования в реальном времени // Динамика систем, механизмов и машин, 2014. С. 126-129.

17. Карпов М.В. Методика оценки ущерба от отказа электросетевого оборудования в системе управления производственными активами // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2018. № 3 (63). С. 29-37. doi: 10.25513/1812-3988.2018.3.29-37.

18. Новожилов Е.О. Принципы построения матрицы рисков // Функциональная безопасность. Теория и практика. 2015. С. 73-79. Доступно по: <https://www.dependability.ru/jour/article/viewFile/98/267>. Ссылка активна на 15 августа 2022.

19. Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S. et al. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy // Energy Production and Management in the 21st Century IV. 2020. Vol. 246, pp. 125–135. doi: 10.2495/EPM200121.

20. Грабчак Е.П., Медведева Е.А., Петренко А.О. и др. О методологии расчета технического риска на основе вероятности и последствий отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №1 (52). С.22-29.

Авторы публикации

Левин Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

Гужов Николай Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры Систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.

References

1. Grabchak EP. Nadezhnoe elektrosnabzhenie – eto prioritet dlya vseh energetikov // *Energeticheskaya politika*. 2021;7 (161): 4-9. doi: 10.46920/2409-5516_2021_7161_4. Bounjimi M.E., Abdul-Nour G. Smart Asset Management in Power Industry: A Review of the Key Technologies. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2021. 10(10), pp. 388-393. doi: 10.17577/IJERTV10IS100149.

2. Manukyan MM, Gredasova EE. Risk-orientirovannyj podhod, osnovannyj na ocenke otkazov i narusheniya celostnosti oborudovaniya v rabote neftepererabatyvayuschih proizvodstv. [Abstract] In: *Instituty i mehanizmy innovacionnogo razvitiya: mirovoj opyt i rossijskaya praktika*, Kazan'. 2021:324-328.

4. Kisuule M, Hernando-Gil I, Serugunda J. et al. Stochastic Planning and Operational Constraint Assessment of System-Customer Power Supply Risks in Electricity Distribution Networks. *Sustainability*. 2021;13:9579. <https://doi.org/10.3390/su13179579>

5. Ovchinnikova TI, Potockij EP., Firsova VM. Risk-orientirovannyj podhod pri ocenke opasnostej v gornoj promyshlennosti. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2021;(2–1): 199-208. doi: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-199-208.

6. Hajder S, Finkel'shtejn M, Lisanov MV. et al. Zarubezhnyj opyt ispol'zovaniya risk-orientirovannogo podhoda pri ekspluatcii tehniceskikh ustrojstv na neftegazovyh objektah. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2015;8: 24-30.

7. Antonenko IN. Risk-orientirovannyj podhod k upravleniyu proizvodstvennymi aktivami energetiki. *Energoekspert*. 2020;1 (73): 26-33.

8. Kongezos V, Jellum E. Industrial Asset Management strategies for the Oil & Gas sector, *IET International Conference of Asset Management in London*, November 27th. 2012, pp.

1-6.

9. Sekretarev YuA, Levin V.M. Risk-orientirovannye modeli upravleniya remontom oborudovaniya v sistemah elektrosnabzheniya s monopotrebitелем. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2021;14(1): 17–32. doi: 10.17516/1999-494X-0295

10.Ndawula MB, Djokic SZ, Hernando-Gil I. Reliability Enhancement in Power Networks under Uncertainty from Distributed Energy Resources. *Energies*. 2019;12:531. <https://doi.org/10.3390/en12030531>.

11.Oboskalov VP. Problemy rascheta strukturnoj nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s ispol'zovaniem veroyatnostnogo ekvivalentirovaniya. *Elektrichestvo*. 2015;12:4-12.

12. Boyarova D.A. Indeks tekhnicheskogo sostoyaniya dlya oborudovaniya 0,4-6(10) kV energo obektov nefte dobychi. In: *Nauka. Tekhnologii. Innovacii*. Novosibirsk, 06 – 10 Dec 2021. Novosibirsk. Izd-vo NGTU. 2021; 4: 7–12.

13. Levin VM, Guzhov NP, Boyarova DA. K voprosu ob upravlenii remontami elektrooborudovaniya nefte dobychi so strategiej po tekhnicheskomu sostoyaniyu. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2022;24(1): 39-51. doi: 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51.

14. Levin VM, Guzhov NP, Chernenko NA. et al. Optimization of impacts parameters on the equipment of electrical networks during operation according to the technical condition. 2020 *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1089. 2021, 012017. doi: 10.1088/1757-899X/1089/1/012017.

15. Abgaryan LS. Vyyavlenie osnovnyh riskov nefte dobyvayushej kompanii i predlozhenie osnovnyh putej ih preodoleniya. *Ekonomika i menedzhment innovacionnyh tekhnologij*. 2017. № 1 Dostupno po: <https://ekonomika.snauka.ru/2017/01/13889>. Ssylka aktivna na 15 avgusta 2022.

16.Kostyukov VN, Kostyukov AIV, Kostyukov AnV. Monitoring riska ekspluatatsii oborudovaniya v real'nom vremeni. *Dinamika sistem, mehanizmov i mashin*, 2014: 126-129.

17.Karpov M.V. Metodika ocenki uscherba ot otkaza elektrosetevogo oborudovaniya v sisteme upravleniya proizvodstvennymi aktivami. *Vestnik Omskogo universiteta. Seriya «Ekonomika»*. 2018. № 3 (63): 29-37. doi: 10.25513/1812-3988.2018.3.29-37.

18.Novozhilov E.O. Principy postroeniya matricy riskov. *Funkcional'naya bezopasnost'. Teoriya i praktika*. 2015: 73-79. Dostupno po: <https://www.dependability.ru/jour/article/viewFile/98/267>. Ssylka aktivna na 15 avgusta 2022.

19.Gitelman L.D., Kozhevnikov M.V., Chebotareva G.S. et al. Asset Management of energy company based on risk-oriented strategy. *Energy Production and Management in the 21st Century IV*. 2020;246:125–135. doi: 10.2495/EPM200121.

20.Grabchak EP, Medvedeva EA, Petrenko AO. et al. O metodologii rascheta tekhnicheskogo riska na osnove veroyatnosti i posledstvij otkaza funkcional'nogo uzla i edinicy osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2019;1(52): 22-29.

Authors of the publication

Vladimir M. Levin – Novosibirsk State Technical University.

Nikolay P.Guzhov – Novosibirsk State Technical University.

Получено

26.08.2022г.

Отредактировано

11.09.2022г.

Принято

11.09.2022г.



ДИАГНОСТИКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСКОНТАКТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ВИБРОМЕТРОВ

Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Хуснутдинов А.Н.,
Андреев Н.К.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
vasiliybas123@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Цель данной работы – усовершенствование метода вибрационного контроля активной части силового трансформатора путем фрактального анализа вибрационного его сигнала. Фрактальный анализ амплитудно-временной характеристики позволит количественно оценить степень «изрезанности» вибрационного сигнала трансформатора. Для количественной оценки введен коэффициент фрактального анализа (КФА) на основе определения фрактальной размерности по методу Хаусдорфа-Безиковича. Для апробации разработанного метода применен бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс (ИДК) с разработанным программным обеспечением на основе LabVIEW, ImageJ и Python. Проведены экспериментальные исследования технического состояния трансформатора ТСЗ 16 на основе разработанного метода с применением бесконтактного ИДК, определен КФА обмоток и магнитопровода исследуемого трансформатора, определен уровень технического состояния для контролируемых элементов трансформатора.

МЕТОДЫ. Вибрационный метод контроля позволяет осуществлять контроль силового трансформатора во время его работы под напряжением, что позволяет перейти от плановой системы ремонтов трансформаторов к системе вывода в ремонт по текущему техническому состоянию.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля апробирован с помощью разработанного бесконтактного ИДК, определен уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Усовершенствованный метод вибрационного контроля позволяет определять уровень технического состояния силового трансформатора под напряжением с возможностью автоматического получения решения о техническом состоянии, а также использовать статистические методы обработки и анализа полученных с трансформатора сигналов.

Ключевые слова: фрактальный анализ; бесконтактный лазерный измерительно-диагностический комплекс; силовой трансформатор; параметры вибрации; контроль технического состояния; программное обеспечение LabVIEW; программное обеспечение ImageJ; лазерный виброметр.

Для цитирования: Низамиев М.Ф., Басенко В.Р., Ившин И.В., Владимиров О.В., Хуснутдинов А.Н., Андреев Н.К. Диагностика трансформаторов электротехнических комплексов с использованием бесконтактных лазерных виброметров // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 97-109. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109.

DIAGNOSIS OF TRANSFORMERS OF ELECTRICAL COMPLEXES USING NON-CONTACT LASER VIBROMETERS

MF. Nizamiev, VR. Basenko, IV. Ivshin, OV. Vladimirov, A.N. Khusnutdinov,
N.K Andreev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vasiliybas123@mail.ru

Abstract: TARGET. The purpose of this work is to improve the method of vibration control of the active part of a power transformer by fractal analysis of its vibration signal. Fractal

analysis of the magnitude-time characteristics of the quantitative assessment of the degree of "jagged" vibration signal of the transformer. For a quantitative assessment, the coefficient of fractal analysis (FAC) was introduced based on the determination of the fractal dimension by the Hausdorff-Besikovich method. To test the developed method of application, a non-contact laser measuring diagnostic complex (MDC) with developed software based on LabVIEW, ImageJ and Python. Experimental studies of the technical condition of the transformer TSZ 16 were carried out on the basis of the developed method using a non-contact LCIK, the CFA of the windings and the magnetic circuit of a single transformer was determined, the level of technical condition for the impulse elements of the transformer was determined.

METHODS. The vibration control method makes it possible to control a power transformer during its operation under voltage, which makes it possible to switch from a planned system of transformer repairs to a system for taking repairs according to the current technical condition.

RESULTS. The improved method of vibration control was tested using the developed non-contact LCIK, the level of technical condition of the power transformer under voltage was determined.

CONCLUSION. An improved method of vibration control makes it possible to determine the level of technical condition of an energized power transformer with the possibility of automatically obtaining a decision on the technical condition, as well as to use statistical methods for processing and analyzing signals received from the transformer.

Keywords: fractal analysis; non-contact laser control and measuring complex; power transformer; vibration parameters; technical condition control; LabVIEW software; ImageJ software; laser vibrometer.

For citation: Nizamiev MF, Basenko VR, Ivshin IV, Vladimirov OV., Khusnutdinov A.N., Andreev NK. Diagnosis of transformers of electrical complexes using non-contact laser vibrometers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):97-109. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-97-109.

Введение

Работа современных силовых трансформаторов определяется надежностью его составных частей, а также обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) при эксплуатации. Техническое состояние электротехнических комплексов определяется по результатам их контроля и диагностики, что позволяет перейти к обслуживанию трансформаторов по их текущему техническому состоянию. Разработка новых, более точных, объективных, чувствительных, достоверных и рациональных методов определения технического состояния является актуальной задачей неразрушающего контроля силовых трансформаторов.

Диагностика электротехнического комплекса зависит от полноты диагностической информации. На современном этапе развития методов контроля технического состояния перспективным направлением является разработка новых подходов и методов обработки снятой с датчиков диагностической информации.

Задачи диагностики часто являются трудно формализуемыми, т.к. характеризуются большим числом случайных факторов, действующих на силовой трансформатор в эксплуатации, множественностью причинно-следственных связей между данными факторами, отсутствием или сложностью формальных алгоритмов решения, неполнотой и нечеткостью исходных данных, нечеткостью конечных целей и ограничений при принятии решений [1].

Самыми эффективными методами контроля технического состояния силовых трансформаторов являются следующие основные группы методов:

- хроматографический анализ растворенных газов в масле трансформатора;
- температурный контроль элементов трансформатора;
- контроль электрических параметров трансформатора;
- контроль вибрационных параметров силовых трансформаторов [10].

Трендом в области контроля технического состояния являются методы, позволяющие осуществить проведение измерений и испытаний для трансформаторов под напряжением, что позволяет перейти к обслуживанию трансформаторов по их текущему техническому состоянию и снизить технологический и экономический ущерб вывода оборудования из эксплуатации.

Методы вибрационного контроля, в отличие от остальных, позволяют осуществлять контроль трансформатора во время его работы под напряжением, также, преимуществом

вибрационных методов являются высокая точность, чувствительность к зарождающимся и развивающимся дефектам, и возможность применять компьютерные технологии для обработки и анализа информации [1].

По результатам анализа работ [4, 5, 6, 7] можно сделать вывод, что спектры вибрации бака трансформатора включают в себя от двух до десяти информативных частот. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуд на частотах 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора. Соответственно, анализируемые основные частоты 100 Гц, 300 Гц, 500 Гц амплитудного спектра не несут существенной информации для диагностики силового трансформатора.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [1, 2, 7, 8], основываются на сравнении эталонного (бездефектного) и текущих спектров вибрации активной части силового трансформатора. Однако проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что используемые программные обеспечения имеют погрешность при преобразовании амплитудно-временного сигнала в спектр с использованием быстрого преобразования Фурье. В результате возникновения дефекта в обмотке трансформатора появляются дополнительные моды колебаний во временном сигнале, но на амплитудном спектре существенных изменений вибрационных параметров не наблюдается.

Методики вибрационного контроля, представленные в работах [7, 8, 9, 11] позволяют оценить техническое состояние активной части силового трансформатора только как исправное и неисправное. Однако при оценке состояния как неисправное, обмотки или магнитопровод могут находиться в работоспособном состоянии, и нет необходимости в оперативном выводе такого трансформатора из эксплуатации. При этом возникают трудности с интерпретацией вибрационного сигнала, ввиду его сложной систематизации, что может увеличить погрешность измерений и в дальнейшем привести к неверной оценке технического состояния активной части силового трансформатора [4, 5].

В этой связи необходимо разработать методику вибрационного контроля силового трансформатора, основанную на фрактальном анализе амплитудно-временного сигнала, с целью более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик.

Методы вибрационного контроля силового трансформатора

На сегодняшний день современными методами вибрационного контроля силовых трансформаторов являются [2]:

- определение уровня вибрации стенки бака трансформатора;
- метод спектрального вибрационного контроля;
- метод частотного контроля.

Самым распространенным методом сегодня является метод спектрального вибрационного контроля. Но существующие системы вибрационного контроля, такие как «Веста» и «BALTECH», используют контактные датчики вибрации. Данные датчики обладают рядом существенных недостатков, влияющих на качество измерений. Данными недостатками являются:

- наличие неравномерности амплитудно-частотных характеристик (АЧХ);
- возникновение несовпадений АЧХ у однотипных датчиков;
- низкая повторяемость сигнала для датчика, находящегося на поверхности бака трансформатора, что приводит к высокому разбросу измерений вибрации;
- ограниченный температурный диапазон работы датчиков;
- трудоемкость процесса крепления датчика;
- влияние качества поверхности бака трансформатора (ровности, гладкости и чистоты) на сохранение широкого рабочего частотного диапазона;
- механический контакт «трансформатор – датчик» вызывает «ложные» сигналы, которые снижают качество измерений, что влияет на качество контроля трансформатора;
- небезопасность крепления датчиков на объекты повышенной опасности (под высоким напряжением).

Бесконтактные лазерные виброметры не имеют таких недостатков и позволяют проводить трудоемкие измерения в труднодоступных местах силового трансформатора без снижения качества измерений. Задача устранения недостатков контактных датчиков решена

за счет создания бесконтактного лазерного контрольно - измерительного комплекса (ИДК) на основе лазерного виброметра [1, 2].

Но при проведении вибрационного контроля технического состояния силового трансформатора также возникает ряд проблем с формализацией и количественной оценкой полученного амплитудного спектра. Рассмотрим проблемы, возникающие при проведении спектрального анализа вибрационных характеристик силового трансформатора.

Виброскорость элементов трансформатора V_{mp} является функцией от амплитуды смещения (виброперемещения) данного элемента трансформатора от своего начального положения в пространстве (1):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} \quad (1)$$

Возникновение вибрации в трансформаторе, находящегося под напряжением, связано с колебаниями электромагнитного поля, поэтому функция виброскорости трансформатора имеет гармонический вид (2):

$$V_{mp} = \frac{\partial x}{\partial t} = Va \cos(\omega t) = Va \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

Графиком данной функции является синусоида. Для силовых трансформаторов определен информативно-частотный диапазон – 100 - 700 Гц [3]. Для работоспособного трансформатора без явных дефектов амплитудный спектр будет содержать пики амплитуды на частоте 100 Гц, 300 Гц и 500 Гц. Появление амплитудного пика на частоте 100 Гц связано с протеканием в обмотках тока с промышленной частотой 50 Гц. Но данное значение частоты удваивается из-за магнитострикционного эффекта, действующего в обмотке. Наличие амплитудных пиков с частотами 300 и 500 Гц связано с магнитным насыщением магнитопровода силового трансформатора.[3]

В амплитудном спектре вибрации трансформатора в области частот меньших 100 Гц находятся вибрации, связанные с собственными вибрациями конструкции, либо же вибрации от систем охлаждения трансформатора, если таковые имеются. Частоты более 1000 Гц могут быть вызваны различными причинами, в частности для масляных трансформаторов данные вибрации связаны с колебательными процессами в масле, но, чаще всего, в диапазоне частот от 1000 Гц и выше вибрации обмоток и магнитопровода затухают, поэтому информативность данной области амплитудного спектра вибрации трансформатора очень низка.

Вибрационный сигнал идеально работающего трансформатора должен содержать частоту 100 Гц, которая вызвана магнитострикционным эффектом. Амплитудно-временная характеристика (АВХ) идеально работающего трансформатора имеет вид, как показано на рисунке 1.

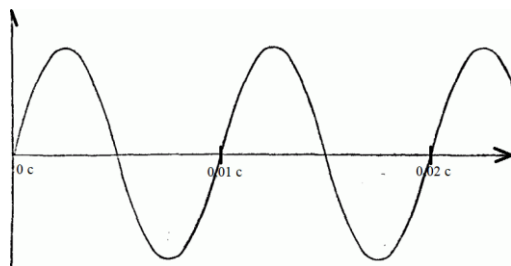


Рис.1 Амплитудно-временная характеристика идеально работающего трансформатора

Fig.1 Amplitude-time characteristic of an ideally working transformer

На практике, при измерении вибрации работающего трансформатора получается сигнал, имеющий сложную форму, состоящий из множества синусоид, но при этом, измеренный сигнал сохраняет периодичность, как показано на рисунке 2.

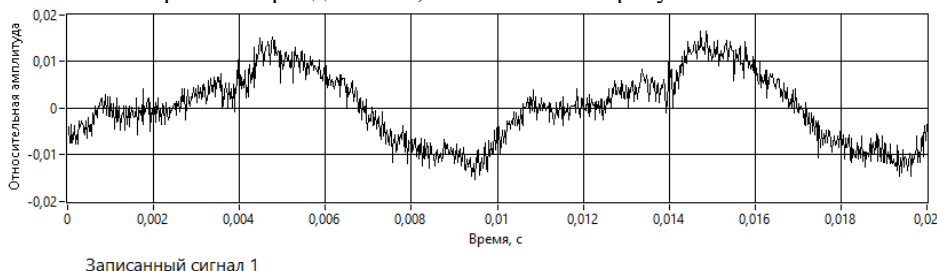


Рис.2. Амплитудно-временная характеристика работающего трансформатора

Fig.2. Amplitude-time characteristic of a working transformer

На сегодняшний день, из данных временных сигналов строят амплитудные спектры для анализа технического состояния трансформатора. Пример амплитудного спектра представлен на рисунке 3.

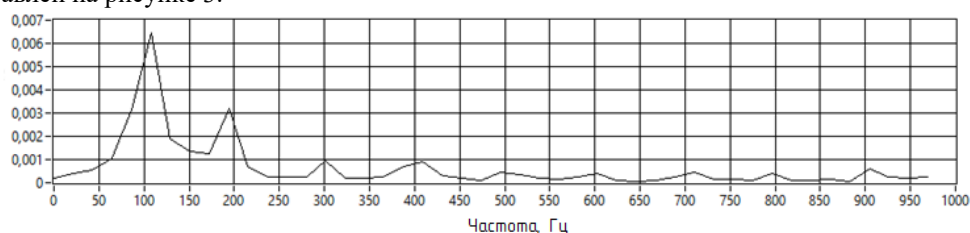


Рис.3. Амплитудный спектр работающего трансформатора

Fig.3. Amplitude spectrum of a working transformer

При этом анализируется возникновение амплитуды виброскорости на характерной частоте. Но по амплитудному спектру сложно количественно оценить состояние той или иной части трансформатора. Возникновение или отсутствие пиков амплитуд на частотах, отличных от 100 Гц могут носить случайный характер или содержать программную ошибку. Ниже представлены амплитудно-временные характеристики трансформатора ТСЗ и построенные из них амплитудные спектры.

На рисунке 4 представлена амплитудно – временная характеристика обмотки трансформатора ТСЗ. Данная обмотка трансформатора не имеет дефектов и находится в хорошем техническом состоянии, поэтому форма вибрационного сигнала очень близка к синусоидальной.

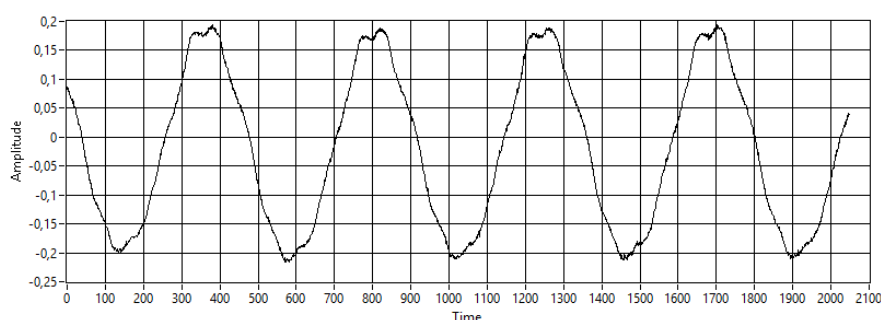


Рис.4. Амплитудно - временная характеристика бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.4. Amplitude - time characteristic of the defect-free winding of the transformer TSZ

Из представленной на рисунке 4 АВХ построен амплитудный спектр виброскорости бездефектной обмотки, который представлен на рисунке 5.

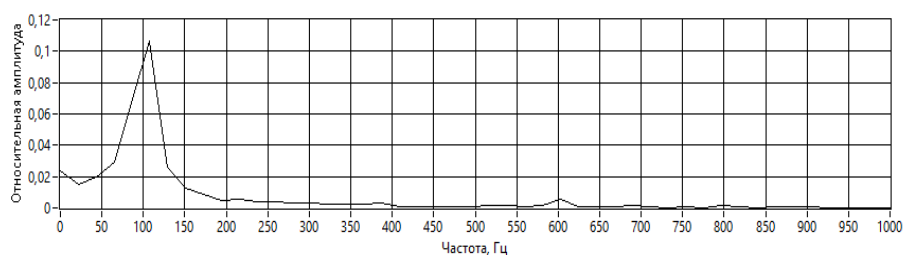


Рис.5. Амплитудный спектр бездефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.5. Amplitude spectrum of the defect-free winding of the transformer TSZ

В построенном амплитудном спектре присутствует только амплитуда виброскорости на частоте 100 Гц, так как обмотка является бездефектной.

Рассмотрим АВХ и амплитудный спектр обмотки с зарождающимся дефектом изоляции обмотки. Обмотка имеет повреждение изоляции, что приводит к дополнительному нагреву до 5-7 градусов Цельсия. Её АВХ представлена на рисунке 6.

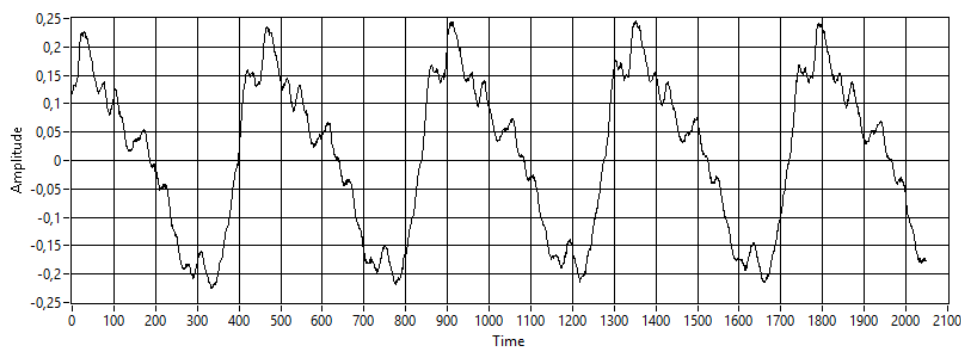


Рис.6. Амплитудно - временная характеристика дефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.6. Amplitude - time characteristic of the defective winding of the transformer TSZ

В результате появления дефекта в обмотке, частично изменились механические и электрические характеристики обмотки трансформатора, что привело к изменению АВХ. Появились дополнительные моды колебаний в вибрационном сигнале трансформатора. Но на амплитудном спектре данного сигнала существенных изменений в составе спектра, в отличие от спектра бездефектной обмотки, не наблюдается (Рис. 7).

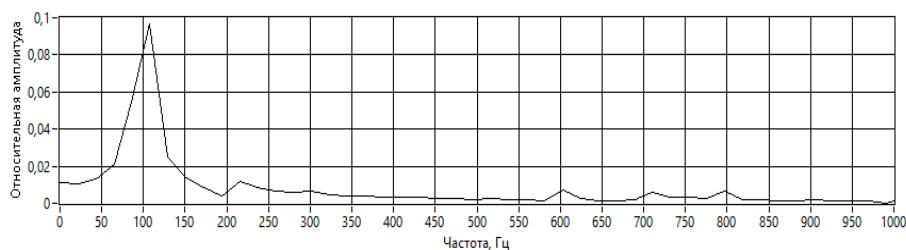


Рис.7. Амплитудный спектр дефектной обмотки трансформатора ТСЗ

Fig.7. Amplitude spectrum of the defective winding of the transformer TSZ

Поэтому, необходимо решить задачу повышения качества проведения вибрационного анализа силового трансформатора, путем более четкой формализации и получения количественной оценки вибрационных характеристик с помощью фрактального анализа.

Метод фрактального анализа вибрационного сигнала силового трансформатора

Для решения задачи повышения качества диагностики электротехнического комплекса предлагается применять метод фрактального анализа на основе определения фрактальной размерности виброскорости измеренного сигнала [9,10]. Данный метод заключается в следующем. График амплитудно-временной характеристики трансформатора будет разбиваться на равномерную квадратную сетку с длиной стороны квадрата, равного ε и с числом ячеек равным N . Далее будет определяться фрактальная размерность виброскорости силового трансформатора, по методу Хаусдорфа-Безиковича [11], с помощью формулы (3):

$$D_v = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

Фрактальная размерность характеризует степень «изрезанности» амплитудно-временной характеристики виброскорости трансформатора. Так как, вибрационный сигнал работающего зависит не только от его технического состояния, но и от параметров окружающей среды, и от режима эксплуатации [12,13], целесообразно оценивать не абсолютную фрактальную размерность, а ее значение относительно фрактальной размерности идеальной АВХ трансформатора. Идеальной является АВХ, которая содержит в себе только одну моду колебаний, с частотой 100 Гц (рисунок 1). Для оценки предлагается ввести коэффициент фрактального анализа (КФА), который будет рассчитываться следующим образом:

$$КФА = \frac{D_v}{D_{100}} \quad (4)$$

где D_v – фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ виброскорости силового трансформатора;

D_{100} - фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича АВХ идеального синусоидального сигнала с частотой 100 Гц. Полученный КФА будет являться диагностическим признаком, по которому будет оцениваться техническое состояние контролируемого трансформатора [14]. КФА предлагается оценивать на основе приказа министерства энергетики № 676. В зависимости от значения КФА трансформатору будет присваиваться решение о техническом состоянии. Данное решение будет иметь следующие формулировки:

- «очень хорошее»
- «хорошее»
- «удовлетворительное»
- «плохое»
- «критическое»

На сегодняшний день существует большое количество способов определения фрактальной размерности. В данном методе предлагается определять фрактальную размерность на основе тангенса угла наклона для зависимости логарифма размеров ячейки квадратной сетки АВХ виброскорости трансформатора от числа ячеек данной сетки [15].

Для определения граничных значений КФА использованы две типовые кривые. За идеальную, принята кривая, описывающая синусоиду с частотой колебаний 100 Гц (рисунок 1), так как она соответствует АВХ идеально работающего трансформатора. За кривую, КФА которой будет соответствовать критическому состоянию, принята кривая Киссветтера, представленная на рисунке 8.

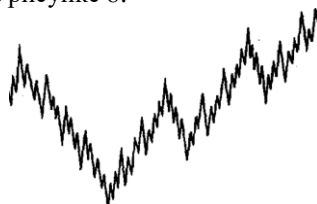


Рис.8. Кривая Киссветтера

Fig.8. Kisswetter curve

Кривая Киссветтера является ориентационной кривой в теории фракталов, у которой известна фрактальная размерность, равная 1,5 [14]. При этом КФА кривой Киссветтера будет превышать КФА АВХ любого трансформатора, так как информативный вибрационный сигнал трансформатора содержит в себе моды в диапазоне от 100 до 700 Гц и по степени «изрезанности» не превысит кривую Киссветтера.

Фрактальная размерность синусоиды (рисунок 1) равна $D = 1,003$, а так как она соответствует идеальному состоянию трансформатора, то её $KFA = 1$. Фрактальная размерность кривой Киссветтера $D = 1,5$, следовательно $KFA = \frac{1,5}{1,003} = 1,496$

В диапазоне от 1 до 1,496 будут присваиваться решения о техническом состоянии трансформатора со следующими границами, в соответствии с приказом министерства энергетики № 676:

- «очень хорошее» - [КФА от 1 до 1,1];
- «хорошее» - [КФА от 1,101 до 1,2];
- «удовлетворительное» - [КФА от 1,201 до 1,3];
- «плохое» - [КФА от 1,301 до 1,4];
- «критическое» - [КФА от 1,401 до 1,496].

Результаты реализации вибрационного метода контроля технического состояния силового трансформатора на основе фрактального анализа с помощью бесконтактного ИДК

С помощью разработанного ИДК [1] проведены экспериментальные исследования параметров вибрации работающего силового трансформатора ТСЗ 16 кВА (рис. 9).



Рис.9. ТСЗ 16 кВА

Fig.9. TSZ 16 kVA

При проведении измерений лазерный виброметр располагался на расстоянии 1 м от исследуемого силового трансформатора, для виброметра были установлены следующие характеристики:

- границы диапазона частот от 0 Гц до 22 кГц;
- максимальное значение виброскорости – 100 мм/с;
- разрешение по виброскорости – 0,02 (мкм/с)/Гц;
- частота дискретизации 44,1 кГц.

С данного трансформатора был снят защитный корпус для получения доступа к обмоткам и магнитопроводу. Измерения проводились непосредственно с трех обмоток и магнитопровода трансформатора [16,17], точки измерений показаны на рисунке 10.

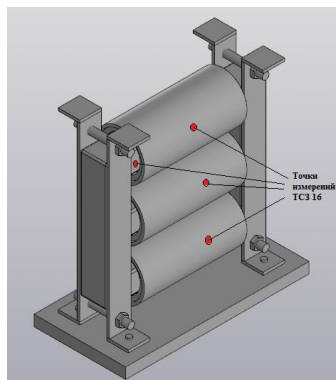


Рис.10. Точки измерений виброскорости ТСЗ 16 кВА

Fig.10. Vibration velocity measurement points TSZ 16 kVA

Результаты измерений с помощью разработанного ИДК представлены на рисунках 11-15 в виде АВХ виброскорости, построенных в разработанном программном обеспечении LabVIEW. На рисунках 11-13 представлены АВХ обмоток работающего трансформатора.

На рисунках 14-15 показаны АВХ магнитопровода до и после распрессовки.

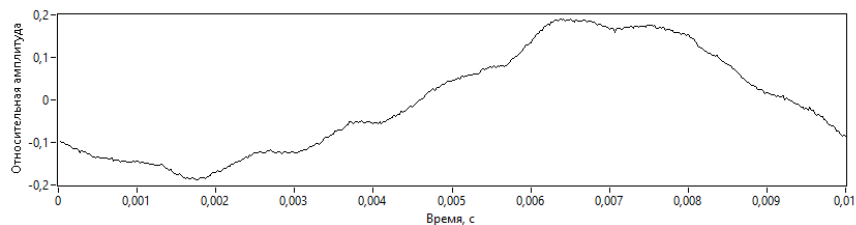


Рис.11. АВХ виброскорости верхней обмотки

Fig.11. ATR vibration velocity of the upper winding

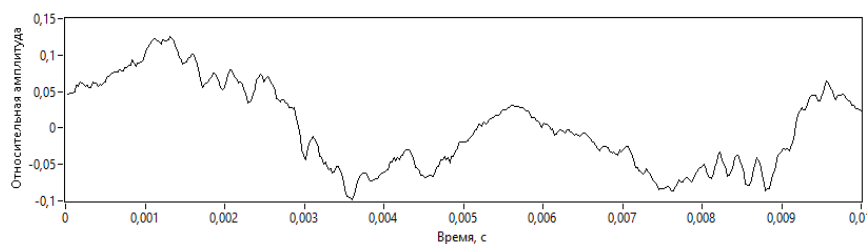


Рис.12. АВХ виброскорости средней обмотки (с дефектом)

Fig.12. ATR vibration velocity of the middle winding (with a defect)

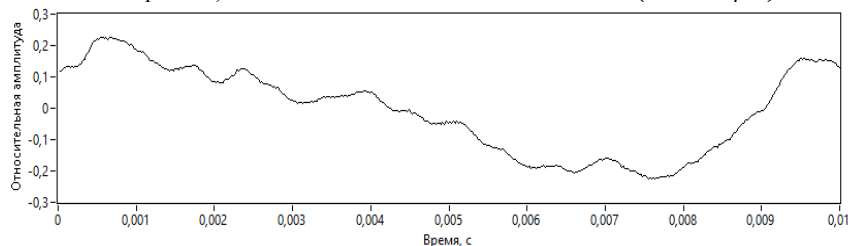


Рис.13. АВХ виброскорости нижней обмотки

Fig.13. ATR vibration velocity of the lower winding

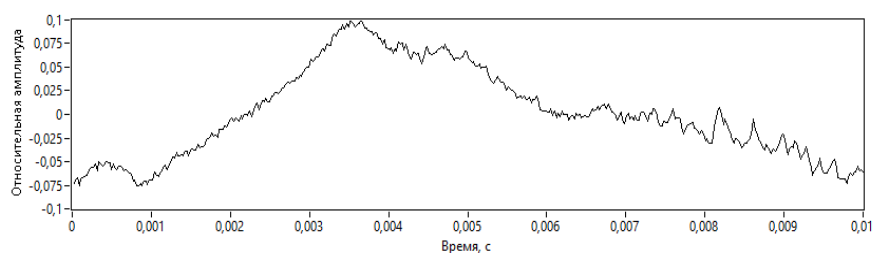


Рис.14. АВХ виброскорости магнитопровода до распрессовки *Fig.14. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit before pressing out*

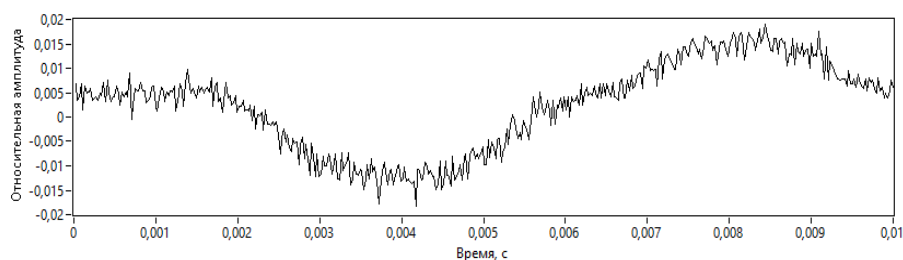


Рис.15. АВХ виброскорости магнитопровода после распрессовки *Fig.15. ATR of the vibration velocity of the magnetic circuit after pressing out*

Для данных АВХ в разработанном программном обеспечении на основе *ImageJ* определены их фрактальные размерности. Фрактальная размерность определяется по формуле (1) и графически представляется как тангенс угла наклона от графика зависимости логарифмов числа ячеек сетки и размеров полученной ячейки. Определение фрактальной размерности АВХ виброскорости верхней обмотки ТСЗ 16 представлено на рисунке 16.

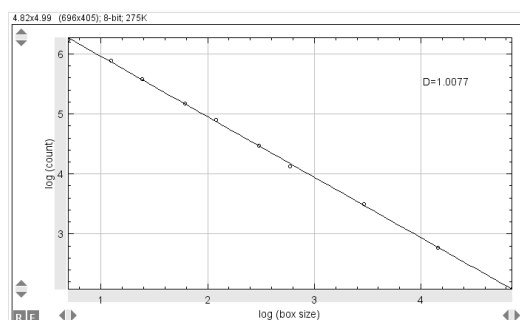


Рис. 16. График определения фрактальной размерности в программе *ImageJ* *Fig. 16. Graph for determining the fractal dimension in the ImageJ program*

Результаты фрактального анализа трансформатора ТСЗ 16 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты фрактального анализа ТСЗ 16					
	Место измерения ТСЗ 16				
	верхняя обмотка	средняя обмотка	нижняя обмотка	магнитопровод до распрессовки	магнитопровод после распрессовки
D	1,06	1,12	1,0077	1,11	1,31
КФА	1,057	1,117	1,004	1,106	1,306
Состояние элемента трансформатора	очень хорошо	хорошо	очень хорошо	хорошо	неудовлетворительно

По результатам проведения фрактального анализа установлено, что верхняя и нижняя обмотка находятся в очень хорошем техническом состоянии, средняя обмотка и запрессованный магнитопровод определяются как элементы с хорошим техническим состоянием, а магнитопровод после распрессовки на 40 Н/м перешел в неудовлетворительное техническое состояние. Данные решения определяются в созданной

подпрограмме «Вывод о техническом состоянии», в программной среде python. Внешний вид подпрограммы представлен на рисунке 17.

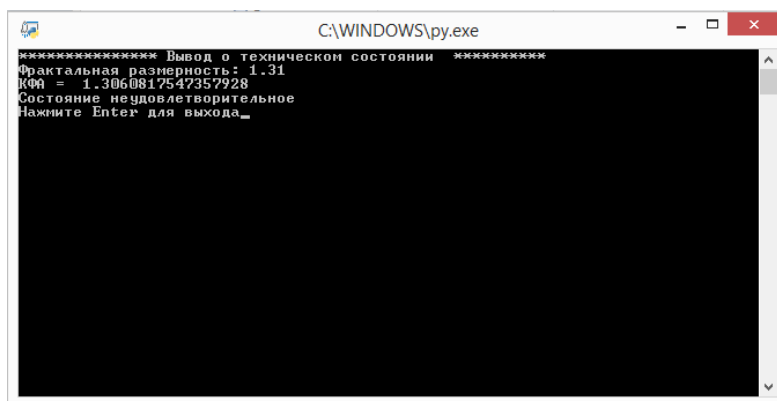


Рис.17. Подпрограмма «Вывод о техническом состоянии» *Fig.17. Subprogram «Conclusion on the technical condition»*

Применение метода вибрационного фрактального анализа на трансформаторе ТСЗ 16 показало возможность обнаружения развивающихся дефектов, а также количественной оценки вибрационного сигнала силового трансформатора на основе расчета КФА.

Выводы

1. Разработан метод контроля технического состояния силового трансформатора электротехнического комплекса путем вибрационного фрактального анализа АВХ виброскорости.
2. Разработанный метод контроля технического состояния реализован с помощью бесконтактного ИДК с разработанным программным обеспечением в среде LabVIEW, ImageJ и python.
3. С помощью бесконтактного ИДК с разработанным программным обеспечением проведены экспериментальные исследования контроля технического состояния ТСЗ 16 по результатам которых:
 - построены амплитудно-временные характеристики виброскорости в 4 точках трансформатора ТСЗ, характеризующие уровень технического состояния активной части силового трансформатора;
 - рассчитаны КФА АВХ виброскорости силового трансформатора;
 - сделан вывод об ухудшении технического состояния средней обмотки и магнитопровода ТСЗ 16;
 - подтверждены интервалы КФА для принятия решения о техническом состоянии трансформатора.
4. Разработанный метод контроля технического состояния силового трансформатора путем вибрационного фрактального анализа позволяет:
 - бесконтактно контролировать уровень технического состояния силового трансформатора;
 - анализировать амплитудно-временные характеристики силового трансформатора на основе фрактального анализа;
 - количественно оценивать вибрационные параметры силового трансформатора на основе определения КФА контролируемых элементов трансформатора;
 - получать вывод о техническом состоянии силового трансформатора.
5. Разработанный метод контроля апробирован в результате экспериментальных исследований и подтвердил свою работоспособность по определению уровня технического состояния трансформатора.

Литература

1. Басенко В.Р., Владимиров О.В., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Бесконтактный лазерный контрольно-измерительный комплекс для определения уровня протекания обмоток и магнитопровода силового трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 155-168.
2. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса /

«ЭНЕРГИЯ-2020» - Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 2020. Сборник материалов конференции, том №. С.26

3. Гавриленко А.В., Долин А.П. Система контроля качества прессовки обмоток и стали трансформаторов по замерам вибрации, контроль состояния маслораспределителей / Димрус Пермь: 2015. С. 60.

4. Низамиев М.Ф., Ившин И.В. Контроль технического состояния электротехнического оборудования / Энергетическая безопасность. Сборник научных статей III Международного конгресса. 2020. С. 297-300

5. Низамиев М.Ф., Ившин И.В., Максимов В.В., Билалов Ф.Ф. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования // Электрика. 2015. С.18–25

6. Лазарев И. В. Осевые усилия в элементах активной части силового трансформатора при запрессовке обмоток, изменении температуры и влагосодержания изоляционных материалов / Динамика и прочность машин. 2014. С.12-18

7. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Dolomanyk L.V. Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods / 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings. V. 1, Part 5, Novosibirsk 2018. P. 320-325.

8. Ivshin I.V., Nizamiev M.F., Vladimirov O.V., Gibadullin R.R., Denisova N.V. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informative Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects / Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research, Volum 8, Issue 1, Special Issue III., 2018. P. 322-333.

9. Басенко В.Р., Низамиев М.Ф. Анализ вибрационных сигналов силового трансформатора с применением лазерного измерительно-диагностического комплекса // «ЭНЕРГИЯ-2020». 2020. С.26.

10. Рыбаков Л.М.. Методы и способы оценки состояния силовых трансформаторов в ходе эксплуатации / Вестник Чувашской ГСХА, №2, 2018, С.108-111

11. Низамиев М.Ф. Анализ методов исследования виброакустических характеристик деталей сложной формы и технических средств обработки сигналов сложной формы. 2014. №Т.1 С. 151-152.

12. Нгуен Тиен, Гильфанов К.Х. Тепловое моделирование маслонаполненного силового трансформатора ТМ-160/10 // Известие вузов. Проблемы энергетики № 5 Казань: КГЭУ, 2019, С. 141-151.

13. Kurtz C., Ford G., Vainberg M. Managing aged transformers // Transmission & Distribution World. 2005, July. P. 36–45.

14. Metwally I.A. Failures, monitoring, and new trends of power transformers // IEEE potentials. 2011, May/June. P. 36–43.

15. Theil G. Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies / Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.

16. Грачева Е.И., О.В. Наумов, Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Известие вузов. Проблемы энергетики № 7-8. Казань: КГЭУ, 2017, С. 71-77

17. Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // Известия высших учебных заведений.. Проблемы энергетики. 2020. № 3. С. 78-89.

Авторы публикации

Низамиев Марат Фирденатович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Басенко Василий Романович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Ившин Игорь Владимирович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Владимиров Олег Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Хуснутдинов Азат Назипович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехнические комплексы и системы», Казанский государственный энергетический университет.

Андреев Николай Кузьмич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника».

References

1. Basenko VR, Vladimirov OV, Ivshin IV, Nizamiev MF. Non-contact laser control and measuring complex for determining the level of pressing of windings and magnetic circuit of a power transformer. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(3):155-168.
2. Basenko VR, Nizamiyev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. «ENERGY-2020». Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists. Collection of conference materials. 2020;3:26.
3. Gavrilenko AV, Dolin AP. *Quality control system for pressing the windings and steel of transformers by measuring vibration, monitoring the state of oil pumps*. Dimrus. Perm: 2015. P. 60.
4. Nizamiev MF, Ivshin IV. *Control of the technical condition of electrical equipmen*. Energy security. Collection of scientific articles of the III International Congress. 2020. P. 297-300
5. Nizamiev MF, Ivshin IV, Maksimov VV, Bilalov FF. Measuring and diagnostic complex for monitoring the technical condition of electrical equipment. *Electrica*. 2015. P.18–25
6. Lazarev IV. Axial forces in the elements of the active part of a power transformer when pressing windings, changing the temperature and moisture content of insulating materials. *Dynamics and Strength of Machines*. 2014. P.12-18
7. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. *Vibration Method for Monitoring the Technical Condition of Support-Rod Insulators Using Non-Contact Laser Vibrometry Methods*. 14-th International Scientific Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)-44894 Proceedings. 2018;1(5): 320-325. Novosibirsk 2018. P. 320-325.
8. Ivshin IV, Nizamiev MF, Vladimirov OV, et al. The Method of Non-Contact Vibration Control of Energy Device Detail State Based on the Use of Informativ Frequencies of Own Vibrations Related to Certain Types of Defects. *Ad Alta. Journal of Interdisciplinary Research*. 2018;8(1): 322-333. Special Issue III.
9. Basenko VR, Nizamiev MF. *Analysis of vibration signals of a power transformer using a laser measuring and diagnostic complex*. «ENERGY-2020». 2020. P.26
10. Rybakov LM. Methods and methods for assessing the state of power transformers during operation. *Bulletin of the Chuvash State Agricultural Academy*. 2018;2:108-111.
11. Nizamiev MF. *Analysis of methods for studying the vibroacoustic characteristics of parts of complex shape and technical means of processing signals of complex shape*. 2014;1:151-152.
12. Nguyen Tien, Gilfanov K.Kh. Thermal modeling of the TM-160/10 oil-filled power transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2019;5:141-151.
13. Kurtz C, Ford G, Vainberg M. *Managing aged transformers*. Transmission & Distribution World. 2005, July. P. 36–45.
14. Metwally IA. *Failures, monitoring, and new trends of power transformers*. IEEE potentials. 2011, May / June. P. 36–43.
15. Theil G. Parameter evaluation for extended Markov models applied to condition- and reliability-centered maintenance planning strategies. Proc. 9th Int. Conf. on Probab. Methods Applied to Power Syst., KTH, Stockholm, Sweden. 2006.
16. Gracheva EI, Naumov OV, Fedotov EA. Influence of the load capacity of power transformers on their operational characteristics. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2017;7:71-77
17. Mustafin RG, Yarysh RF. Differential method for detecting turn short circuits in a

three-phase transformer. *Izvestiya vuzov. Energy Problems*. 2020;3:78-89.

Authors of the publication

Marat F. Nizamiev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vasily R. Basenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Igor V. Ivshin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vladimirov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Azat N. Khusnutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Nikolay K. Andreev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено **31.08.2022г.**

Отредактировано **11.09.2022г.**

Принято **11.09.2022г.**



ВЛИЯНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПАСТЫ НА ИЗОЛЯЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Брагин И.Ю.¹, Пантелеева Л.А.¹, Покоев П.Н.¹, Грачева Е.И.²

¹Ижевская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Ижевск, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
<https://orcid.org/0000-0002-5416-1091>, vaniabra@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ: рассмотреть проблему использования специальной ферромагнитной пасты, с помощью которой заполняются воздушные зазоры в магнитопроводе масляного силового трансформатора, с целью уменьшения его потерь, путем снижения вихревых токов в магнитопроводе. Провести опыты по определению динамики изменения высоковольтного пробоя трансформаторного масла, после добавления в него ферромагнитной пасты. МЕТОДЫ. Для решения поставленной задачи были разработаны несколько образцов ферромагнитной пасты, отличающихся друг от друга использованием разного связующего материала для ферромагнитного порошка. Образцы были помещены в емкости на несколько дней, наполненные трансформаторным маслом. С помощью электрической установки АИМ-90, проводились замеры высоковольтного пробоя трансформаторного масла каждого образца. Благодаря такому методу, получилось определить, как влияет ферромагнитная паста на изоляционные свойства трансформаторного масла. РЕЗУЛЬТАТЫ. Для наглядности, полученные результаты всех образцов были построены на графике. Исходя из графика, стало ясно, что в некоторых образцах трансформаторного масла появилось значительное количество механических примесей, образованных от ферромагнитной пасты, что крайне пагубно повлияло на изоляционные свойства масла. Также были образцы, у которых свойства масла практически не изменились. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В качестве выводов, появилось определенное видение того, какую ферромагнитную пасту можно использовать в конструкции масляного силового трансформатора, также удалось понять, какие образцы ферромагнитных паст крайне негативно влияют на изоляционные свойства трансформаторного масла.

Ключевые слова: трансформатор; ферромагнетик; вихревые токи; магнитные потери; магнитопровод; пробивное напряжение.

Для цитирования: Брагин И.Ю., Пантелеева Л.А., Покоев П.Н., Грачева Е.И. Влияние ферромагнитной пасты на изоляционные свойства трансформаторного масла// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 110-119. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-110-119.

EFFECT OF FERROMAGNETIC PASTE ON INSULATING PROPERTIES OF TRANSFORMER OIL

IY. Bragin¹, LA. Panteleeva¹, PN. Pokoev¹, EI. Gracheva²

¹Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
<https://orcid.org/0000-0002-5416-1091>, vaniabra@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE. Consider the problem of using a special ferromagnetic paste, which fills the air gaps in the magnetic circuit of an oil power transformer, in order to reduce its losses, by reducing eddy currents in the magnetic circuit. Conduct experiments to determine the dynamics of change of high-voltage breakdown of transformer oil, after adding ferromagnetic paste to it. METHODS. To solve this problem, several samples of ferromagnetic paste have been developed, differing from each other using different binding material for ferromagnetic powder. The samples were placed in containers for several days filled with transformer oil. With the help of electrical installation AIM-90, measurements of high-voltage breakdown of transformer oil of each sample

were carried out. Thanks to this method, it was possible to determine how the ferromagnetic paste affects the insulating properties of the transformer oil. RESULTS. For clarity, the results of all samples were plotted. Based on the graph, it became clear that in some samples of transformer oil a significant amount of mechanical impurities formed from ferromagnetic paste appeared, which extremely negatively affected the insulating properties of the oil. There were also samples in which the properties of the oil practically did not change. CONCLUSION. As conclusions, there was a certain vision of which ferromagnetic paste can be used in the design of an oil power transformer, it was also possible to understand which samples of ferromagnetic pastes extremely negatively affect the insulating properties of the transformer oil.

Keywords: transformer; ferromagnetic; eddy currents; magnetic losses; magnetic conductor; breakdown voltage.

For citation: Bragin IY, Panteleeva LA, Pokoev PN, Gracheva E.I Effect of ferromagnetic paste on insulating properties of transformer oil. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):110-119. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-110-119.

Введение

Научную новизну результатов исследования составляют:

- полученный состав ферромагнитной пасты с высокой магнитной проницаемостью и высокой вязкостью, предназначенной для заполнения стыков (зазоров) сердечника масляного трансформатора, собираемого из листов электротехнической стали, не оказывает негативного влияния на изоляционные свойства трансформаторного масла, что ведет к уменьшению потерь в трансформаторе.

Практическая значимость исследований составляет:

- обработка сердечника силового трансформатора, собранного из листов электротехнической стали, путем заполнения воздушных зазоров магнитопровода ферромагнитной пастой, ведёт к снижению его магнитного сопротивления.

В передаче, преобразовании и распределении электрической энергии важную роль выполняют трехфазные силовые трансформаторы. Необходимость в многократном повышении первичного напряжения генераторов, а затем в понижении конечного подаваемого напряжения к потребителям, приводит к значительному увеличению количества отдельных трансформаторов. В распределительных сетях номинальная мощность отдельных трансформаторов уменьшается, а их общее количество растет. В следствие этих причин, общая установленная мощность трансформаторов, в несколько раз превышает установленную мощность генераторов электростанций.

Каждый в отдельности трансформатор, является весьма современным преобразователем активной мощности, работает с коэффициентом полезного действия на уровне 98-99%. В процессе своей работы трансформатор потребляет из сети не только активную, но и реактивную мощности, расходуемые на трансформацию напряжения и тока. При необходимости многократной трансформации напряжения и размещения относительно большого количества трансформаторов в электрической сети, общие потери активной и перетоков реактивной энергии достигают существенных значений. Поэтому, требование уменьшения потерь активной и перетоков реактивной энергии в сетях является актуальной проблемой.

Настоящая работа направлена на уменьшение потерь активной и потребления полной намагничивающей мощности в режиме холостого хода трансформатора

Литературный обзор

Силовые трансформаторы изготавливаются согласно определенной технологии, которая подразумевает сборку магнитопровода из тонких шихтованных пластин электротехнической стали [1]. Такая технология сборки позволяет снизить магнитные потери трансформатора. Потери мощности, являются основной экономической характеристикой трансформатора, когда магнитный поток индуцирует электродвижущую силу, создается ток не только в обмотке трансформатора, но и в самом магнитопроводе [2]. При протекании магнитного потока по магнитопроводу трансформатора, образуются вихревые токи. Величина вихревых токов может достигать больших значений, что в свою очередь ведет к нагреву трансформатора и снижению экономической эффективности. Шихтовка магнитопровода трансформатора из тонких пластин электротехнической стали помогает появление вихревых токов, уменьшая магнитные потери [3].

При шихтовке магнитопровода трансформатора, в местах стыков пластин электротехнической стали, остаются небольшие воздушные зазоры, обладающие высоким магнитным сопротивлением. Прохождение магнитных линий через воздушный зазор

затрудняется, т.к. воздух обладает низкой магнитной проницаемостью, в связи с чем, магнитные линии начинают проходить через соседние прилегающие пластины, минуя воздушный зазор, что приводит к появлению вихревых токов. Наличие даже небольшого количества вихревых токов, негативно сказывается на экономической эффективности силового трансформатора [4, 5].

Для решения такой важной проблемы, было предложено заполнять воздушные зазоры специальным материалом, обладающим высокой магнитной проницаемостью. Таким свойством обладает железный ферромагнитный порошок марки Р-10 [6]. Проведенные испытания показали, что данный порошок обладает высокой магнитной проницаемостью при высоких и низких температурах, при которых происходит работа силовых трансформаторов в условиях реальной эксплуатации [7]. Для подтверждения работоспособности решения проблемы - воздушные зазоры в магнитопроводе трансформатора были заполнены ферромагнитным порошком Р-10, с последующим снятием опыта холостого хода трансформатора, которые показали снижение магнитных потерь и подтвердили работоспособность предлагаемого решения [8]. При проведении опыта холостого хода трансформатора, был выявлен значительный недостаток применения ферромагнитного порошка – из-за его мелкодисперсности, от вибрации на холостом ходу трансформатора, большая часть порошка высыпалась из магнитопровода.

Для устранения сыпучести ферромагнитного порошка, была разработана и испытана специальная ферромагнитная паста, за основу которой был взят все тот же порошок марки Р-10, но с добавлением вязкого материала. Проведенные опыты с ферромагнитной пастой показали устранения недостатка сыпучести порошка Р-10. Пасту достаточно просто изготовить, а благодаря высокой вязкости, легко наносить на магнитопровод трансформатора, заполняя все воздушные зазоры. В качестве подтверждения работоспособности ферромагнитной пасты, был проведен опыт по снижению потерь мощности на трехфазном силовом трансформаторе, результат получился крайне положительным – удалось снизить потери на 15% [9].

Опыты, проводимые с ферромагнитной пастой, были выполнены на трансформаторе без системы охлаждения, для работы которого не требуется использование трансформаторного масла. В электросетевых организациях используются маслонеполненные силовые трансформаторы, у которых, в качестве дополнительной изоляции обмоток и их охлаждения, используется трансформаторное масло. На сегодняшний день, масляные трансформаторы встречаются в распределительных электрических сетях, а также в электросетях крупных промышленных комплексов гораздо чаще, чем «сухие» трансформаторы. Масляные трансформаторы отличаются высокой надежностью и стойкостью к перепадам температурных режимов [10].

Технология сборки магнитопровода масляного трансформатора аналогична «сухому» трансформатору, следовательно, в магнитопроводе масляного трансформатора имеются воздушные зазоры в местах стыка пластин электротехнической стали, что в свою очередь приводит к снижению экономических показателей трансформатора.

Проведенные опыты с использованием ферромагнитной пасты на «сухом» трансформаторе показали положительный результат снижения магнитных потерь [11]. Для использования пасты в масляных трансформаторах, предстоит выполнить опыт, определяющий степень взаимодействия трансформаторного масла и пасты. Негативное влияние пасты на масло, может привести к поломке трансформатора [12]. По результату проведенного опыта, можно будет сделать окончательный вывод, стоит ли использовать ферромагнитную пасту с целью заполнения воздушных зазоров в магнитопроводе масляного трансформатора.

Целью исследования является изучение влияния ферромагнитной пасты на изоляционные свойства трансформаторного масла.

Задачи исследования:

1. Подготовить несколько образцов ферромагнитной пасты, в основе которой будут использоваться разные связующие материалы;
2. Подготовить лабораторную установку для проведения испытания трансформаторного масла;
3. Определить степень снижения свойств трансформаторного масла, после добавления ферромагнитной пасты.

Материалы и методы

Трансформаторное масло – масло с низкой вязкостью и высокой чистотой, применяющееся для заливки в силовые трансформаторы. Служит для изоляции

находящихся под напряжением частей и узлов трансформатора, а также отвода тепла от нагревающихся при работе трансформатора частей [13].

Наиболее важное условие использования трансформаторного масла – это его пробивное напряжение. Пробивное напряжение очень чувствительно к наличию примесей в масле. При наличии влаги и примесей, довольно быстро снижается электрическая стабильность трансформаторного масла. Трансформаторное масло, не имеющее в себе влаги и примесей, в независимости от его химического состава, имеет высокое, необходимое для работы оборудования, пробивное напряжение – более 50 кВ [14, 15, 16].

В ходе проведения эксперимента взаимодействия трансформаторного масла с ферромагнитной пастой, планируется отталкиваться на показатель высоковольтного пробоя, как на результат величины взаимодействия пасты с маслом.

В качестве эталонного показателя характеристик трансформаторного масла, использовалось новое масло Лукойл ВГ, ТУ 38.401-58-177-96, произведенное на основе минерального базового масла с применением гидрокаталитических процессов, содержащее антиокислительную присадку. Данное масло применяется в трансформаторах с напряжением до 1150 кВ включительно.

Ферромагнитный порошок – это твердый материал, способный намагничиваться под действием внешнего магнитного поля и частично сохранять приобретенную намагниченность после удаления внешнего поля. Это вещество, в котором магнитные моменты атомов и ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, а результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля. Когда возникает внешнее магнитное поле – магнитные моменты доменов приобретают ориентирование в сторону этого поля и ферромагнитное вещество начинает намагничиваться.

Основой в ферромагнитной пасте использовался мелкодисперсный ферромагнитный порошок марки Р-10 (рис. 1), который обладает высокой магнитной проницаемостью и легко смешивается с различными связующими материалами [17].



Рис. 1. Фотография ферромагнитного порошка марки Р-10 *Fig. 1. Photograph of ferromagnetic powder R-10*

Связующие материалы – требуются для превращения сыпучего ферромагнитного порошка в густую пасту, для исключения высыпания порошка из магнитопровода при вибрации трансформатора во время работы, также, вязкие свойства пасты позволяют легко заполнять все воздушные зазоры в магнитопроводе.

В опытных образцах ферромагнитной пасты было решено сравнить сразу несколько связующих материалов: Циатим-201, Циатим-203, Циатим-211, Графитная смазка, Медная смазка. (рис. 2) Все выбранные материалы обладают высокой вязкостью, благодаря которой, получается достичь густой консистенции ферромагнитной пасты для удобного нанесения ее на магнитопровод.



Рис. 2. Фотографии связующих материалов для ферромагнитного порошка 1 – Графитная смазка; 2 – Циатим-201; 3 – Циатим-211; 4 – Циатим-203; 5 – Медная смазка *Fig. 2. Photographs of ferromagnetic powder binders 1 - Graphite grease; 2 - Tsiatim-201; 3 - Tsiatim-211; 4 - Tsiatim-203; 5 - Copper grease*

Испытательная установка – использовался испытательный аппарат АИМ-90. (рис. 3, рис. 4). Этот аппарат представляет собой генераторное устройство, которое заполняется трансформаторным маслом. Внутри находится трансформатор, от которого высокое напряжение выводится через специальные изоляторы. Они служат опорой для установки измерительной ячейки. Зона аппарата, где устанавливается ячейка, имеет крышку, которая при закрытии замыкает контакты на цепи включения, а при открытии крышки – размыкает эти контакты. Повышение напряжения на электродах ячейки производится регулятором напряжения плавно с помощью электропривода. После достижения пробоя трансформаторного масла, на табло фиксируется величина в мА ($1\text{мА}=10\text{кВ}$), после чего регулятор напряжения возвращается в исходное положение.



Рис. 3. Фотография электроприбора АИМ-90

Fig. 3. Photograph of the electrical appliance AIM-90



Рис. 4. Внутренние части электроприбора АИМ-90: 1 – опорные изоляторы; 2 – измерительная ячейка; 3 – электроды

Fig. 4. Internal parts of electrical appliance AIM-90: 1 - support insulators; 2 - measuring cell; 3 - electrodes

Опытные образцы:

Изготовленные ферромагнитные пасты, в основе которых использовался ферромагнитный порошок марки Р-10, а в качестве связующих материалов использовались:

1. Графитная смазка;
2. Медная смазка;
3. Циатим-201;
4. Циатим-203;
5. Циатим-221.

Для удобства проведения опытов, были использованы стеклянные ёмкости объемом 0.5 литра, на дно которых поместили образцы ферромагнитных паст (рис 5).



Рис. 5. Фотография подготовленных образцов ферромагнитных паст

Fig. 5. Photograph of prepared ferromagnetic paste samples



Рис. 6. Фотография подготовленных образцов трансформаторного масла с ферромагнитной пастой

Ёмкости заполнялись чистым трансформаторным маслом. (рис 6) Далее происходила имитация работы трансформаторного масла – ёмкости нагревались до $+70^{\circ}\text{C}$, после чего охлаждались до $+5^{\circ}\text{C}$. Данная технология позволяла приблизиться к реальным рабочим условиям масла, т.к. во время работы трансформатора, происходит нагрев и охлаждение масла в закономерности от величины нагрузки на трансформатор и погодных условий. В процессе нагрева, слои трансформаторного масла начинают перемешиваться – верхние слои более горячие в то время, как нижние слои более холодные, что приводит к естественной циркуляции масла внутри трансформатора [18,19].

После проведения всех манипуляций, каждый из образцов поочередно переливался в прибор АИМ-90 для замера высоковольтного пробоя. После заполнения измерительной ячейки прибора АИМ-90 образцом трансформаторного масла (рис. 4), производилось 10 последовательных пробоев с интервалами между каждым из них, равным 5 минут. Для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства после каждого пробоя перемешивалось масло между электродами вручную при помощи стеклянной палочки без образования воздушных пузырьков.

Результаты и обсуждение

В качестве эталонного показателя, был выполнен замер высоковольтного пробоя чистого трансформаторного масла, без добавления ферромагнитной пасты. Относительно полученного эталонного значения, производились сравнения с остальными полученными значениями образцов с ферромагнитными пастами. Полученные значения высоковольтных пробоев занесены в таблицу 1. Стоит учесть, что погрешность прибора АИМ-90 крайне незначительна и находится в пределах от 3 до 4%.

Таблица 1

Сравнение полученных результатов пробоя

Наименование образца	Полученное значение высоковольтного пробоя, (кВ)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
Чистое трансформаторное масло	60	68	66	70	72	72	66	68	76	82	70
Циатим-201	30	45	40	30	36	38	30	30	34	28	34,1
Циатим-203	58	50	52	46	44	42	32	30	38	40	43,2
Циатим-221	55	60	58	54	54	56	54	54	58	62	56,5
Медная смазка	46	50	42	54	49	52	41	58	56	46	49,4
Графитная смазка	56	58	60	58	52	56	64	58	58	60	58

Для удобства сравнения полученных результатов, было высчитано среднее значение высоковольтного пробоя каждого образца и занесено в таблицу в столбец «Среднее». Самое высокое среднее значение показало чистое трансформаторное масло – 70 кВ. Остальные образцы показали средний пробой значительно ниже чистого масла. Отсюда следует вывод, что ферромагнитная паста оказывает негативное влияние на трансформаторное масло.

Вторым по результату оказался образец с Графитной смазкой – 58 кВ, после него образец с Циатим-221 – 56,5 кВ. Самое низкое значение пробоя показал образец с Циатим-201. Результаты среднего значения высоковольтных пробоев данных образцов удовлетворяют минимальному значению работоспособности трансформаторного масла [20,21].

Для того, чтобы наглядно можно было увидеть нелинейность значений высоковольтных пробоев всех образцов, был построен общий график, который показан на рисунке 7.

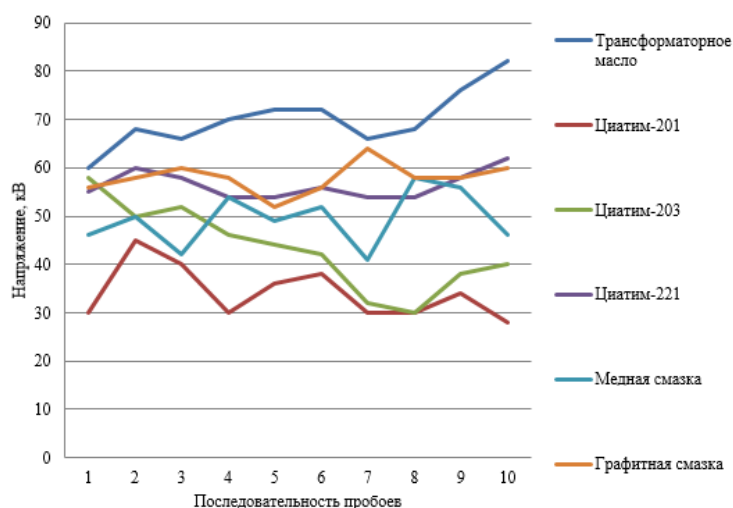


Рис. 7. График полученных значений высоковольтного пробоя всех образцов

Fig. 7. Graph of obtained values of high-voltage breakdown of all samples

На графике хорошо видно, что у некоторых образцов, таких как трансформаторное масло, Циатим-221 и Графитная смазка – результат прямолинейный, относительно других образцов. Высокая амплитуда значений пробоя изоляции у таких образцов, как Циатим-201, Циатим-203 и Медная смазка, объясняется тем, что после добавления ферромагнитной пасты с этими связующими материалами в трансформаторное масло, образуются мелкие токопроводящие частицы с примесями, которые сильно снизили изоляционное свойство масла. Это говорит о том, что такие образцы ферромагнитных паст крайне нерекомендуемые в применение с маслonaполненными трансформаторами.

Для более удобной наглядности того, насколько сильно снизился высоковольтный пробой трансформаторного масла после добавления в него ферромагнитной пасты, на рисунке 8 изображен график всех образцов в порядке уменьшения значения среднего пробоя.

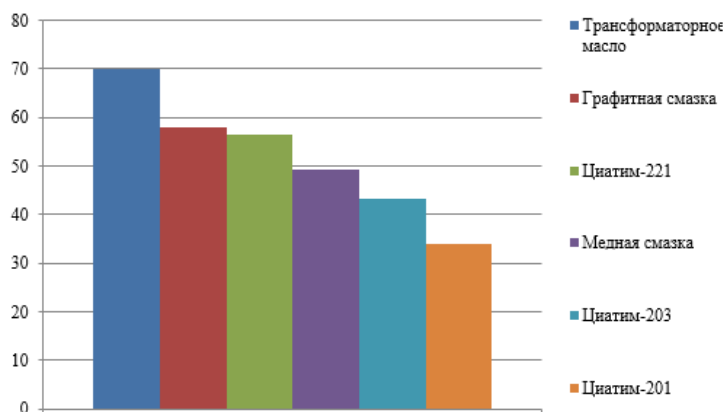


Рис. 8. График сравнения среднего значения высоковольтного пробоя всех образцов

Fig. 8. Graph of comparison of average value of high-voltage breakdown of all samples

Заключение

Из полученных результатов, следует вывод, что для дальнейшего использования ферромагнитной пасты в масляных силовых трансформаторах удовлетворяют образцы паст с такими связующими материалами, как Графитная смазка и Циатим-221. Трансформаторное масло с данными образцами оказывают минимальное воздействие на характеристики трансформаторного масла, что подтверждается величиной значения среднего высоковольтного пробоя равным 58 кВ у образца с Графитной смазкой и 56,5 кВ у образца с Циатим-221 в то время, как минимальное требуемое значение пробоя составляет 50 кВ.

Остальные образцы (Медная смазка, Циатим-201 и Циатим-203) показали неудовлетворительный результат высоковольтного пробоя, среднее значение ниже необходимого.

Трансформаторное масло проходит проверку на пригодность использования одновременно по нескольким показателям. В объем проверки трансформаторного масла,

помимо высоковольтного пробоя изоляции, входит проверка на прозрачность – в масле не должно содержаться механических частиц и примесей, оно должно быть полностью прозрачным [22]. Существует проверка трансформаторного масла на температуру вспышки, когда замеряется температура, при которой происходит вспыхивание смеси паров масла с воздухом при поднесении открытого пламени. Обязательно проводится полный физико-химический анализ масла, благодаря которому можно узнать о количестве содержания в масле влаги, газов и механических частиц [23,24]. После вышеперечисленных проверок составляется заключение о пригодности трансформаторного масла для использования в электрооборудовании.

Литература

1. Богородицкий, Н.П. Электромеханические материалы // Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. 6-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1977. 322 с.
2. Долгопол Т.Л., Черниченко А.В., Галинов Д.С. Анализ способов снижения потерь холостого хода силовых трансформаторов // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции: электронный сборник, Кемерово, 19–21 декабря 2018 года / Под редакцией В.Г. Каширских, И.А. Лобур. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2018.
3. Бирюлин В.И., Чернышев А.С., Зуб О.С. Прогнозирование потерь электроэнергии на подстанциях // Электрика. 2013. № 5. С. 02-03.
4. Ваганов М.А. Трансформаторы. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 112 с.
5. Богородицкий, Н.П. Электромеханические материалы // Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. 6-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1977. 322 с.
6. Брагин И.Ю., Пантелеева Л.А., Покоев П.Н., Брагин И.Ю. Влияние ферромагнитной пасты на характеристики трансформатора // Технологические тренды устойчивого функционирования и развития АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной году науки и технологии в России. 24–26 февраля 2021 года, г. Ижевск. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2021. С. 90 - 94.
7. Захаров М.А., Брагин, И.Ю. Покоев П.Н и др. Испытание магнитных свойств ферромагнитной пасты при разных температурах // Инновационный потенциал сельскохозяйственной науки XXI века: вклад молодых ученых-исследователей: материалы Всерос. науч.-практ. конф. 24-27 октября 2017 года, г. Ижевск. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2017. С. 198-200.
8. Покоев, П. Н. Испытание удельного сопротивления ферромагнитной пасты / П. Н. Покоев // Инновационные технологии для реализации программы научно-технического развития сельского хозяйства: материалы Международной научно-практической конференции. 13–16 февраля 2018 года, г. Ижевск. В 3 Т. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2018. Т. 3. С. 85 - 88.
9. Брагин И.Ю., Лекомцев П.Л., Пантелеева Л.А и др. Разработка и исследование ферромагнитной пасты повышенной вязкости // Нижегородский государственный инженерно-экономический университет Вестник НГИЭИ. 2020. №6 (109). С. 36-48.
10. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / М.: НЦ ЭНАС, 2002. 216 с.
11. Патент на полезную модель №143671 RU МПК H01F 27/245 / Магнитопровод, собранный из пластин электротехнической стали, места стыков которых перекрыты материалом с высокой магнитной проницаемостью / заявка №2013130526. Зарегистрировано 26.06.2014. Опубликовано 27.07.2014 Бюл. №21.
12. Валиуллина Д.М., Загустина И.Д., Козлов В.К. Определение качественного состава примесей в отработанном трансформаторном масле // Казань: Вестник КГЭУ. 2018. Т.10 №4 (40). С. 25-32.
13. Вагапов Т.Р., Волкова Т.Р. Трансформаторное масло как диагностическая среда силовых трансформаторов // Электротехнические комплексы и системы: матер. междунар. науч.-практ. конф. 2016 С. 39-42.
14. Виды испытаний трансформаторного масла [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://leg.co.ua/info/transformatory/> (дата обращения: 20.11.2021).
15. Karthik R., Sree Renga Raja T. Investigations of transformer oil characteristics // IEEJ Trans Elec Electron Eng. 2012. V. 7. P. 369-374.
16. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. Iss. 1. P. 346-355.
17. Брагин, И.Ю. Сравнение ферромагнитных свойств различных материалов / И.Ю. Брагин, Л.А. Пантелеева, и др. // Вестник Ижевской ГСХА. 2021. №2 (66). С. 37-42.

18. Быстрицкий Г.Ф., Кудрин Б.И. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов. М.: Издательский центр «Академия», 2003.
19. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник для студентов высших учебных заведений. 2-е изд. Перераб. и доп. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
20. Vezir Rexhepi. An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring. Energy Procedia. V. 141. December 2017. Pp. 418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
21. Mangara BT. On some methods of reliability improvement of engineering systems. Bloemfontein, Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
22. Копылов, И.П. Электрические машины: 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 2002. 607 с.
23. Лещинская, Т.Б., Наумов, И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: Колосс, 2008. 665 с.
24. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов: 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. - 528 с.

Авторы публикации

Брагин Иван Юрьевич – аспирант, Ижевской государственной сельскохозяйственной академии.

Пантелеева Лариса Анатольевна – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения (ЭЭиЭ), Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Покоев Пётр Николаевич – старший преподаватель кафедры электротехники, электрооборудования и электроснабжения (ЭЭиЭ), Ижевская государственная сельскохозяйственная академия.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Bogoroditsky NP, Pasyukov VV., Tareev BM. *Electromechanical materials*. 6th ed., reprint. L.: Energiya, 1977. 322 p.
2. Dolgopol TL, Chernichenko AV, Galinov DS. *Analysis of ways to reduce idling losses of power transformers*. Power engineering and energy saving: theory and practice: Collection of materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference: electronic collection, Kemerovo, December 19-21, 2018 / Edited by V.G. Kashirskikh, I.A. Lobur. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2018.
3. Biryulin V.I., Chernyshev A.S., Zub O.S. Forecasting of electricity losses at substations. *Electrica*. 2013;5:02-03.
4. Vaganov M.A. Transformers: textbook. stipend. St. Petersburg: Publishing house of SPbSETU «LETI», 2014. 112 p
5. Bogoroditsky NP, Pasyukov VV, Tareev BM. *Electromechanical materials*. 6th ed., reprint. L.: Energy, 1977. 322 p.
6. Yu. Bragin, Panteleeva LA, Pokoev PN, Bragin IYu. *Influence of ferromagnetic paste on transformer characteristics*. Technological trends of sustainable functioning and development of agroindustrial complex: Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the Year of Science and technology in Russia. February 24-26, 2021, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2021. pp. 90-94.
7. Zakharov MA, Bragin IYu, Pokoev PN, et al. *Testing of magnetic properties of ferromagnetic paste at different temperatures. Innovative potential of agricultural science of the XXI century: contribution of young scientists and researchers: materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. October 24-27, 2017, Izhevsk. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2017. pp. 198-200.
8. Pokoev PN. *Testing the resistivity of ferromagnetic paste*. Innovative technologies for the implementation of the program of scientific and technical development of agriculture: materials of the International scientific and practical Conference. February 13-16, 2018, Izhevsk. In 3 Vols. Izhevsk: Izhevsk State Agricultural Academy, 2018;3:85-88.

9. Bragin IYu, Lekomtsev PL, Panteleeva LA, et al. Development and research of ferromagnetic paste of increased viscosity. *Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics Bulletin of NGIEI*. 2020;6 (109):36-48.
10. Alekseev BA. Condition control (diagnostics) of large power transformers. M.: NC ENAS, 2002. 216 p.
11. Noskov VA. Utility model patent No. 143671 RU IPC H01F 27/245 / Magnetic circuit assembled from plates of electrical steel, the joints of which are covered with a material with high magnetic permeability / application no. 2013130526. Registered on 26.06.2014. Published on 27.07.2014 Byul. No. 21.
12. Valiullina D.M., Zagustina I.D., Kozlov V.K. Determination of the qualitative composition of impurities in spent transformer oil. *Kazan: Bulletin of the KSPEU*. 2018;10:4 (40). :25-32.
13. Vagapov T.R., Volkova T.R. *Transformer oil as a diagnostic medium of power transformers*. Electrotechnical complexes and systems: mater. international Scientific and Practical conference 2016 pp. 39-42.
14. Types of transformer oil tests [Electronic resource]. Access mode: <https://leg.co.ua/info/transformatory/> (accessed: 20.11.2021).
15. Karthik R., Sree Renga Raja T. *Investigations of transformer oil characteristics*. IEEJ Trans Elec Electron Eng. 2012;7:369-374.
16. Okabe S., Ueta G., Tsuboi T. *Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013;20(1):346-355.
17. Bragin, I.Yu. Comparison of ferromagnetic properties of various materials / I.Yu. Bragin, L.A. Panteleeva, [et al.]. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;2 (66):37-42.
18. Bystritsky G.F., Kudrin B.I. *Selection and operation of power transformers*. Moscow: Publishing Center «Academy», 2003.
19. Voldek, A.I. *Electric machines: textbook for students of higher educational institutions*. 2nd ed. Pererab. and additional. L.: Energiya, 1974. 840 p.
20. Vezir Rexhepi. *An Analysis of Power Transformer Outages and Reliability Monitoring*. Energy Procedia. 141. December 2017;141:418-422. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.053>.
21. Mangara BT. *On some methods of reliability improvement of engineering systems*. Bloemfontein, Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
22. Kopylov I.P. *Electric machines: textbook for universities*. 3rd ed., ispr. M.: Higher School, 2002. 607 p.
23. Leshchinskaya, T.B., Naumov, I.V. *Power supply of agriculture*. M.: KolosS, 2008. 665 p.
24. Tikhomirov, P.M. *Calculation of transformers: textbook*. Manual for universities. 5th ed., reprint. and additional. M.: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

Authors of the publication

Ivan Yu. Bragin – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Larisa A. Panteleeva – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Peter. N. Pokoev – Izhevsk State Agricultural Academy, Izhevsk, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

12.09.2022г.

Отредактировано

27.09.2022г.

Принято

27.09.2022г.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ И ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СРЕДНЕ-КАМЧАТСКОМ ИЗОЛИРОВАННОМ ЭНЕРГОУЗЛЕ

Белов О.А.¹, Федоров О.В.²

¹Камчатский государственный технический университет,
г. Петропавловск-Камчатский, Россия

boa-1@mail.ru

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
г. Нижний Новгород, Россия

fov52@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Рассмотреть особенности расположения и общую структуру Средне-Камчатского изолированного энергоузла. Определить состав и характеристики электросетевого хозяйства Средне-Камчатского изолированного энергоузла. Рассмотреть структуру установленной электрической мощности и состав генерирующего оборудования электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла. Выполнить анализ и определить основные показатели динамики потребления электроэнергии и мощности в Средне-Камчатском изолированном энергоузле. Выполнить анализ существующего баланса мощности и электрической энергии, определить основные технико-экономические параметры электроснабжения Средне-Камчатского изолированного энергоузла. Рассмотреть варианты развития системы электроснабжения Средне-Камчатского энергоузла, в том числе на основе ВИЭ. МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись методы математической обработки статистических данных и методы нормативного прогнозирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены вопросы по развитию сетевой инфраструктуры и генерирующих мощностей, обеспечению долгосрочного и среднесрочного спроса на электрическую энергию и мощность, формирования стабильных и благоприятных условий для привлечения инвестиций в строительство объектов электроэнергетики Средне-Камчатского изолированного энергоузла. На основе анализа энергетической структуры изолированного энергоузла и динамики электропотребления, рассчитаны действующий и перспективный балансы электроэнергии и мощности в Средне-Камчатском изолированном энергоузле. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Обеспечение надежного и эффективного электроснабжения удаленных энергетически изолированных территорий, является актуальной задачей, так как любой сбой в изолированной системе приводит к возникновению опасных кризисных явлений и существенным экономическим потерям. Представленная комплексная оценка состояния электроэнергетики в изолированном Средне-Камчатском энергоузле позволяет спрогнозировать перспективы ее развития в рамках общего развития электроэнергетического комплекса Камчатского края.

Ключевые слова: электроэнергия; система электроснабжения; энергоузел; генерирующие мощности; энерготариф; электрический баланс; гидроэнергетика.

Для цитирования: Белов О.А., Федоров О.В. Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 120-135. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135.

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF GENERATING CAPACITY AND DYNAMICS OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN SREDNE-KAMCHATSKY ISOLATED POWER HUB

OA Belov¹, OV Fedorov²

¹Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

boa-1@mail.ru

²Nizhny Novgorod State Technical University by R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

fov52@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To examine the features of the location and the overall structure of the Sredne-Kamchatsky isolated power hub. To consider the structure of installed electric capacity and the composition of generating equipment of power plants in the mentioned power hub. To determine the composition and characteristics of the electric grid economy. To analyze and determine the main indicators of electricity consumption and capacity dynamics of the hub. To perform an analysis of the existing balance of power and electric energy, to determine the main technical and economic parameters of the power supply. To consider options for the power supply system development including on the basis of renewable energy sources. *METHODS.* When solving this problem, we used methods of mathematical processing of statistical data and methods of normative forecasting. *RESULTS.* We considered the special features of generating capacities and network infrastructure development, the issues ensuring the long-term and medium-term demand for electric energy and capacity, the formation of stable and favorable conditions for attracting investment in the construction of electric power facilities. The study calculated the current and prospective balances of electricity and capacity in the discussed power hub based on the analysis of the energy structure of an isolated power unit and the dynamics of electricity consumption. *CONCLUSION.* Any failure in an isolated system leads to dangerous crisis phenomena and significant economic losses. Thus it is important to provide reliable and efficient power supply to energy isolated territories. The presented comprehensive assessment of the state of the electric power industry in the isolated Sredne-Kamchatsky power plant allows us to predict the prospects for its development within the framework of the overall development of the electric power complex of the Kamchatka Territory.

Keywords: electric power; power supply system; power hub; generating capacities; energy tariff; electric balance; hydropower.

For citation: Belov OA, Fedorov OV. Analysis of the structure of generating capacity and dynamics of electricity consumption in Sredne-Kamchatsky isolated power hub. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(5):120-135. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135.

Введение

На территории Российской Федерации существует большое количество изолированных энергоузлов, не подключенных к Единой национальной электрической сети (ЕНЭС). Введение их в структуру ЕНЭС является технически не рациональным и экономически необоснованным из-за удаленности таких объектов и низкого уровня развития их энергетической инфраструктуры.

Таким энергопроблемным регионом является Камчатский край, который находится на восточной границе России и территориально входит в состав Дальневосточного федерального округа (ДФО). Население региона составляет 313 тыс. человек. Порядка 78 % населения Камчатского края проживает в городах, 22 % населения находится в сельской местности. В состав края включены 14 муниципальных образований, в том числе 3 городских округа, 1 муниципальный округ и 10 муниципальных районов, в состав которых включены городские и сельские поселения.

Энергосистема Камчатского края работает изолированно и в ее состав входят Центральный энергоузел и 13 изолированно работающих энергоузлов. Основными компаниями, осуществляющими энергоснабжение изолированных энергоузлов Камчатского края, являются АО «Южные электрические сети Камчатки» (АО «ЮЭСК»), АО «Корякэнерго» и ПАО «Камчатскэнерго» [1,2]. Повышение надежности, безопасности и эффективности системы электроснабжения изолированных энергоузлов Камчатского края, а также снижение уровня экономически обоснованного тарифа на электроэнергию является важной и актуальной задачей. Экономически обоснованный тариф на электроэнергию на 01.01.2022 г. по АО «Корякэнерго» составил 31,94

руб./кВтч, а по АО «ЮЭСК» достиг 42,09 руб./кВтч. Решение этой задачи предлагается рассмотреть на примере Средне-Камчатского изолированного энергоузла.

Средне-Камчатский изолированный энергоузел расположен в центральной части полуострова и обеспечивает электроснабжение потребителей Мильковского и Быстринского муниципальных районов. Территориальные границы Средне-Камчатского изолированного энергоузла представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Схема территориального расположения Средне-Камчатского изолированного энергоузла: 1 – Мильковский муниципальный район; 2 – Быстринский муниципальный район

Fig. 1. The scheme of the territorial location of Sredne-Kamchatsky isolated power hub: 1 - Milkovsky municipal district; 2 - Bystrinsky municipal district

Наиболее крупный административный центр Мильковского муниципального района село Мильково с населением 7000 человек непосредственно в состав Средне-Камчатского изолированного энергоузла не входит и обеспечивается электроэнергией за счет Центрального энергоузла посредством ЛЭП 110 кВ. Перечень и краткая характеристика населенных пунктов Мильковского и Быстринского муниципальных образований Камчатского края, входящих в состав Средне-Камчатского изолированного энергоузла, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Общий состав Средне-Камчатского изолированного энергоузла

Муниципальное образование	Поселение	Населенный пункт	Энергоисточник	Население, чел.	Расстояние до централизованных сетей, км
Мильковский муниципальный район	Атласовское сельское поселение	п. Атласово	ДЭС-14,	605	441
		с. Лазо			
		п. Таёжный	ДЭС-6	118	407
	Мильковское сельское поселение	с. Долиновка	ДЭС-19	252	367
Быстринский муниципальный район	Эссовское сельское поселение	с. Эссо	Быстринская МГЭС-4,	1917	522
		с. Анавгай			

Повышение эффективности объектов генерации в зонах децентрализованного электроснабжения несомненно является актуальной задачей, что подтверждается большим количеством исследований по данной теме. Так возможность и перспективы использования нетрадиционных возобновляемых источников электроэнергии рассмотрены в работах Безруких П.П., Тягунова М.Г., Антонова Н.В., Вагина Г.Я. и других авторов. Обоснования о необходимости развития региональной гидроэнергетики представлены в публикациях Семчева В.А. Вопросам повышения надежности и эффективности отдельных элементов системы электроснабжения посвящены научные исследования Грачевой Е.И., Ившина И.В., Галяутдиновой А.Р. В своих публикациях большинство авторов подчеркивает, что для оптимизации системы электроснабжения конкретного изолированного энергоузла необходимо найти оптимальный баланс между генерацией и потреблением электрической энергии.

Вместе с тем неоднородность структуры генерации и потребления электрической энергии в зонах децентрализованного электроснабжения не позволяет использовать какой-либо универсальный подход в решении задач оптимизации. Требуется учитывать множество дополнительных факторов, связанных с конкретным изолированным энергоузлом.

В этой связи, исследование структуры генерации Средне-Камчатского изолированного энергоузла в совокупности с анализом существующего электропотребления, а также разработка прогноза электропотребления на перспективу, имеет высокую научную и практическую значимость.

Материалы и методы

Анализ функционирования системы электроснабжения Средне-Камчатского изолированного энергоузла проводился на основе математической обработки статистических данных с использованием методов нормативного прогнозирования. Рассматривалась общая структура системы генерации в энергоузле и анализировалась динамика потребления электроэнергии и мощности за прошедший пятилетний период.

Структура генерирующей мощности.

Средне-Камчатский энергоузел сформирован на базе Быстринской мГЭС-4. В зону влияния энергоузла входят населённые пункты с. Эссо, с. Анавгай, с. Атласово и с. Лазо. Быстринская мГЭС-4 обеспечивает электроснабжение сёл по ВЛ 35 кВ мГЭС-4 – Атласово и ВЛ 35 кВ мГЭС-4 – Анавгай, ВЛ 35 кВ Эссо – Анавгай.

В энергоузле имеется резервный энергоисточник – ДЭС-14 установленной мощностью 3,68 МВт, находящийся в с. Атласово, который обеспечивает электроснабжение сёл в зимний период при нехватке воды на мГЭС-4 и в послеаварийных режимах отключения ВЛ 35 кВ.

Электрические сети 35 кВ получили развитие в 9 из 13 изолированных энергоузлах Камчатского края. Основные характеристики электросетевого хозяйства 35 кВ Средне-Камчатского изолированного энергоузла представлены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика воздушных линий и подстанций 35 кВ

Наименование объекта	Год ввода	Длина ВЛ 35 кВ, км	Мощность ПС 35 кВ, шт. х МВА
ВЛ 35 кВ Атласово – Быстринская мГЭС-4	2001	64,35	-
ВЛ 35 кВ Быстринская мГЭС-4 – Анавгай – Эссо	1978	39,55	-
ПС 35 кВ Атласово	1993 1996	-	1х1; 1х1,6
ПС 35 кВ Анавгай	1978 1987	-	1х0,4 1х0,4
ПС 35 кВ Эссо	1987	-	2х1,6
Быстринская мГЭС-4	1987	-	1х1,6
ДЭС-14 (Атласово)	1982	-	1х1
Всего		103,9	8х7,6

В состав Средне-Камчатского энергоузла входит также изолированный Долиновский энергоузел, который удалён от Средне-Камчатского энергоузла (с. Лазо) на расстояние 75 км и от ближайших электроэнергетических объектов Центрального

энергоузла (от ПС 110 кВ Мильково) – на расстояние 65 км. Питание потребителей Долиновского изолированного энергоузла осуществляется от ДЭС-19 установленной мощностью 0,715 МВт.

Анализ технического состояния электросетевых объектов напряжением 35 кВ показывает, что 15% от общей трансформаторной мощности 35 кВ отработало более 40 лет. Воздушные линии электропередачи 35 кВ, выполненные на деревянных опорах, протяженностью 16,6 км в одноцепном исчислении (15,9 % от общей протяженности ЛЭП 35 кВ) отработали более 40 лет [3,4].

В связи с этим, требуется реконструкция электросетевых объектов 35 кВ, срок эксплуатации которых превышает нормируемый. Первоочередными сетевыми объектами требующими модернизации являются ПС 35 кВ Анавгай с заменой силовых трансформаторов 2х1 МВА на новые и ВЛ 35 кВ мГЭС-4 – Анавгай общей протяженностью 16,6 км.

Данные за 2021 г. по установленной мощности и годовой выработки электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла по типам генерирующего оборудования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Установленные мощности (на 01.01.2022 г.) и годовые выработки (за 2021 г.) электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла

Населенный пункт	Наименование ген.источника	Установленная мощность, МВт	Доля, %	Годовая выработка, млн.кВт.ч	Доля, %
Суммарно по изолированным энергоузлам Камчатского края		106,79	100,0	220,647	100,0
с. Долиновка	ДЭС-19	0,72	0,7	0,924	0,4
п. Таёжный	ДЭС-6	0,21	0,2	0,261	0,1
п. Атласово	ДЭС-14	3,68	3,5	3,488	1,6
с. Эссо	Быстринская мГЭС-4	1,71	1,6	5,805	2,6
Суммарно по Средне-Камчатскому энергоузлу		6,31	6,0	10,480	4,8

Основное электрооборудование электростанций в изолированном энергоузле имеет существенные различия как по типовому составу, так и по фактическому сроку службы. Состав основного генерирующего оборудования электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла компаний АО «ЮЭСК», АО «Корякэнерго», ПАО «Камчатскэнерго» (Филиал «Возобновляемая энергетика») приведен в таблице 4.

Таблица 4

Состав генерирующего оборудования электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла

Наименование электростанции	Место расположения объекта	Номер агрегата	Тип оборудования	Год ввода	Вид топлива	Установленная мощность на 01.01.2022 года, МВт	Фактический срок службы, лет
ДЭС-14	п. Атласово, Мильковский район, Камчатский край	1	ДГ-72	1985	д/т	3,68	37
		2	ДГ-72	1982	д/т		40
		3	ДГ-72	1982	д/т		40
		M1	Caterpillar 3512	2013	д/т		9
ДЭС-19	с. Долиновка, Мильковский район, Камчатский край	1	Cumminc C200D5	2018	д/т	0,715	4
		2	Perkins GEP165	2014	д/т		8
		3	Perkins GEP165	2011	д/т		11
		4	ДГА-315	1990	д/т		32

Быстринская МГЭС-4	с. Эссо, Быстринский район, Камчатский край	1	Турбина ПР 510-ВБ- 120 Генератор СВ 173/31-20 УХЛ4	1996	вода	1,71	26
		2	Турбина ПР 510-ВБ- 120 Генератор СВ 173/31-20 УХЛ4	1997	вода		25
		3	Турбина ПР 510-ВБ- 120 Генератор СВ 173/31-20 УХЛ4	1998	вода		24
ДЭС-6	п. Таёжный Милюковский район, Камчатский край	1	DA-C100	2019	д/т	0,080	7
		2	BF-C65	2014	д/т	0,048	8
		3	DA-C100	2016	д/т	0,080	6

Анализ технического состояния генерирующего оборудования показывает, что из 6,31 МВт установленной мощности, 28,5% обеспечивается оборудованием с фактическим сроком службы более 30 лет. Дизельная электростанция в п. Атласово ДЭС-14 (АО «ЮЭСК») имеет фактический расход топлива 406 г.у.т/кВт.ч, что существенно превышает нормативные показатели расхода топлива относительно установленных общепромышленных показателей [5,6].

В связи с этим, требуется масштабная модернизация этих установок, либо замена их на новое современное оборудование и строительство объектов генерации на возобновляемых источниках энергии с развитием сетевой инфраструктуры для подключения потребителей.

Оценка эксплуатационной эффективности электроснабжения показала, что процент потребления электроэнергии на собственные нужды электростанций и технологические потери электроэнергии в сетях Средне-Камчатского изолированного энергоузла находятся в допустимых пределах.

Анализ динамики потребления электроэнергии и мощности.

Суммарные показатели электропотребления и средние показатели максимального потребления мощности в Средне-Камчатском энергоузле за пятилетний период представлены в таблице 5.

Таблица 5

Показатели электропотребления в Средне-Камчатском
изолированном энергоузле за пятилетний период

Наименование	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Электропотребление, млн кВтч	9,74	9,85	10,17	10,28	10,50
Абсолютный прирост электропотребления, млн кВтч	0,21	0,11	0,32	0,11	0,22
Годовой прирост электропотребления, %	2,20	1,10	3,25	1,11	2,14
Максимальное потребление мощности, МВт	2,20	2,30	2,19	2,23	2,20
Абсолютный прирост максимального потребления мощности, МВт	0,03	0,10	-0,12	0,05	-0,03
Годовой прирост максимального потребления мощности, %	1,24	4,52	-5,08	2,15	-1,35

За рассматриваемый пятилетний период с 2017 по 2021 год в Средне-Камчатском энергоузле наблюдается незначительный рост электропотребления, величина которого на 01.01.2022 г. составила 10,50 млн кВтч, что на 0,76 млн кВтч выше аналогичного показателя 2017 г.

В 2021 г. максимальное потребление мощности Средне-Камчатского энергоузла было зафиксировано на уровне 2,20 МВт, что аналогично максимальному потреблению мощности в 2017 г.

Динамика потребления электрической энергии и мощности в Средне-Камчатском энергоузле за пятилетний период наглядно представлена на диаграмме (рисунок 2).

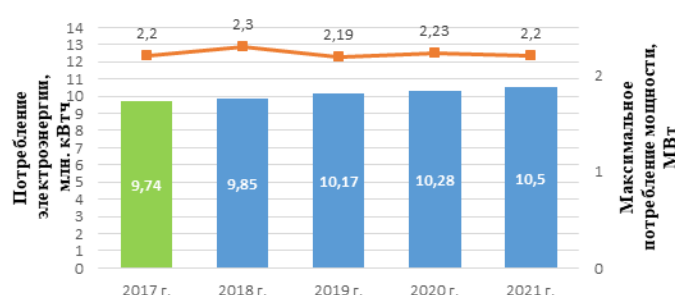


Рис.2. Динамика потребления электрической энергии и мощности

Fig. 2. Dynamics of electrical energy consumption and power

Основной причиной низкой динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле является высокий экономически обоснованный тариф на электроснабжение. Электроснабжение в энергоузле осуществляется в основном за счёт ДЭС, работающих на дорогостоящем привозном дизельном топливе. Высокая стоимость обслуживания электроэнергетических объектов обусловлена такими факторами, как сложные климатические условия (циклоны, ветровые нагрузки, гололёдообразование), географическая удаленность населенных пунктов, отсутствие развитой транспортной инфраструктуры [7,8].

Анализ баланса мощности и электрической энергии показал, что генерирующие источники Средне-Камчатского изолированного энергоузла полностью обеспечивали потребность в мощности и электроэнергии в 2021 г.

Фактический баланс мощности и электрической энергии Средне-Камчатского изолированного энергоузла за 2021 г. представлен ниже в таблице 6.

Таблица 6

Фактический баланс мощности и электрической энергии за 2021 г.

Населенный пункт	Наименование ген. источника	Максимум потребления мощности, МВт	Установленная мощность, МВт	Дефицит (-)/ Избыток (+), МВт	Годовая выработка (электропотребление), млн. кВтч	ЧЧИ собственного максимума нагрузки
с. Долиновка	ДЭС-19	0,21	0,72	+0,50	0,92	680
п. Таёжный	ДЭС-6	0,05	0,21	+0,16	0,26	1510
п. Атласово	ДЭС-14	3,19	3,68	+2,20	3,49	350
с. Эссо	Быстринская МГЭС-4		1,71		5,81	450
Суммарно по Средне-Камчатскому энергоузлу		3,45	6,32	+2,86	10,48	2990

За анализируемый период баланс мощности Средне-Камчатского изолированного энергоузла складывался избыточно по установленной мощности. При этом величина фактического резерва установленной мощности источников генерации по электростанциям находилась в диапазоне от 40% до 76%. В целом по Средне-Камчатскому изолированному энергоузлу величина фактического резерва установленной мощности источников генерации составила более 45%.

Результаты и обсуждение

На основании проведенного анализа динамики потребления электроэнергии и мощности за прошедший пятилетний период в Средне-Камчатском изолированном энергоузле разработан прогноз потребления электроэнергии и мощности.

Прогноз потребления электрической энергии и мощности в Средне-Камчатском изолированном энергоузле на пятилетний период сформирован с учетом прогноза полезного отпуска электроэнергии потребителям населенных пунктов в соответствии с информацией, предоставленной АО «ЮЭСК», АО «Корякэнерго», ПАО «Камчатскэнерго», а также с учетом изменения потребления электрической энергии и мощности в соответствии с утвержденными техническими условиями на технологическое присоединение.

Прогноз динамики электропотребления в Средне-Камчатском энергоузле на перспективу 2022-2026 гг. представлен в таблице 7.

Таблица 7

Прогноз электропотребления и максимального потребления мощности Средне-Камчатского энергоузла на перспективу 2022-2026 гг.

Наименование	2021 (отчёт)	2022	2023	2024	2025	2026
Электропотребление, млн кВтч	10,30	10,36	10,46	10,55	10,56	10,57
Абсолютный прирост электропотребления, млн кВтч	0,02	0,00	0,16	0,09	0,01	0,01
Годовой прирост электропотребления, %	0,17	0,00	1,55	0,86	0,09	0,09
Максимальное потребление мощности, МВт	2,10	2,21	2,31	2,44	2,58	2,71
Абсолютный прирост максимального потребления мощности, МВт	-0,13	0,11	0,10	0,13	0,14	0,13
Годовой прирост максимального потребления мощности, %	-5,83	5,24	4,52	5,63	5,74	5,04

В рассматриваемой перспективе значительного роста нагрузки в Средне-Камчатском изолированном энергоузле не ожидается. Прогнозируемая динамика основывается, в основном, на развитии в данном районе туристических объектов и хозяйственной деятельности.

Прогнозируемая динамика потребления электрической энергии и мощности в Средне-Камчатском изолированном энергоузле на пятилетнюю перспективу представлена в виде диаграммы на рисунке 3



Рис.3. Прогнозируемая динамика годового электропотребления и максимального потребления мощности на перспективу 2022-2026 гг.

Fig.3. Forecasted dynamics of annual power consumption and maximum power consumption for 2022-2026

Величина годового электропотребления в 2026 г. прогнозируется на уровне 10,57 млн кВтч, что на 0,27 млн кВтч (+2,55 %) выше электропотребления 2021 г. Величина максимального потребления мощности в 2026 г. в соответствии с прогнозом составит 2,71 МВт, что на 0,61 МВт (+ 22,51 %) выше аналогичного показателя 2021 г.

Таким образом, в рассматриваемом перспективном периоде значительного роста потребления электрической энергии и мощности в энергоузле не прогнозируется.

На основе представленных прогнозов потребления электроэнергии и мощности, а также с учетом состава генерирующих источников в энергоузле сформированы перспективные балансы мощности и электроэнергии на период 2022-2026 гг. Балансы мощности и электрической энергии по электростанциям Средне-Камчатского изолированного энергоузла на пятилетний период представлены ниже в таблицах 8 и 9.

Таблица 8

Прогнозируемый баланс мощности на период 2022-2026 гг.

Населенный пункт	Наименование ген.источника	Наименование показателя	Единица измерения	2021 г. (отчет)	2022	2023	2024	2025	2026
с.Долиновка	ДЭС-19	Рмакс	МВт	0,21	0,22	0,23	0,24	0,26	0,27
		Руст	МВт	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
		Дефицит/избыток	МВт	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45
		%	239	223	207	193	179	166	
п. Таёжный	ДЭС-6	Рмакс	МВт	0,04	0,05	0,04	0,06	0,07	0,08
		Руст	МВт	0,21	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
		Дефицит/избыток	МВт	0,17	0,19	0,2	0,18	0,17	0,16
		%	425	380	500	300	243	200	
п. Атласово	ДЭС-14	Руст	МВт	3,68	3,68	3,68	3,68	3,68	3,68
с. Эссо	Быстринская МГЭС-4	Руст	МВт	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71
	ДЭС-2	Руст	МВт	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		Рмакс	МВт	1,85	1,94	2,04	2,14	2,25	2,36
		Дефицит/избыток	МВт	3,54	4,39	4,15	4,15	4,15	4,15
		%	191	229	213	199	184	171	
Суммарный баланс мощности Средне-Камчатский энергоузел		Рмакс	МВт	2,1	2,21	2,31	2,44	2,58	2,71
		Руст	МВт	6,32	7,35	7,35	7,35	7,35	7,35
		Дефицит/избыток	МВт	4,21	5,07	4,83	4,8	4,78	4,76
		%	200	229	209	197	185	176	

Таблица 9

Прогнозируемый баланс электрической энергии на период 2022-2026 гг.

Прогнозируемый баланс электрической энергии на период 2022-2026 гг.									
Населенный пункт	Наименование ген.источника	Наименование показателя	Единица измерения	2021 г. (отчет)	2022	2023	2024	2025	2026
с.Долиновка	ДЭС-19	Выработка	млн. кВтч	0,92	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
		ЧЧИ	час	1292	1255	1255	1255	1255	1255
п. Таёжный	ДЭС-6	Выработка	млн. кВтч	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24
		ЧЧИ	час	989	896	934	973	1 011	1 011
п. Атласово	ДЭС-14	Выработка	млн. кВтч	3,49	3,96	3,96	3,96	3,96	3,96
		ЧЧИ	час	948	1076	1076	1076	1076	1076
с. Эссо	Быстринская МГЭС-4	Выработка	млн. кВтч	5,81	5,60	5,60	5,60	5,60	5,60
		ЧЧИ	час	3395	3274	3274	3274	3274	3274
	ДЭС-2	Выработка	млн. кВтч	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ЧЧИ	час	0	0	0	0	0	0
Суммарный баланс электроэнергетики Средне-Камчатский энергоузел		Выработка	млн. кВтч	10,43	10,67	10,68	10,69	10,7	10,7

Анализ прогнозируемых балансов мощности электростанций Средне-Камчатского изолированного энергоузла показал, что по всем генерирующим объектам, баланс мощности складывается с избытком установленной мощности на всем рассматриваемом перспективном периоде.

Балансы электроэнергии всех источников анализируемого энергоузла складываются удовлетворительно. Числа часов использования (ЧЧИ) установленной мощности электрических станций энергоузла находятся в допустимых пределах.

Варианты развития.

Особенностью и основной проблемой функционирования Средне-Камчатского изолированного энергоузла является использование дорогостоящего привозного дизельного топлива и высокая стоимость обслуживания электроэнергетических объектов, вследствие чего энергетический узел имеет высокий экономически обоснованный тариф на электроснабжение. Кроме того, анализ основных показателей работы ДЭС в Средне-Камчатском изолированном энергоузле показал, что ряд электростанций имеют завышенные показатели расхода топлива [9,10].

Оценка экономической эффективности мероприятий по замене высокочатратных ДЭС на новые с доведением удельного расхода на отпуск электроэнергии до оптимальных значений (до 370 г.у.т/кВтч.) показала их нецелесообразность. Так, расчеты ежегодного экономического эффекта по наиболее проблемной ДЭС-14 (п. Атласово) показали, что срок окупаемости капиталовложений на обновление ДЭС составит более 10 лет.

Одним из вариантов повышения эффективности электроснабжения Средне-Камчатского изолированного энергоузла является возможность строительства солнечных электростанций (СЭС). Учитывая данные по параметрам солнечной инсоляции территории энергоузла, наиболее оптимальным является использование дизель-солнечной электростанции на фотоэлектрических модулях [11,12].

В соответствии с рекомендациями рассчитаны параметры мощности, выработки и коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ) СЭС для населенных пунктов Средне-Камчатского изолированного энергоузла и полученные значения приведены в таблице 10.

Таблица 10

Параметры СЭС для населенных пунктов Средне-Камчатского изолированного энергоузла

Населенный пункт	Мощность СЭС, кВт	Выработка СЭС, млн.кВтч	Площадь СЭС (м ²)	КИУМ
п. Атласово	403	0,407	2 298	11,5%
п. Таёжный	91	0,092	517	11,5%
с. Долиновка	1 327	1,342	7 573	11,5%
с. Эссо	3 139	3,172	17 908	11,5%

На основе КИУМ и удельных затрат на 1 кВт установленной мощности СЭС рассчитана себестоимость производства электроэнергии на СЭС. В таблице 11 приведен расчёт экономии стоимости электроэнергии на основе сравнения с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии.

Таблица 11

Оценка экономической эффективности использования СЭС в Средне-Камчатском изолированном энергоузле

Населенный пункт	Мощность СЭС, кВт	Выработка СЭС, млн.кВтч	Капиталовложения, тыс.руб.	Себестоимость производства э/э на СЭС, руб./кВтч	Топливная составляющая себестоимости э/э, руб./кВтч	Удельная экономия стоимости э/э за счёт ввода СЭС, руб./кВтч
п. Атласово	403	0,407	40 709	14,2	15,7	1,5
п. Таёжный	91	0,092	9 154	14,2	23,4	9,2
с. Долиновка	1 327	1,342	134 178	14,2	13,9	-0,3
с. Эссо	3 139	3,172	317 293	14,2	0,0	-14,2

Расчеты, по укрупненной оценке экономической эффективности применения СЭС в Средне-Камчатском изолированном энергоузле на основе данных о себестоимости производства электроэнергии на СЭС и ее сравнения с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии показали, что на территории рассматриваемого изолированного энергоузла строительство СЭС экономически целесообразно в п. Таёжный.

Потенциальная экономия ежегодных затрат на электроснабжение в этом случае составит порядка 845,9 тыс. рублей и прогнозируется снижение экономически обоснованного тарифа на электроэнергию за счет ввода СЭС на 9,2 руб./кВтч.

С целью повышения эффективности электроснабжения Средне-Камчатского изолированного энергоузла также целесообразно рассмотреть возможность строительства ветряных электростанций (ВЭС) на его территории. По данным наблюдений среднегодовая скорость ветра в населенных пунктах Средне-Камчатского изолированного энергоузла на высоте 30 метров составляет около 4,5 м/с [13].

В соответствии с опытом эксплуатации ВЭС в п. Усть-Камчатск, Камчатского края значение КИУМ для ВЭС при расчетах принимается на уровне 15%. Оценка экономической эффективности строительства ВЭС для населенных пунктов с наибольшим ветроэнергетическим потенциалом Средне-Камчатского изолированного энергоузла показал, что себестоимость производства электроэнергии на ВЭС составит около 14 руб./кВтч.

Расчёт удельной экономии стоимости электроэнергии за счёт ввода ВЭС на базе сравнения себестоимости электроэнергии ВЭС с существующей топливной составляющей себестоимости производства электроэнергии приведен в таблице 12.

Таблица 12

Оценка экономической эффективности использования ВЭС в Средне-Камчатском
изолированном энергоузле

Населенный пункт	Мощность ВЭС, кВт	Капитало - вложения, тыс.руб.	Себестоимость производства э/э на ВЭС, руб./кВтч	Топливная составляющая себестоимости э/э, руб./кВтч	Удельная экономия стоимости э/э за счёт ввода ВЭС, руб./кВтч
п. Атласово	500	54 671	14	15,7	1,7
п. Таёжный	100	10 934	14	23,4	9,4
с. Долиновка	1500	164 013	14	13,9	-0,1
с. Эссо	3000	328026	14	0,0	-14

Из таблицы видно, что наиболее перспективным проектом может быть строительство ВЭС в п. Таежный. Однако опыт эксплуатации ВЭС на территории Камчатского края показывает, что в этом случае также необходимо наличие надежного независимого источника электроснабжения в виде ДЭС. Поэтому затраты на эксплуатацию возрастают, и фактическая удельная экономия стоимости электроэнергии при использовании ВЭС будет ниже расчетной.

С учетом мирового опыта и опыта организации электроснабжения потребителей Камчатского края наиболее перспективным вариантом развития изолированных энергоузлов является строительство малых ГЭС. Несмотря на необходимость обеспечения пропуска промысловых рыб на нерест и сохранения речных долин, используемых для сельского хозяйства, реальный для использования экономический потенциал речных гидроресурсов Камчатки составляет около 5 млрд. кВтч в год [14,15].

Оценка экономической эффективности строительства малых ГЭС для целей электроснабжения Средне-Камчатского изолированного энергоузла и расчёт себестоимости производства электроэнергии на малых ГЭС показали, что в этом случае КИУМ является максимальным и достигает 45 %, а себестоимость производства электроэнергии составит менее 4 руб./кВтч. Таким образом, величина топливной составляющей себестоимости электроэнергии по всем населенным пунктам с ДЭС значительно выше [16].

На основе сравнения себестоимости электроэнергии малых ГЭС и действующей топливной составляющей себестоимости электроэнергии в рассматриваемых населенных пунктах можно сделать вывод, что применение малых ГЭС для целей электроснабжения изолированных энергоузлов Камчатского края будет экономически выгодно во всех населенных пунктах, где в качестве топлива используется дизель, так как величина

топливной составляющей в данных населенных пунктах в несколько раз превышает себестоимость электроэнергии малых ГЭС. Таким образом, строительство малых ГЭС для целей электроснабжения изолированных энергоузлов Камчатского края экономически целесообразно [17].

В этом направлении рассматривается как потенциальный проект малой ГЭС на р. Кававля, приток р. Быстрая, мощностью 4 – 6 МВт, в Быстринском муниципальном районе. Реализация данного проекта и введение в эксплуатацию малой ГЭС значительно повысит эффективность и надежность электроснабжения в Средне-Камчатском изолированном энергоузле.

Выводы

Результаты, представленные в данной работе, согласуются с результатами исследований российских и зарубежных ученых [18, 19] и подтверждают необходимость поиска оптимального баланса между генерацией и потреблением электроэнергии, а также более широкого использования местных возобновляемых источников электроэнергии. На основании перспективного прогноза электропотребления в энергоузле и данных представленных энергокомпаниями разработаны основные направления оптимизации системы электроснабжения.

В настоящее время в системе электроснабжения Среднекамчатского изолированного энергоузла требуется масштабное обновление парка дизельных электростанций, так как около 28,5 % оборудования дизельных электростанций (1,8 МВт) отработали более 30 лет. Для повышения экономической эффективности рекомендуется в первую очередь решить проблему низкорентабельной ДЭС в п. Таежный, имеющей завышенный расход топлива. Проведенные технико-экономические расчёты показали, что в данном случае является экономически целесообразным строительство СЭС по проекту дизель-солнечной электростанции на фотоэлектрических модулях.

Средне-Камчатский изолированный энергоузел имеет высокие экономически обоснованные тарифы на электроснабжение, что в основном обусловлено тем, что электроснабжение потребителей в населенных пунктах осуществляется в основном за счёт ДЭС, работающих на дорогостоящем привозном дизельном топливе. Снижение себестоимости производства электроэнергии в энергоузле возможно за счёт реализации проектов по строительству новых малых ГЭС и освоению потенциала ветроэнергетики.

Таким образом для повышения эффективности электроснабжения в Средне-Камчатском изолированном энергоузле необходимо разработать и реализовать мероприятия по замещению дизельной генерации в населенных пунктах, а также замены устаревшего оборудования на существующих станциях.

Кроме того, для повышения надежности электроснабжения необходимо развивать и совершенствовать электросетевое хозяйство энергоузла. В Средне-Камчатском энергоузле требуется осуществить реконструкцию ПС 6/35 с. Эссо и ПС 35/6 с Анавгай с заменой 2-х ТМ 1000 кВА 35/6 на 2 ТМ 1600 кВА 35/6 на ПС 6/35 «Эссо» и с заменой 2-х ТМ-1000 кВА 35/6кВ на 2 ТМ 400 кВА 35/6кВ на ПС 35/6 «Анавгай». Необходима реконструкция ПС 35 кВ п. Атласово с заменой трансформатора ТМ-1000 кВА 35/10 кВ на ТМ 1600 кВА 35/6 кВ и установкой резервного трансформатора Т-4 ТМ 250 кВ 6/10 кВ для обеспечения технологического присоединения и увеличения мощности рыбоперерабатывающих предприятий. Также требуется реконструкция ВЛ 35 кВ мГЭС-4 – Анавгай (16,6 км), которая исчерпала нормативный срок эксплуатации [20].

Результатом реализации мероприятий развития генерирующих мощностей станет увеличение доли выработки электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии и, как следствие, снижение количества сжигаемого углеводородного топлива, что в свою очередь позволит снизить тариф на электрическую энергию в Средне-Камчатском энергоузле.

Принимая во внимание высокие капитальные затраты на реализацию инновационных мероприятий развития необходима поддержка федерального бюджета и включение ряда предлагаемых мероприятий в профильные федеральные программы.

Литература

1. Белов О.А. Состояние электроэнергетики Камчатского края и перспективы ее развития // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2021. Т. 21. № 4. С. 48-56.
2. Белов О.А. Анализ структуры генерирующей мощности в изолированных энергоузлах Камчатского края // Сборник трудов II всероссийской научно-практической

конференции «Энергетика будущего - цифровая трансформация»; 15-17 декабря 2021 г., Липецк. Липецкий государственный технический университет. 2021. С. 281-286.

3. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., и др. Методика онлайн оценки технического состояния трансформаторной подстанции 35/6(10) кВ по коэффициенту экспресс-анализа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 14-26.

4. Ившин И.В., Галяутдинова А.Р., Владимиров О.В., Низамиев М.Ф. Оценка работоспособности трансформаторной подстанции по результатам экспресс-мониторинга ее элементов // Материалы VI Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве»; 10-11 декабря 2020 г., Казань. Казанский государственный энергетический университет. 2020. С. 33-35.

5. Голубцов Н.В., Федоров О.В. Энергоэффективность экономики в аспекте инновационного инженерного образования // Материалы Девятой всероссийской научно-практической конференции «Наука, образование, инновации: пути развития»; 22-24 мая 2018 г., Петропавловск-Камчатский. Камчатский государственный технический университет. 2018. С. 135-139.

6. Грачева Е.И., Тошходжаева М.И. Моделирование работоспособности электрооборудования систем электроснабжения и электрических сетей. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2021. 220 с.

7. Вагин Г.Я. Состояние и перспективы развития электроэнергетики в России // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2. С. 4-14.

8. Tyagunov M.G. Determining the optimal placements of renewable power generation systems using regional geographic information system // Proceeding of the 2nd International Conference on the Applications of Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems - IT-DREPS 2017. 2018. pp. 1-6.

9. Кротенко Д.С., Семчев В.А., Белов О.А., и др. Анализ перспективного развития энергообеспечения Камчатского края // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2020. №51. С. 6-11.

10. Никитин А.Т., Белов О.А. Перспективы развития малой энергетики как экологичной технологии // Материалы научно-практической конференции: «Образование, наука и молодежь – 2017»; 26 октября 2017 г., Керчь. Керченский государственный морской технологический университет. 2017. С. 268-272.

11. Semenov A., Volotkovskaya N., Bebiikhov Y., Yakushev I., Fedorov O., Gracheva E. Analysis of the efficiency of development scenarios for the energy complex of the north-east of russia Conference proceedings. «Sustainable Energy Systems: innovative perspectives». 29-30 October 2020; Saint-Petersburg. Springer, Cham. 2021. pp. 231-240.

12. Безруких П.П. Нетрадиционно возобновляемые источники энергии. М.: Топливо-энергетический комплекс, 2002. 120 с.

13. Зайченко В.М., Соловьев Д.А., Чернявский А.А. Перспективные направления развития энергетики России в условиях перехода к новым энергетическим технологиям // Окружающая среда и энерговедение. 2020. № 1. С. 33-47.

14. Антонов Н.В., Евдокимов М.Ю., Шилин В.А. Возобновляемая энергетика за рубежом и в регионах России // Географическая среда и живые системы. 2020. №1. С. 85-99.

15. Семчев В.А. О перспективах и проблемах развития гидроэнергетики в Камчатском крае // Горный вестник Камчатки. 2017. № 2(38). С. 36-43.

16. Bezrukikh P.P. On Some Issues Assessing the Efficiency of Renewable Energy Power Plant and the Share of Renewables in the World's Electricity Generation // Journal of Electrical Engineering. 2018. № 6. pp. 85-89.

17. Тягунов М.Г. Особенности работы установок на основе возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах // Альтернативная энергетика в регионах России: Материалы молодежной научной конференции «АЭР-2018»; 05-07 декабря 2018 г., Астрахань. 2018. С. 40-44.

18. Weinand, J.M., Scheller, F., McKenna, R.. Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy. Energy. 2020; 203: 117817

19. Zaroni, H., Maciel, L.B., Carvalho, D.B., Pamplona, E.D.O. Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system. Energy. 2019; 172: 498-508.

20. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Взаимосвязь характеристик силовых трансформаторов и их нагрузочной способности // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2019. № 1 (55). С. 48-55.

Авторы публикации

Белов Олег Александрович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетические установки и электрооборудование судов», Камчатский государственный технический университет (КамчатГТУ).

Федоров Олег Васильевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Управление инновационной деятельностью», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ).

References

1. Belov OA. Sostoianie elektroenergetiki Kamchatskogo kraia i perspektivy ee razvitiia. *Vestnik Iuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2021;21(4):48-56.
2. Belov OA. *Analiz struktury generiruiushchei moshchnosti v izolirovannykh energouzlakh Kamchatskogo kraia*. Sbornik trudov II vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Energetika budushchego – tsifrovaia transformatsiia»; 15-17 dekabria 2021 g., Lipetsk. Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 2021. pp. 281-286.
3. Ivshin IV, Galiautdinova AR, Vladimirov OV, i dr. Metodika onlain otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia transformatornoi podstantsii 35/6(10) kV po koeffitsientu ekspress-analiza. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2021;23(4):14-26.
4. Ivshin IV, Galiautdinova AR, Vladimirov OV, Nizamiev MF. *Otsenka rabotosposobnosti transformatornoi podstantsii po rezultatam ekspress-monitoringa ee elementov*. Materialy VI Natsionalnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Priborostroenie i avtomatizirovannyi elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunalnom khoziaistve»; 10-11 dekabria 2020 g., Kazan. Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet. 2020. pp. 33-35.
5. Golubtsov NV, Fedorov OV. *Energoeffektivnost ekonomiki v aspekte innovatsionnogo inzhenernogo obrazovaniia*. Materialy Deviatoi vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka, obrazovanie, innovatsii: puti razvitiia»; 22-24 maia 2018 g., Petropavlovsk-Kamchatskii. Kamchatskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 2018. pp. 135-139.
6. Gracheva EI, Toshkhodzhaeva MI. *Modelirovanie rabotosposobnosti elektrooborudovaniia sistem elektrosnabzheniia i elektricheskikh setei*. Kazan: Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet. 2021. 220p.
7. Vagin GIa. Sostoianie i perspektivy razvitiia elektroenergetiki v Rossii. *Intellektualnaia Elektrotekhnika*. 2021;2:4-14.
8. Tyagunov MG. *Determining the optimal placements of renewable power generation systems using regional geographic information system*. Proceeding of the 2nd International Conference on the Applications of Information Technology to Renewable Energy Processes and Systems - IT-DREPS 2017. 2018. pp. 1-6.
9. Krotenko DS, Semchev VA, Belov OA, i dr. Analiz perspektivnogo razvitiia energoobespecheniia Kamchatskogo kraia. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;51:6-11.
10. Nikitin AT, Belov OA. *Perspektivy razvitiia maloi energetiki kak ekologichnoi tekhnologii*. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii: «Obrazovanie, nauka i molodezh – 2017»; 26 oktiabria 2017 g., Kerch. Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet. 2017. pp. 268-272.
11. Semenov A., Volotkovskaya N., Bebikhov Y., Yakushev I., Fedorov O., Gracheva E. *Analysis of the efficiency of development scenarios for the energy complex of the north-east of Russia Conference proceedings*. «Sustainable Energy Systems: innovative perspectives». 29-30 October 2020; Saint-Petersburg. Springer, Cham. 2021. pp. 231-240.
12. Bezrukh PP. *Netraditsionno vozobnovliaemye istochniki energii*. M.: Toplivno-energeticheskii kompleks, 2002. 120 s.
13. Zaichenko VM, Solovov DA, Cherniavskii AA. *Perspektivnye napravleniia razvitiia energetiki Rossii v usloviakh perekhoda k novym energeticheskim tekhnologiam. Okruzhaiushchaia sreda i energovedenie*. 2020;1:33-47.
14. Antonov NV, Evdokimov MIu, Shilin VA *Vozobnovliaemaia energetika za rubezhom i v regionakh Rossii. Geograficheskaiia sreda i zhivye sistemy*. 2020. №1. S. 85-99.

15. Semchev VA. O perspektivakh i problemakh razvitiia gidroenergetiki v Kamchatskom krae. *Gornyi vestnik Kamchatki*. 2017;2(38):36-43.
16. Bezrukikh PP. On Some Issues Assessing the Efficiency of Renewable Energy Power Plant and the Share of Renewables in the World's Electricity Generation. *Journal of Electrical Engineering*. 2018;6:85-89.
17. Tiagunov MG. *Osobennosti raboty ustanovok na osnove vozobnovliaemykh istochnikov energii v izolirovannykh energosistemakh*. Alternativnaia energetika v regionakh Rossii: Materialy molodezhnoi nauchnoi konferentsii «AER-2018»; 05-07 dekabria 2018 g., Astrakhan. 2018. p. 40-44.
18. Weinand, J.M., Scheller, F., McKenna, R.. Reviewing energy system modelling of decentralized energy autonomy. *Energy*. 2020; 203:117817
19. Zaroni, H., Maciel, L.B., Carvalho, D.B., Pamplona, E.D.O. Monte Carlo Simulation approach for economic risk analysis of an emergency energy generation system. *Energy*. 2019; 172:498-508.
20. Gracheva EI, Alimova AN. Vzaimosviaz kharakteristik silovykh transformatorov i ikh nagruzochnoi sposobnosti. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozemia*. 2019;1(55):48-55.

Authors of the publication

Oleg A. Belov – Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Oleg V. Fedorov – Nizhny Novgorod State Technical University by R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Получено **02.09.2022г.**

Отредактировано **13.09.2022г.**

Принято **13.09.2022г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА



УДК 662.739

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ МЕТАМОРФИЗМА РЕГИОНОВ ЕНИСЕЙСКОЙ СИБИРИ

Жуйков А.В.¹, Матюшенко А.И.¹, Кулагин В.А.¹, Логинов Д.А.²

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²ООО «Сибнииглеобогащение», г. Красноярск, Россия

azhuikov@sfu-kras.ru

ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследовать процесс горения двух углей разной степени метаморфизма и их смесей с применением термогравиметрического анализа, основанного на изменении массы и скорости изменения массы в процессе нагрева топлив. Определить основные характеристики топлив и процесса горения (температуры воспламенения и выгорания коксового остатка). Провести качественный анализ поверхности топливных частиц двух разных углей с помощью сканирующей электронной микроскопии на наличие пор и трещин. Определить склонность к шлакованию угольных смесей. МЕТОДЫ. При решении поставленных задач применялся термогравиметрический метод, электронный метод и метод расчета, на основе проведенного валового химического анализа минеральной части углей и их смесей. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье представлен краткий обзор по сжиганию непроектных топлив на теплоэлектростанциях. Приведены результаты технического и элементного анализа черногорского каменного угля и балахтинского бурого угля. Описана методика определения температуры воспламенения и выгорания коксового остатка. Представлены термограммы процесса горения двух углей разной степени метаморфизма и их смесей. Определены основные характеристики их горения. Показан качественный анализ поверхности топливных частиц на наличие пор и трещин. Проведен расчёт склонности к шлакованию угольных смесей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. И черногорский и балахтинский уголь имеют высокий выход летучих веществ и среднюю теплоту сгорания. По степени метаморфизма отличаются незначительно, показатели их технического и элементного анализа близки по своим значениям. Термогравиметрический анализ показал более раннее воспламенение балахтинского бурого угля по сравнению с черногорским каменным углем. При увеличении доли балахтинского угля в угольной смеси профиль кривых горения смещается в область более низких температур. Добавление 25% балахтинского угля снижает температуру воспламенения черногорского угля на 16%, с увеличением доли балахтинского угля в смеси температура воспламенения не изменяется. Расчет склонности угольной смеси к шлакованию применяя основные оксиды, содержащиеся в минеральной части золы исследуемых углей, показал, что балахтинский уголь имеет высокую склонность к шлакованию топочных экранов в отличие от черногорского каменного угля, поэтому увеличение массовой его доли в угольной смеси увеличивает склонность к шлакованию топочных экранов.

Ключевые слова: уголь; степень метаморфизма; угольные смеси; шлакование топочных экранов, термогравиметрический анализ.

Для цитирования: Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кулагин В.А., Логинов Д.А. Особенности горения твердотопливной смеси на основе углей разной степени метаморфизма регионов Енисейской Сибири // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 136-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146.

RESEARCH OF COMBUSTION OF SOLID FUEL MIXTURE BASED ON COALS OF
DIFFERENT DEGREES OF METAMORPHISM IN THE REGIONS OF YENISEI
SIBERIA

AV. Zhuikov¹, AI. Matyushenko¹, VA. Kulagin¹, DA. Loginov²

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²ООО «Sibniugleobogoshenie», Krasnoyarsk, Russia

azhuikov@sfu-kras.ru

ORCID *: <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>, azhuikov@sfu-kras.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Consider the combustion process of two coals of different degrees of metamorphism and their mixtures using thermogravimetric analysis based on the change in mass and the rate of change in mass during the heating of fuels. Determine the main characteristics of fuels and the combustion process (temperature of ignition and burnout of the coke residue). Determine the tendency to slagging of coal mixtures. *METHODS.* When solving the tasks, the thermogravimetric method (TGA). *RESULTS.* The article provides a brief overview of the combustion of non-design fuels at thermal power plants. The results of technical and elemental analysis of Chernogorsk bituminous coal and Balakhta brown coal are presented. A technique for determining the ignition temperature and burnout of the coke residue is described. The thermograms of the combustion process of two coals of different degrees of metamorphism and their mixtures are presented. The main characteristics of their combustion have been determined. A qualitative analysis of the surface of fuel particles for the presence of pores and cracks is shown. The calculation of the tendency to slagging of coal mixtures has been carried out. *CONCLUSION.* Thermogravimetric analysis showed an earlier ignition of the Balakhta brown coal in comparison with the Montenegrin bituminous coal. With an increase in the proportion of Balakhta coal in the coal mixture, the profile of the combustion curves shifts to the region of lower temperatures. The addition of 25% Balakhta coal reduces the ignition temperature of Chernogorsk coal by 16%, with an increase in the proportion of Balakhta coal in the mixture, the ignition temperature does not change. Balakhta coal has a high tendency to slagging furnace walls, in contrast to Chernogorsk coal, therefore, an increase in its mass fraction in the coal mixture increases the tendency to slagging furnace screens.

Keywords: coal; degree of metamorphism; coal mixtures; slagging of furnace walls; thermogravimetric analysis (TGA).

For citation: Zhuikov AV, Matyushenko AI, Kulagin VA, Loginov DA. Research of combustion of solid fuel mixture based on coals of different degrees of metamorphism in the regions of Yenisei Siberia. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):136-146. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-136-146.

Введение

Уголь является вторым энергетическим топливом по объему использования в процессе генерации тепловой и электрической энергии, обеспечивая около 30% выработки по всему миру [1]. Сжигание угля на теплоэлектростанциях и промышленно-отопительных котельных связано с двумя основными задачами это – ресурсосбережение и улучшение экологической обстановки. Существует множество методов по решению этих проблем, но все они предусматривают огромные капиталовложения в топливно-энергетический комплекс. Одним из доступных методов является переход на сжигание непроектных топлив. Цели, которые преследуются при переходе на сжигание непроектного топлива (твердотопливных смесей), могут быть разные: снижение потребления твердого топлива, снижение содержания золы и оксидов серы, вынужденный переход из-за закрытия угольного разреза, переход на более дешевый уголь и другие.

Прекращение поставок донецкого антрацита на теплоэлектростанции Украины стало причиной перехода большинства ТЭС на непроектные топлива, основными из которых стали тощий каменный уголь марки Т и угольные смеси антрацитового штыба и каменными углями марки Т или Г [2]. Снижение теплоты сгорания сланцев, которые являются основным энергетическим топливом Эстонии, привело к поискам новых топлив, которые могли бы стать альтернативой замены сланцев. П.В. Росляков и др. [3] исследовали

возможность сжигать на котле ТП–101 сланцы совместно с бурым углем Кемеровского бассейна и каменным углем, добываемым в шахте Талдинская-Западная 1, и установили, что совместное сжигание этих топлив принципиально возможно. На Железногорской ТЭЦ перешли на сжигание угольной смеси, состоящей из 50% бородинского бурого угля ($A^d = 7,5$; $Q_f^i = 20,03$ МДж/кг) и 50% большесырского бурого угля ($A^d = 3,9$; $Q_f^i = 20,03$ МДж/кг). Проектным топливом ЖТЭЦ до перехода был бородинский уголь. Переход был сделан с целью снижения расхода твердого топлива на ТЭЦ (улучшение технико-экономических показателей); снижения выбросов в атмосферу золы; уменьшение объема золошлаковых отходов (улучшение экологических показателей) [4].

Для исследования процессов горения топлив во всем мире широко используется термогравиметрический анализ. При нагреве образцов, по кривым потери веса, скорости потери веса и дифференциально сканирующей калориметрии определяются основные характеристики горения (температура зажигания коксового остатка, температура выгорания коксового остатка и универсальный индекс горения топлива и др.) и рассчитываются кинетические константы [5, 6]. S.Santhosh Raa и др. [7] исследовали совместное сжигание двух видов углей, установили их аддитивные свойства при смешивании. Ma L. и др. [8] установили при исследовании совместного сжигания двух каменных углей, что мелкие топливные частицы с большей удельной поверхностью увеличивают реакционную способность смеси, ослабляя эффект ингибирования выгорания угля с низким содержанием летучих. Wang H. и др. [9] с помощью термогравиметрического анализа исследовали горение твердотопливной смеси на основе бурого угля и антрацита. Бурый уголь с высоким содержанием летучих ($V^d = 38,92\%$) смешивали с низкорекреационным антрацитом ($V^d = 14,19\%$) получая угольные смеси по массе с шагом 20%. Температура воспламенения антрацита составила $T_i = 416$ °C, а температура выгорания $T_b = 583$ °C, бурый уголь имел следующие характеристики горения $T_i = 306$ °C и $T_b = 485$ °C. С увеличением доли бурого угля улучшались характеристики горения угольной смеси. Niu S.-L. и др. [10] исследовали горение угольной смеси на основе каменного угля ($T_i = 385$ °C и $T_b = 634$ °C) и антрацита ($T_i = 506$ °C и $T_b = 831$ °C) при кислородном сжигании. Было установлено, что сжигание угля улучшается в атмосфере обогащённом кислородом. Guo L. и др. [11] исследовали горение и шлакование угольной смеси на основе каменного и бурого угля. Угли низкого качества содержали высокое количество золы (более 35%), невысокое количество летучих (до 25%) и соответственно имели невысокую теплоту сгорания (до 20 МДж/кг). Температура зажигания и выгорания составила у бурого угля ($T_i = 344$ °C и $T_b = 548$ °C), а у каменного угля ($T_i = 435$ °C и $T_b = 571$ °C). Авторами было установлено, что существует связь между характеристиками горения и шлакуемостью, низкорекреационный уголь выгорает качественней высокорекреационного угля, но сильнее склонен к шлакованию. Han J. и др. [12] применяя термогравиметрический анализ и электронный модуль для расчета содержания мышьяка в процессе окисления исследовали горение бурого и каменного угля и их смесей установили, что для снижения образования мышьяка в процессе горения угольной смеси, в топливе должно преобладать содержания кальция. Zhang L. и др. [13] исследовали кислородно-паровое сжигание каменного и полуантрацитового (тощего) углей и их смесей применяя термогравиметрический анализ. Установлено, что температуры воспламенения и выгорания ниже в атмосфере O_2/H_2 чем в атмосфере O_2/N_2 .

Самый распространенный размер частиц при исследовании процессов горения угля составляет 75–200 мкм. Установлено, что воспламенение углей низкой степени метаморфизма происходит в области более низких температур, по сравнению с углями средней и высокой степени метаморфизма. На процесс зажигания и выгорания так же оказывает влияние удельная поверхность угольной частицы, так угольные частицы с большим количеством пор и трещин на своей поверхности зажигаются раньше, чем угольные частицы, имеющие более ровную поверхность с минимальным количеством пор и трещин [14–16].

Масштабные исследования по сжиганию угольных смесей на теплоэлектростанциях России были проведены сотрудниками ВТИ разных отделений [17], на данный момент такие исследования сведены к минимуму. В связи с этим необходимо получение новых научных данных о характеристиках горения и шлакующих свойств угольных смесей, на основе углей ранее не изучавшихся. Полученные новые данные о характеристиках горения

угольных смесей могут представлять научное обоснование их эффективного применения в энергетических котлах, работающих на твердом топливе.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны два образца углей, черногорский каменный уголь, длиннопламенный (ЧР) был отобран с разреза Черногорский, Республика Хакасия. Уголь имеет высокое количество летучих (табл.1), невысокую зольность и теплоту сгорания, при этом отмечается высокое содержание азота и серы. Данный вид угля в основном добывается для экспорта, а также используется на местных промышленно-отопительных котельных. Балахтинский бурый уголь (ЗБР) был получен с Большесырского разреза, входящего в Канско-Ачинский угольный бассейн, Красноярский край. Данный уголь имеет ряд уникальных характеристик (табл. 1) по сравнению с другими бурыми углями это – низкая зольность, низкое содержание влаги и высокая теплота сгорания. В мире всего три разреза с бурыми углями схожими по своим характеристикам с балахтинским углем, они расположены в Колумбии, Казахстане и Индонезии. Балахтинский уголь в основном используется как энергетическое топливо на промышленно-отопительных котельных, так как доставляется с разреза только автотранспортом.

Характеристики углей изучены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Образцы углей с начальным размером менее 20 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице *Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany)*. Ее основные характеристики: максимальный начальный размер частиц менее 20 мм, максимальное число оборотов 528 об/мин, гарантированная тонина помола менее 100 мкм. Для подготовки экспериментальных образцов использовалась аналитическая просеивающая машина *Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany)* с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Таким образом, получались образцы углей с размерами частиц 53–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре *IKA C6000*. Элементный состав топлива определяли в анализаторе *Vario MACRO cube (Elementar, Германия)*. Влажность определялась по ГОСТ 8.649-2015, зольность по ГОСТ 55661-2013, выход летучих веществ по ГОСТ R 55660-2013, содержание серы по ГОСТ 32979-2014, высшая теплота сгорания по ГОСТ 147-2013, содержание углерода, водорода, азота по ГОСТ 32979-2014, серы по ГОСТ 8606-2015, содержание кислорода по ГОСТ 27313-2015. Угольные смеси получали с помощью аналитических весов *MS105du (Mettler Toledo, Швейцария)*:

- 100% ЧР;
- 75%ЧР + 25%ЗБР;
- 50%ЧР + 50%ЗБР;
- 25%ЧР + 75%ЗБР;
- 100% ЗБР.

Таблица 1

Технические характеристики и элементный состав образцов

	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Элементный состав, мас.% на d_{af}					Q_i^a , МДж/кг
				C	H	N	S	O	
ЧР	4,7	18,8	31,5	80,2	5,2	2,1	0,7	11,8	20,93
ЗБР	8,0	6,2	44,6	74,1	5,0	0,9	0,4	19,6	20,47

Термический анализ образцов проводился с применением синхронного термоанализатора *SDT Q600 (TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA)*. Кривые ТГ, ДТГ, ДСК снимали для навесок топлив массой 6.0 ± 0.25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева 20 °С/мин. Основные характеристики процессов горения определяли путем анализа термогравиметрических кривых, полученных из *Universal Analysis 2000* (программное обеспечение V5.5.24 от *TA Instruments-Waters LLC, New Castle, DE, USA*).

Электронно-микроскопические (СЭМ) исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе *TM4000 (Hitachi, Япония)*, оборудованном энергодисперсионным

спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax150 (Bruker, Германия) в режиме низкого вакуума (без напыления платины).

Для вычисления значения индекса горения по кривым ТГ и ДТГ определялись температура воспламенения коксового остатка (T_i) и температура выгорания коксового остатка (T_b) по методу экстраполяции при пересечении касательных на кривых ТГ и ДТГ. Визуализация методики определения значений T_i , T_b , DTG_{max} и T_{max} представлена на (рис. 1) [18, 19]. Температуре T_{max} соответствовала максимальная скорость потери массы DTG_{max} .

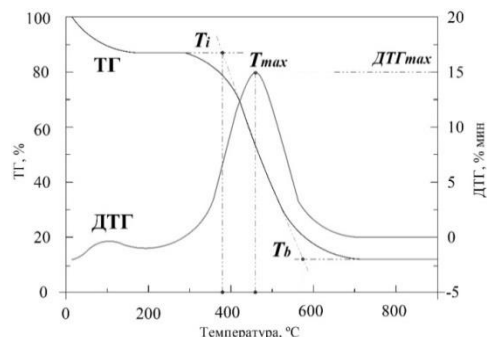


Рис. 1. Определение параметров горения методом экстраполяции кривых

Fig. 1. Determination of combustion parameters by extrapolation of curves

Результаты и обсуждения

Горение топлива представляет собою сложный физико-химический процесс и состоит из трех основных этапов. В первом этапе происходит нагрев и удаление влаги, во втором этапе начинается разрушение органических соединений сопровождающаяся воспламенением и горением летучих на поверхности топливной частицы повышая температуру коксового остатка, в третьем этапе происходит воспламенение и горение коксового остатка, догорания особо плотного углеродного остатка. Иногда второй и третий этап процесса горения совмещены. На рисунке 2 профилями кривых ТГ и ДТГ представлен процесс горения углей и их смесей.

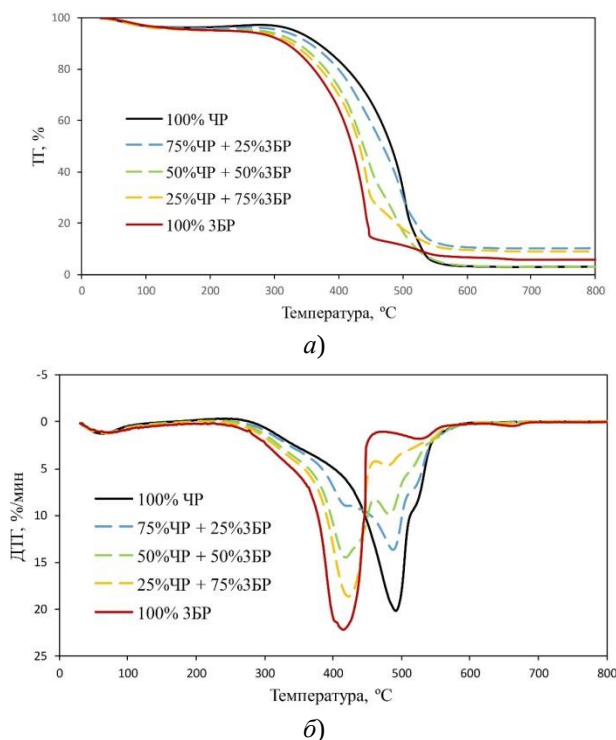


Рис. 2. Профили горения углей черногорского (ЧР), балахтинского (ЗБР) и их смесей: а) – кривые потери массы; б) – кривые дифференциальной потери массы

Fig. 2. Coal burning profiles of Montenegrin (CR), Balakhtinsky (ZBR) and their mixtures: а) - Mass loss curves; б) - Differential mass loss curves

На первом этапе при нагреве топлив происходит потеря массы углей и их смесей достигая 7–10% за счет испарения абсорбированной воды. При нагревании черногорского угля в области температур 150–250 °С происходит небольшое увеличение массы (рис. 2а) из-за начала процесса окисления сопровождающимся проникновением атомов кислорода в его структуру [20]. У балахтинского угля увеличение массы не происходит, что характерно для бурых углей при нагреве. Основная потеря массы происходит на втором и третьем этапе процесса горения топлив (80–90%). Потеря массы на втором и третьем этапе (рис. 2 б) у балахтинского угля происходит в области более низких температур, а у черногорского угля в области более высоких температур.

Профиль горения черногорского угля (рис. 2 б) состоит из одного пика, в котором воспламенение и горение летучих плавно переходит в воспламенение и горение углеродного остатка. Профиль горения балахтинского угля (рис. 2 б) состоит из двух пиков, в первом происходит воспламенение и горение летучих переходящее в воспламенение и горение углеродной остатка. Во втором пике происходит догорание наиболее плотного углеродного остатка. Профили горения угольных смесей (рис. 2) смещаются в область более низких температур при увеличении массовой доли балахтинского угля. Профили кривых угольных смесей на втором и третьем этапах горения имеют по два пика, первый пик находится в температурной области соответствующей горению балахтинского угля 418–421 °С, а второй пик находится в температурной области горения черногорского угля 453–488 °С (табл.2). Разделение процесса горения у угольных смесей на две температурные области происходит за счет разной степени метаморфизма углей и разного их петрографического состава. Чем выше реакционность топлива, тем у него выше DTG_{max} и ниже T_{max} . При добавлении балахтинского угля к черногорскому углю происходит снижение DTG_{max} смесей, так как область горения разделяется на два пика DTG при этом происходит снижение T_{max2} в пике DTG , где происходит горение черногорского угля, демонстрируя зависимость увеличения реакционной способности угольных смесей от увеличения массовой доли балахтинского угля в смеси.

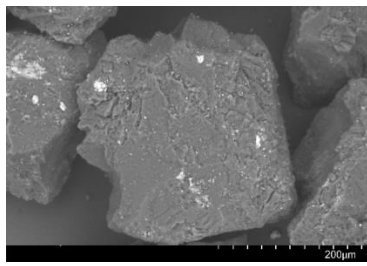
Таблица 2

Характеристики горения топливных образцов

	T_b , °С	T_{max1} , °С	T_{max2} , °С	T_b , °С	DTG_{max} , %/мин
100% ЧР	418	-	492	522	20,04
75%ЧР + 25%ЗБР	361	418	488	524	13,64
50%ЧР + 50%ЗБР	359	418	482	523	14,42
25%ЧР + 75%ЗБР	360	421	454	530	18,73
100% ЗБР	357	421	-	551	24,20

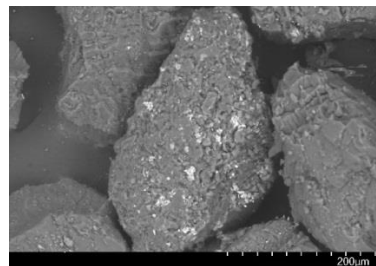
Черногорский уголь имеет высокую температуру воспламенения 418 °С по сравнению с балахтинским углем, температура воспламенения которого равна 357 °С. При добавлении балахтинского угля к черногорскому во всех угольных смесях температура воспламенения максимально приближена к температуре воспламенения балахтинского угля. Температура выгорания угольных смесей при увеличении доли балахтинского угля увеличивается.

Температура воспламенения углеродного остатка зависит от состояния поверхности топливной частицы. Наличие пор и трещин обеспечивает более глубокое проникновение кислорода в глубь самой частицы, обеспечивая более полное и быстрое ее выгорание. На рисунке 3 представлены изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) угольных частиц. На поверхности угольной частицы черногорского угля (рис. 3а) видны поры и трещины, а также минеральные частицы (белые включения). На рисунке 3б изображена угольная частица балахтинского угля, пор и трещин на ее поверхности больше, чем у черногорского угля, также присутствуют минеральные частицы.



а)

Рис. 3. Изображения СЭМ угольных частиц:
а) черногорский уголь; б) балахтинский уголь



б)

Fig. 3. Images of SAM of coal particles:
a) Montenegrin coal; b) Balakhtini coal

При смешивании двух разных углей необходимо учитывать проблему шлакования поверхности нагрева котлов. Оценка шлакующих свойств может быть проведена по минимальной доступной информации и основываться на техническом, элементном анализе и данных химического состава золы углей (табл.3). Основные характеристики влияющие на склонность топлива к шлакованию были рассчитаны по методике УралВТИ [21, 22]. Для оценки склонности шлакования черногорского и балахтинского углей определяется температура начала их шлакования $t_{\text{шл}}$, которая зависит от отношения компонентов кислого и основного состава основных оксидов, по следующей формуле:

$$t_{\text{шл}} = 945 + 7,77 \times K / O \quad (1)$$

где $K = \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$; $O = \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$.

Таблица 3

Химический состав золы углей и их смесей

	100% ЧР	75%ЧР+25%ЗБР	50%ЧР+50%ЗБР	25%ЧР+75%ЗБР	100% ЗБР
SiO_2	42,57	42,72	42,68	42,61	42,76
Al_2O_3	34,31	19,46	24,41	29,35	14,51
TiO_2	1,01	0,84	0,91	0,96	0,79
CaO	6,03	20,81	15,88	10,96	25,74
Fe_2O_3	10,84	11,04	10,97	10,91	11,11
K_2O	0,89	0,82	0,84	0,86	0,79
MgO	3,69	3,55	3,61	3,65	3,51
Na_2O	0,67	0,76	0,73	0,71	0,79

Температура начала шлакования черногорского угля составила 1000 °С, температура начала шлакования балахтинского угля составила 965 °С, оба эти угля склонны к шлакованию топочных экранов, т.к. их $t_{\text{шл}} < 1050$ °С.

Склонность к образованию прочных железистых отложений P_{Fe} углей и угольных смесей определялась по формуле:

$$P_{\text{Fe}} = \frac{b_f - a_f}{\left[S_p^{\text{ash}} (b_v - a_v \cdot v^a) + \Delta S \right]} \quad (2)$$

где $\Delta S = 0,1 \cdot (0,831 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 - S_p^{\text{ash}})$; b_f , a_f , b_v , a_v – эмпирические коэффициенты, зависящие от марки угля; S_p^{ash} – содержание пиритной серы в пересчете на золу, %; v^a – это адиабатическая температура горения, °С; Fe_2O_3 – содержание железа в минеральной части, %.

Склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей P_{Na} углей и угольных смесей определяется по следующей формуле:

$$P_{\text{Na}} = 0,416 \cdot (\text{Na}_2\text{O})^{0,313} \quad (3)$$

где Na_2O – оксид натрия, %.

Склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений P_{Ca} углей и угольных смесей применяется определения необходимой температуры газов на выходе из топки и определяется по формуле:

$$P_{\text{Ca}} = 0,5 \cdot (\text{CaO})^{0,22} - P_{\text{Na}} \quad (4)$$

где CaO – оксид кальция, %.

Индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов R_s углей и угольных смесей рассчитывался по формуле:

$$R_s = 0,707 \cdot [P_{Fe}^2 + P_c^2]^{0,5} \quad (5)$$

где $P_c = 1 - 13,28 \cdot \frac{K/O}{(0,82 \cdot v^a - 945)}$.

На рисунке 4 а изображена зависимость P_{Fe} от массовой доли добавления балахтинского угля к черногорскому углю (β). Массовая доля свыше 50% балахтинского угля в угольной смеси может привести к увеличению площади занимаемой железистыми отложениями на экранных трубах в зоне активного горения, за счет высокого содержания пирита и низкой степени метаморфизма, что характерно для углей низкой степени метаморфизма (бурые и длиннопламенные угли).

Угрозы сульфатно-кальциевых отложений не наблюдается (рис. 4 б), показатель склонности находится в среднем ранге.

При увеличении массовой доли балахтинского угля в угольной смеси свыше 25% приведет к увеличению образований загрязнений топочных экранов активными щелочами (рис. 4 в).

Шлакование топочных экранов зависит от склонности углей к образованию крепких первоначальных отложений P_{Fe} и теплового режима появления шлаковых отложений $t_{шл}$. Индекс R_s , изображенный на рис. 4 г, переходит в ранг – очень высокий, что свидетельствует о том, при увеличении массовой доли балахтинского угля в угольной смеси свыше 25% необходимо предусматривать дополнительные средства очистки топочных экранов в случае, если проектным топливом котлоагрегата является черногорский уголь.

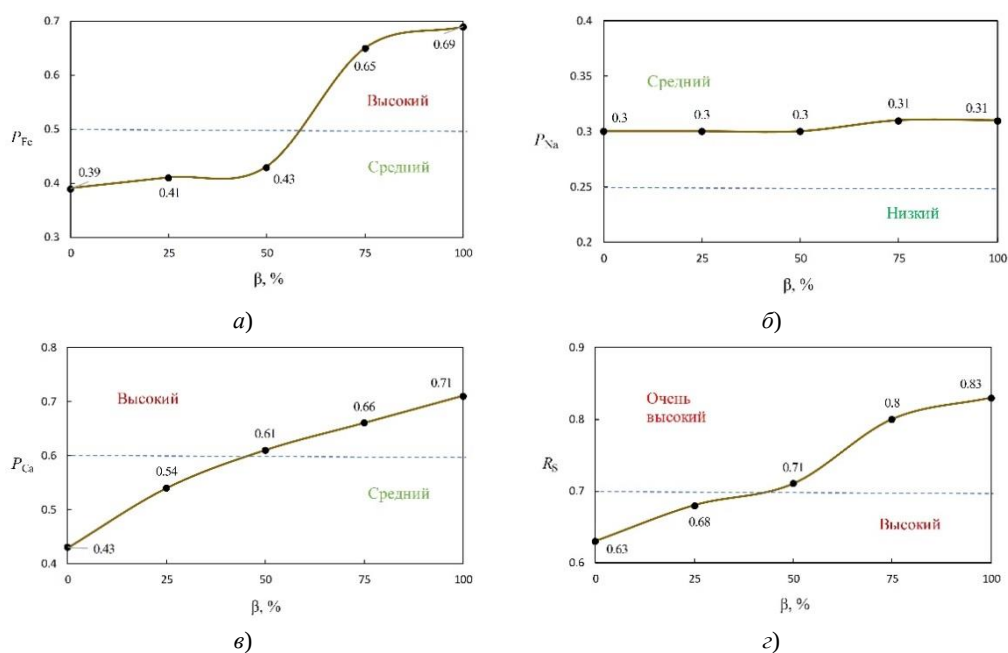


Рис. 4. Характеристики шлакуемости углей и их смесей: а) склонность к образованию прочных железистых отложений; б) склонность к образованию загрязнений на базе активных щелочей; в) склонность к образованию прочных сульфатно-кальциевых отложений; г) индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов

Fig. 4. Characteristics of coal and coal mixtures: а) Propensity to form strong ferrous deposits; б) Active alkali-based impurities; в) Propensity to build strong sulfate-calcium deposits; г) Coal Slag Propensity Index

Закключение

Результаты выполненного исследования характеристик горения в рамках термического анализа (ТГ/ДТГ) черногорского, балахтинского углей и их смесей, позволили сформулировать следующие основные выводы:

1. Температура воспламенения коксового остатка балахтинского угля ($T_i = 357^\circ\text{C}$) ниже, чем температура воспламенения черногорского угля ($T_i = 418^\circ\text{C}$), а температура

выгорания балахтинского угля ($T_i = 551\text{ }^{\circ}\text{C}$) наоборот выше, чем у черногорского угля ($T_i = 522\text{ }^{\circ}\text{C}$).

2. При добавлении 25% балахтинского угля в угольную смесь, температура воспламенения смеси составляет $361\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура выгорания коксового остатка почти не изменяется. Дальнейшее увеличение массовой доли балахтинского угля в угольной смеси не влияет на температуру воспламенения и выгорания коксового остатка.

3. Добавление свыше 25% балахтинского угля увеличивает индекс склонности углей к шлакованию топочных экранов и переводит из ранга высокий в очень высокий. При совместном сжигании двух этих углей необходимо усилить систему паровой и водяной очистки топочных экранов в котлах.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта «Концепция развития теплоэнергетики Красноярского края»».

Литература

1. Zhou H., Bhattarai R., Li Y., et al. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth // Science of the Total Environment. 2022. V. 804, N149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>
2. Капустянский А.А. Исследование факельного сжигания непроектных бинарных угольных смесей в паровых котлах // Теплоэнергетика. 2017. №7. С. 83–90.
3. Росляков П.В., Зайченко М.Н., Мельников Д.А. и др. Использование углей для совместного сжигания с Эстонскими сланцами // Теплоэнергетика. 2016. №3. С. 34–42.
4. Гребеньков П.Ю., Козлов С.Г., Выхристюк М.Н. и др. Использование угля марки ЗБР на котлах БКЗ-160-1,4-5 с мельницами-вентиляторами и газовой сушкой // Электрические станции. 2016. №11. С. 13–18.
5. Yao H., He B., Ding G., et al. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 156. pp. 708–721. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115
6. Zheng S., Hu Y., Wang Z., et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // J. Energy Inst. 2020. V. 93, N4. pp. 1373–1381. DOI: 10.1016/j.joei.2019.12.007
7. Santhosh Raaj S., Arumugam S., Muthukrishnan M., et al. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants // Appl. Therm. Eng. 2016. V.102. pp. 9–16. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.035
8. Ma L., Yu S., Chen X., et al. Combustion interactions in oxy-fuel firing of coal blends: An experimental and numerical study // J. Energy Inst. 2021. V. 94. pp. 11–21. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.007
9. Wang H., Zhang J., Wang G., et al. Characteristics and kinetic analysis of co-combustion of brown coal and anthracite // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 126, N2. pp. 447–454. doi: 10.1007/s10973-016-5557-9
10. Niu, S.-L., Han, K.-H., Lu, C.-M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process // Energy Convers. Manag. 2011. V.52, N1, pp. 532–537. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.028
11. Guo L., Zhai M., Wang Z., et al. Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics // J. Energy Inst. 2019. V. 92, N3. pp. 802–812. doi: 10.1016/j.joei.2018.02.004
12. Han J., Xiong Z., Zhao B., et al. A prediction of arsenic and selenium emission during the process of bituminous and lignite coal co-combustion // Chem. pap. 2020. V. 74, N7. pp. 2079–2089. doi: 10.1007/s11696-020-01058-9
13. Zhang L., Zou C., Wu D., et al. A study of coal chars combustion in $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ mixtures by thermogravimetric analysis // J. Therm. Anal. Calorim. 2016. V. 126, N2. pp. 995–1005. doi: 10.1007/s10973-016-5536-1
14. Khatami R., Levendis Y.A. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level // Combust. Flame. 2016 V. 164. pp. 22–34. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.031
15. Жуйков А.В. Матюшенко А.И., Кузнецов П.Н. и др. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Хакасия, сосновых опилок и их смесей // Журнал Сибирского федерального университета Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 6. С. 611–622.
16. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., et al. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of

brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // *Fuel Process. Technol.* 2021. V. 223. N106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

17. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Применение смесей углей на ТЭС для расширения топливной базы и решения вопросов экологии // *Электрические станции*. 2010. №4. С. 2–8.

18. Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *J. Energy Inst.* 2020. V. 93. P. 1373. doi 10.1016/j.joei.2019.12.007

19. Bala-Litwiniak A, Zajemska M. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler // *Renew. Energy*. 2020. V. 162. P. 151. doi 10.1016/j.renene.2020.07.139

20. Богомолов А.Р., Петров И.Я, Жалмагамбетова У.К. Термический анализ углей казахстанских месторождений // *Теплоэнергетика*. 2020. №3. С. 24–32.

21. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е. и др. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // *Теплоэнергетика*. 1997. №3. С.64–68.

22. Алехнович А.Н., Талова В.М., Богомолов В.В. и др. Исследования энергетических углей методом химического фракционирования и оценка их загрязняющих свойств // *Теплоэнергетика*. 2001. №5. С. 55–63.

Авторы публикации

Жуйков Андрей Владимирович – заведующий учебно-научной лабораторией кафедры теплотехники и гидрогазодинамики, Сибирский федеральный университет.

Матюшенко Анатолий Иванович – д-р, техн. наук., профессор, заведующий кафедрой ИСЗИС, Сибирский федеральный университет.

Кулагин Владимир Алексеевич – д-р, техн. наук., профессор, заведующий кафедрой ТТиГД, Сибирский федеральный университет.

Логинов Дмитрий Александрович – Начальник отдела ООО Сибниуглеобогащение.

References

1. Zhou H, Bhattarai R, Li Y, et al. Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment*. 2022;804:149985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>.

2. Kapustyanskii A.A. Study of flame combustion of off-design binary coal blends in steam boilers. *Thermal Engineering*. 2017; 64(7):534–541. DOI 10.1134/S0040601517070023.

3. Roslyakov PV, Zaichenko MN, Melnikov DA, et al. Use of coals for co-combustion with Estonian shale oil. *Thermal Engineering*. 2016;63(3):188–196. doi 10.1134/S0040601516030101.

4. Greben'kov PY, Kozlov SG, Vykhristyuk MN, et al. Use of 3BR Grade Coal in BKZ-160-1,4-5 Boilers with Mill-Fans and Gas Drying. *Power Technology and Engineering*. 2017; 51(1):13–18. doi 10.1007/s10749-017-0787-y.

5. Yao H, He B, Ding G, et al. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal. *Appl. Therm. Eng.* 2019; 156:708–721. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115.

6. Zheng S, Hu Y, Wang Z, et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *J. Energy Inst.* 2020; 93(4):1373–1381. doi: 10.1016/j.joei.2019.12.007.

7. Santhosh Raaj S, Arumugam S, Muthukrishnan M, et al. Characterization of coal blends for effective utilization in thermal power plants. *Appl. Therm. Eng.* 2016;102:9–16. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.035.

8. Ma L, Yu S, Chen X, et al. Combustion interactions in oxy-fuel firing of coal blends: An experimental and numerical study. *J. Energy Inst.* 2021; 94:11–21. doi: 10.1016/j.joei.2020.10.007.

9. Wang H, Zhang J, Wang G, et al. Characteristics and kinetic analysis of co-combustion of brown coal and anthracite. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016; 126(2):447–454. doi: 10.1007/s10973-016-5557-9.

- 10.Niu S-L, Han K-H, Lu C-M. Characteristic of coal combustion in oxygen/carbon dioxide atmosphere and nitric oxide release during this process. *Energy Convers. Manag.* 2011; 52(1):532–537. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.028.
- 11.Guo L, Zhai M, Wang Z, et al. Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: Combustion performance, coking and slagging characteristics. *J. Energy Inst.* 2019; 92(3):802–812. doi: 10.1016/j.joei.2018.02.004.
- 12.Han J, Xiong Z, Zhao B, et al. A prediction of arsenic and selenium emission during the process of bituminous and lignite coal co-combustion. *Chem. pap.* 2020;74(7):2079–2089. doi: 10.1007/s11696-020-01058-9.
- 13.Zhang L, Zou C, Wu D, et al. A study of coal chars combustion in O₂/H₂O mixtures by thermogravimetric analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2016;126(2):995–1005. doi: 10.1007/s10973-016-5536-1.
- 14.Khatami R, Levendis YA. An overview of coal rank influence on ignition and combustion phenomena at the particle level. *Combust. Flame.* 2016;164:22–34. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.10.031.
- 15.Zhuikov AV, Matyushenko AI, Kuznetsov PN, et al. Thermogravimetric Analysis of the Combustion of Khakassia Coal, Pine Sawdust and their Blends. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2021;14(6):611–622. doi: 10.17516/1999-494X-0338.
- 16.Glushkov DO, Matiushenko AI, Nurpeiis AE, et al. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Process. Technol.* 2021; 223(106986). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.
- 17.Alekhnovich AN, Bogomolov VV. Use of coal blends at thermal power plants. *Power Technology and Engineering.* 2010;44(3):213–219. doi 10.1007/s10749-010-0167-3
- 18.Zheng S, Hu Y, Wang Z, et al. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *J. Energy Inst.* 2020;93:1373. doi 10.1016/j.joei.2019.12.007.
- 19.Bala-Litwiniak A, Zajemska M. Computational and experimental study of pine and sunflower husk pellet combustion and co-combustion with oats in domestic boiler. *Renew. Energy.* 2020; 162:151. doi 10.1016/j.renene.2020.07.139.
- 20.Bogomolov AR, Petrov IY, Zhalmagambetova UK. Thermal Analysis of Coals from Kazakhstan Deposits. *Thermal Engineering.* 2020;67(3):165–172. doi 10.1134/S0040601520030015.
- 21.Alekhnovich AN, Bogomolov VV, Gladkov VE, et al. Slagging and deposition formation in the gas channel of a boiler. *Teploenergetika.* 1997;3:64–68.
- 22.Alekhnovich AN, Talova VM, Bogomolov VV, et al. Investigations of power-generating coals by the method of chemical fractionation and an estimate of their fouling properties. *Thermal Engineering.* 2001;48(5):401–409.

Authors of the publication

Andrey V. Zhyukov - Siberian Federal University.

Anatoly I. Matyushenko - Siberian Federal University.

Vladimir A. Kulagin - Siberian Federal University.

Dmitry A. Loginov - OOO Sibnii and Glebobobstep.

Получено

15.08.2022г.

Отредактировано

29.08.2022г.

Принято

07.09.2022г.

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ



УДК 531.01

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165

ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПОРНО- ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА СТРЕЖНЕВЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Блинов А.О., Борисов* А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С.
филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, Россия
*ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Резюме: на основе произведенного статистического анализа публикаций и патентов, расположенных в базе РИНЦ, по ключевым словам, «экзоскелет», «антропоморфный робот», «бионический протез» установлен интерес к теме исследования, выраженный в значительном росте публикаций в последние годы. Выявлено, что большинство моделей используют абсолютно твердые звенья в виде стержней. **ЦЕЛЬ.** Выявление и исследование проблем, возникающих при моделировании робототехнических систем антропоморфного типа. **МЕТОДЫ.** Используются методы математического моделирования, анализа, сравнения с биологическим прототипом, робототехники, теоретической механики, электромеханики. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассмотрена проблема точности моделирования стержневыми робототехническими системами с абсолютно твердыми звеньями, звена опорно-двигательного аппарата человека. Вычислена относительная погрешность точности аппроксимации стержнями конечности человека, сделан вывод о существенной погрешности при моделировании звеньев. Рассмотрена проблема оценки влияния вращающегося ротора электродвигателя на модель механизма. Далее рассматривается модель с учетом вращающегося ротора и редуктора. Установлено, что при моделировании стержнями антропоморфных механизмов, возникает проблема необходимости учета динамики приводов. Предложена электромеханическая модель звена с двигателем постоянного тока. Установлен значительный рост затрат энергии при движении звена, в сравнении с моделью идеального шарнира, в котором создается требуемый управляющий момент, что представляет проблему. Предлагается частичное решение выявленных проблем с помощью модели звена переменной длины, содержащего три участка. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследование позволило выявить проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми робототехническими электромеханическими системами с абсолютно твердыми звеньями.

Ключевые слова: погрешность; стержень; экзоскелет; звено опорно-двигательного аппарата человека; уравнения Лагранжа второго рода; система уравнений Лагранжа-Максвелла; аппроксимация; угловые характеристики движения; управляющий момент.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Смоленской области в рамках научного проекта № 22-29-20308, <https://rscf.ru/project/22-29-20308/>

Для цитирования: Блинов А.О., Борисов А.В., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С. Проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими и электромеханическими системами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 147-165. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165.

ISSUES EMERGING IN HUMAN MUSCULOSKELETAL SYSTEM SIMULATION WITH MECHANICAL AND ELECTROMECHANICAL ROD STRUCTURES

AO. Blinov, AV. Borisov*, LV. Konchina, MG. Kulikova, KS. Maslova

Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

*ORCID 0000-0002-7004-3140, borisowandrej@yandex.ru

Abstract: Based on the statistical analysis of publications and patents located in the RSCI database for the keywords «exoskeleton», «anthropomorphic robot», «bionic prosthesis», interest in the research topic has been established, expressed in a significant increase in publications in recent years. It was revealed that most of the models use absolutely solid links in the form of rods. **GOAL.** Identification and study of problems arising in the modeling of anthropomorphic robotic systems. **METHODS.** Methods of mathematical modeling, analysis, comparison with a biological prototype, robotics, theoretical mechanics, electromechanics were used. **RESULTS.** The problem of accuracy of modeling by rod robotic systems with absolutely rigid links, a link of the human musculoskeletal system, is considered. The relative error of the accuracy of approximation by rods of a human limb is calculated, a conclusion is made about a significant error in the modeling of links. The problem of evaluating the influence of a rotating rotor of an electric motor on a mechanism model is considered. Next, the model is considered taking into account the rotating rotor and gearbox. It has been established that when modeling anthropomorphic mechanisms with rods, the problem arises of the need to take into account the dynamics of drives. An electromechanical model of a link with a DC motor is proposed. A significant increase in energy costs during the movement of the link has been established, in comparison with the model of an ideal hinge, in which the required control moment is created, which is a problem. A partial solution of the identified problems is proposed using the model of a variable length link containing three sections. **CONCLUSION.** The study made it possible to identify problems that arise when modeling the human musculoskeletal system with rod robotic electromechanical systems with absolutely solid links.

Keywords: accuracy; rod; exoskeleton; human musculoskeletal link; equations of the motion in the form of Lagrange equations of the second kind; system of Lagrange-Maxwell equations; approximation; angular properties of the motion; controlling torque.

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation and Smolensk region № 22-29-20308, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20308/>

For citation: Blinov AO, Borisov AV, Konchina LV, Kulikova MG, Maslova KS. Issues emerging in human musculoskeletal system simulation with mechanical and electromechanical rod structures. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(5):147-165. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-147-165.

Введение

Создание комфортабельной инфраструктуры для людей с ограниченными двигательными возможностями возможно только при условии создания высокотехнологичной продукции робототехники, обеспечивающей повышение эффективности работы организма человека за счет вертикализации в целом, улучшения физической и социальной адаптации. Разработка механических и 3D-моделей человеко-машинных систем в виде бионических протезов и экзоскелетов, обеспечивающих устойчивое, целенаправленное, комфортабельное передвижение в нем человека и доступного для непосредственной технической реализации, является актуальной проблемой, стоящей перед исследователями и конструкторами.

Экзоскелеты являются результатом интеграции людей и роботизированных механизмов. Антропоморфные роботы, экзоскелеты и бионические протезы разрабатываются достаточно активно в последнее время, о чем свидетельствует большое количество публикаций, описанных в работах [1] и патентов по этим темам.

Актуальность разработки антропоморфных роботов, экзоскелетов и активных управляемых протезов в России прослеживается по количеству публикаций в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), значительно возросших в последние годы (рис. 1). На рисунке 1 представлены графики результатов поисков по ключевому слову «экзоскелет» (с маркерами в виде квадратов), «антропоморфный робот» (с маркерами в виде треугольников), «бионический протез» (с маркерами в виде кругов) с учетом морфологии публикаций. На рисунке 2 представлено количество патентов вместе с зарегистрированными программами с аналогичными маркерами, в которых учтены модели, соответствующие экзоскелетам для человека или их частям. В данное количество попало и некоторое количество близких научно-популярных публикаций, однако, так как речь идет о процессе роста популярности рассматриваемой темы, то они были включены, так как свидетельствуют о внимании к этой проблеме.

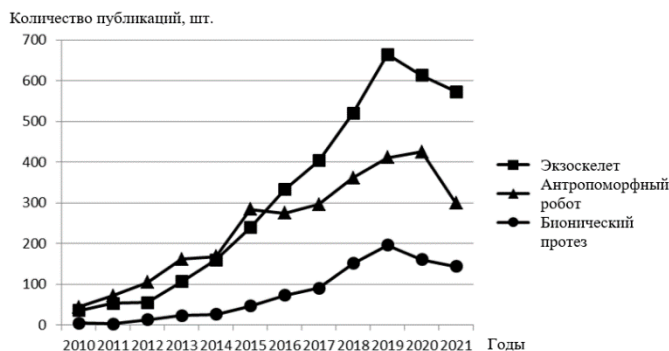


Рис. 1. Количество всех публикаций в системе РИНЦ за последние годы

Fig. 1. Number of all publications in the RSCI system in recent years

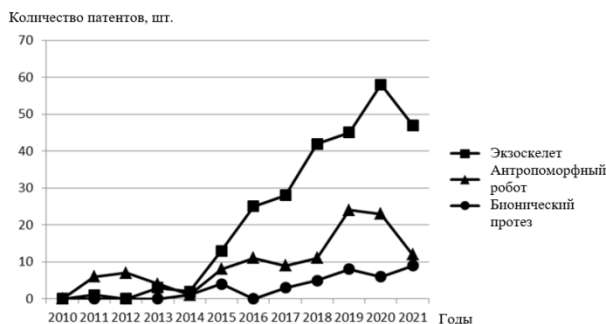


Рис. 2. Количество патентов в системе РИНЦ за последние годы

Fig. 2. Number of patents in the RSCI system in recent years

Из рисунка 1 видно, что интенсивный рост публикаций по исследуемым темам начался после 2011 года. Следует отметить, что до 2015 года количество публикаций по теме «антропоморфный робот» было больше, нежели по теме «экзоскелет», а затем количество работ об экзоскелетах увеличилось. Публикации по теме «бионический протез» впервые появляются только в 2012 году и с тех пор их количество только растет. Увеличение количества патентов (рис. 2) по теме «экзоскелет» начинается с 2015 года, до этого число патентов по теме «антропоморфный робот» превышало количество патентов по теме «экзоскелет». Количество патентов по теме «бионический протез» не превышает десяти в год и появляться они стали в последние шесть лет. Проведенный анализ публикационной активности свидетельствует о том, что практические применения моделей антропоморфных механизмов в виде экзоскелетов стало чрезвычайно важным, актуальным, востребованным и в настоящее время значительно опережает создание антропоморфных роботов. Некоторый спад в 2020-2021 годах очевиден и не связан с научными исследованиями. Таким образом, с каждым годом все большее количество научных работников и инженеров начинает работать в области создания экзоскелетов, антропоморфных роботов, бионических протезов. Значительный рост исследований по данной тематике объясняется технологическими возможностями, появившимися в

последнее время для создания новых моделей антропоморфных механизмов. Это – создание доступных мощных вычислительных систем, датчиков, новых материалов, методов управления, что подтверждается запаздывающим ростом количества патентов после роста теоретических разработок. Существенное значение имеют широта областей применения экзоскелетов в медицине, промышленности, сельском хозяйстве, военном и спасательном деле, в космосе, в быту и значительные перспективы коммерциализации проектов по их разработке.

Литературный обзор

Важность использования экзоскелетов в медицине [2, 3] можно оценить по следующим направлениям применения:

- восстановление опорно-двигательного аппарата человека после травм (рис. 3 а);
- восстановление подвижности и тренировка мышц людей после инсульта, больных рассеянным склерозом;
- восстановление подвижности и социализации парализованных людей;
- восстановление ослабевающих функций опорно-двигательного аппарата у пожилых людей, которым трудно ходить вследствие естественных возрастных изменений;
- физиотерапия и реабилитация пациентов после операций на опорно-двигательном аппарате;
- в спортивной медицине для реабилитации после нагрузок;
- в тренировочном процессе спортсменов;
- для помощи детям со спинальной мышечной атрофией (рис. 3 б);
- лечение детей с детским церебральным параличом;
- разгрузка и поддержка опорно-двигательного аппарата хирурга при выполнении продолжительных операций;
- помощь медицинскому персоналу при уходе за лежачими больными (рис. 3 в).



Рис. 3. Примеры экзоскелетов, используемых в медицине Fig. 3. Examples of exoskeletons used in medicine

Применение экзоскелетов [4] на транспорте, в промышленности (рис. 4 а), военно-промышленном комплексе (рис. 4 б) [5], освоении космического пространства, сельском хозяйстве [6] (рис. 4 в) [7], строительстве, повседневной жизни человека в его быту обусловлено следующими причинами:

- ограниченные силовые способности опорно-двигательного аппарата человека при подъеме и переносе тяжестей;
- низкая выносливость и время работы при выполнении однотипных движений, особенно в неудобной позе, например, с поднятыми вверх руками;
- профессиональные заболевания опорно-двигательного аппарата;
- травмы и внешние неблагоприятные воздействия.

¹ https://zdrav-nnov.ru/images/2019/04.09.2019_2.jpg

² <https://maxonmotoraust.files.wordpress.com/2018/06/exoskeleton-for-children-maxon-dc-motors.jpg?w=412>

³ <https://novate.ru/files/fusai/atlas-1.jpg>

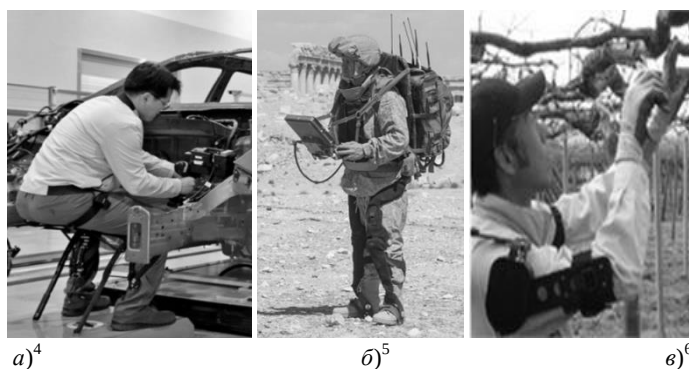


Рис. 4. Примеры экзоскелетов, используемых в промышленности, армии, сельском хозяйстве

Fig. 4. Examples of exoskeletons used in industry, army, agriculture

Следовательно, тема создания экзоскелетов для повсеместного внедрения является актуальной и востребованной, так как экзоскелеты являются высокоэффективными в технологическом, потребительском, медицинском, реабилитационном и экономическом плане устройствами. Экзоскелеты способны совмещать в одном устройстве несколько полезных свойств одновременно. Например, усиление физических возможностей человека, повышение выносливости, увеличение продолжительности времени работы в нем, защиту от травм, профессиональных заболеваний, широту использования и удовлетворение требованиям технологичности.

Исходя из перечисленных особенностей, экзоскелеты широко распространятся и будут высокоэффективно применяться в большинстве отраслей глобальной экономико-производственной системы.

Материалы и методы

Точность аппроксимации биологических прототипов стержневыми механическими системами. Вопросы точности моделирования движений антропоморфных механизмов являются важными и актуальными вследствие практической необходимости синхронного копирования экзоскелетом движения человека с минимальным запаздыванием. Это обеспечит комфортабельное использование экзоскелета. Оценки точности движений и необходимого количества звеньев рассмотрены в работах Борисова А.В., Чигарева А.В. и соавторов [8-10]. В данном параграфе рассмотрим вопрос о том, насколько точно стержень моделирует распределенное звено, например голень или бедро опорно-двигательного аппарата человека. В теоретической механике применяется подход, использующий аппроксимацию абсолютно твердого тела системой материальных точек, жестко соединенных друг с другом, т.е. масс, связанных стержнями. Желательно, чтобы при этом исходное тело и аппроксимирующая стержневая система были эквивалентны друг другу в смысле геометрии масс, т.е. $m_1 = m_2$, $I_1 = I_2$ и динамики, чтобы вели они себя эквивалентным образом [11].

В случае деформируемых тел, к которым относятся отдельные звенья опорно-двигательного аппарата человека в интегральном смысле: мышцы, кость, суставы с учетом сложной геометрии их формы и значимого изменения расстояния между осями вращения, также используется аппроксимация стержневой системой, в узлах которой имеются точечные массы, соединяющиеся друг с другом стержнями. Стержни в общем случае работают на изгиб, кручение, сжатие-растяжение. В механической системе с изменяемой геометрией в шарнирах необходимы повороты стержней. Они осуществляются с помощью шарниров. Возможен разрыв некоторых связей, возникают кинематические цепи [12].

При исследовании биомеханических систем, являющихся непрерывными, можно перейти к дискретным стержневым системам. Такой подход широко используется в машиностроении. Этот метод можно применить для исследования и моделирования биологических систем. Стержневая дискретная система должна подчиняться тем же законам, что и непрерывная. Рассмотрим преобразование фундаментальных законов при таком переходе.

⁴ <https://robroy.ru/images/hyundai-ispyityivaet-probnyie-vspomogatelnyie-ekzoskeletyi.jpg>

⁵ https://phototass2.cdnvideo.ru/width/1920_63600a28/tass/m2/uploads/i/20190121/4929654.jpg

⁶ <https://cdn.jvejournals.com/articles/17391/xml/img7.jpg>

1) Макроскопическая масса тела должна сохраняться.

$$m = \iiint_V \rho(x, y, z) dV \approx \sum_{k=1}^n m_k. \quad (1)$$

Плотность некоторого объема сплошного тела с точками, имеющими координаты (x, y, z) , проектируется в точечную массу, с номером k с координатами (x_k, y_k, z_k) . В итоге, получается сосредоточенная масса.

Следовательно, при переходе от непрерывной к дискретной модели сохраняется масса тела. Однако, распределение масс определяется, вообще говоря, неоднозначно. Возникает вопрос об адекватности и единственности такого преобразования. Деформируемое твердое тело имеет бесконечное число степеней свободы. Если его заменить стержневой системой с сосредоточенными массами, то возникает неопределенность, связанная с такой заменой. Если ввести подвижность шарниров, то это делает задачу еще более неопределенной. Чем больше число степеней свободы в стержневой системе с сосредоточенными массами, тем больше неопределенность аппроксимации такой системой деформируемого твердого тела. Поэтому необходимо, чтобы совпадали центры масс и моменты инерции.

2) Сохраняется геометрия масс, положение центра масс:

$$C_{\text{конт}}(x, y, z) = C_{\text{дискр}}(x, y, z). \quad (2)$$

Для непрерывного и дискретного тела радиус-векторы центра масс равны:

$$\bar{r}_C = \frac{\iiint_V \bar{r} \rho(\bar{r}) dV}{\iiint_V \rho(\bar{r}) dV} \approx \frac{\sum_{k=1}^n \bar{r}_k m_k}{\sum_{k=1}^n m_k}. \quad (3)$$

3) Моменты инерции одинаковы:

$$I_C = \iiint_V \bar{\xi}^2 \rho(\bar{r}) dV = \sum_{k=1}^n \bar{\xi}_{kC}^2 m_k, \quad (4)$$

где: $\bar{\xi}$ – расстояние от центра масс до k -той точки:

$$\bar{\xi} = \bar{r} - \bar{r}_C. \quad (5)$$

Аналогично должны быть равны моменты инерции относительно осей координат, проходящих через центр масс сплошного тела и дискретной системы.

$$I_{ij}^{\text{конт}} \approx I_{ij}^{\text{дискр}}. \quad (6)$$

Если считать, что форма звеньев в сплошном теле является цилиндрической, то в модели цилиндр можно заменить стержнем. Следовательно, и момент инерции цилиндра заменяем на момент инерции стержня.

Момент инерции сплошного цилиндра радиусом R и длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии цилиндра и проходящей через его центр масс, равен [13]:

$$I_{\text{cyl}} = m \left(\frac{R^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right). \quad (7)$$

Осевой момент инерции стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии стержня и проходящей через его центр масс, равен:

$$I_{\text{rod}} = \frac{ml^2}{12}. \quad (8)$$

Тем самым можно найти абсолютную погрешность приближения цилиндра стержнем, как модуль разности соответствующих моментов инерции:

$$|I_{\text{cyl}} - I_{\text{rod}}| = \frac{mR^2}{4}. \quad (9)$$

Относительная погрешность для момента инерции определяется выражением:

$$\delta = \frac{|I_{\text{cyl}} - I_{\text{rod}}|}{I_{\text{rod}}} = 3 \frac{R^2}{l^2}. \quad (10)$$

Таким образом, погрешность тем больше, чем больше радиус цилиндра и меньше его

длина. Например, для бедра $R \approx 0.08$ м, $l \approx 0.48$ м, погрешность равная $\delta = 0,083 > 0,05$, является достаточно значимой, следовательно, пренебречь цилиндрической формой звена, можно только снижая точность модели.

Так как звено опорно-двигательного аппарата человека также похоже на конус, проведем анализ погрешности аппроксимации конуса стержнем. Момент инерции сплошного конуса радиусом R и длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии конуса и проходящей через его центр масс, равен:

$$I_{cone} = 3m \left(\frac{R^2}{20} + \frac{l^2}{80} \right). \quad (11)$$

Момент инерции стержня длиной l относительно оси, перпендикулярной продольной оси симметрии стержня и проходящей через его центр масс, определяется выражением (8).

Абсолютную погрешность приближения конуса стержнем, можно найти, как модуль разности соответствующих моментов инерции:

$$|I_{cone} - I_{rod}| = \left| \frac{3mR^2}{20} - \frac{11ml^2}{240} \right|. \quad (12)$$

Тогда относительная погрешность для момента инерции равна:

$$\delta = \frac{|I_{cone} - I_{rod}|}{I_{rod}} = \left| \frac{9R^2}{20l^2} - \frac{11}{20} \right|. \quad (13)$$

Таким образом, погрешность ведет себя сложнее, нежели в случае с цилиндром. Для анализа полученного результата введем безразмерную величину $\chi = \frac{R}{l}$ тогда:

$$\delta = \left| \frac{9}{20} \chi^2 - \frac{11}{20} \right|. \quad (14)$$

Построим график (рис. 5) относительной погрешности в виде (14).

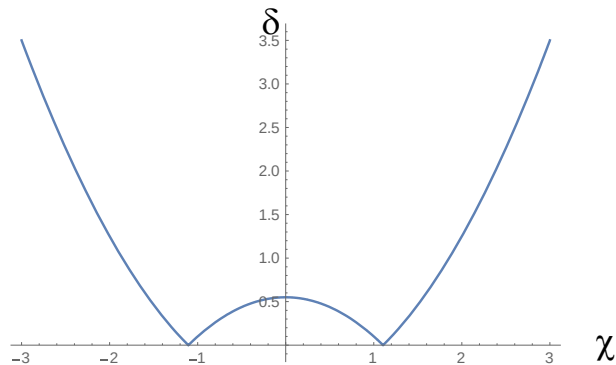


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности от отношения радиуса основания конуса R к его длине l

Fig. 5. Dependence of the relative error on the ratio of the radius of the base of the cone R to its length l

Полученный график показывает, что есть значение величины χ , при котором погрешность обращается в ноль. Это значение по модулю равно $\frac{\sqrt{11}}{3}$. То есть, при оптимальном отношении между длиной конуса и радиусом основания $R \approx 1,1 \cdot l$ стержень будет точно аппроксимировать конус. Если отношение $\frac{R}{l}$ будет уменьшаться относительно значения $\chi = \frac{\sqrt{11}}{3}$, что соответствует случаю увеличения длины конуса или уменьшению радиуса его основания, погрешность будет увеличиваться по параболе, достигая своего максимума $\delta = \frac{11}{20}$ при $\chi \rightarrow 0$, что физически соответствует случаю $R \ll l$. При увеличении отношения $\frac{R}{l}$ относительно значения $\chi = \frac{\sqrt{11}}{3}$ погрешность будет

неограниченно увеличиваться по параболе. Этот случай соответствует увеличению радиуса основания конуса при уменьшении его длины, что не реализуется для звеньев опорно-двигательного аппарата человека.

Таким образом, установлено, что погрешность аппроксимации отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата человека стержнями является сопоставимой величиной, и пренебрежение ею приведет к существенным погрешностям. Это значит, что звенья экзоскелета частично могут повторять движения звеньев пользователя. Этим частично может быть объяснена некомфортность нынешних моделей экзоскелетов.

4) Жесткость в реальном деформируемом твердом теле в различных местах разная, поэтому жесткость стержней должна быть распределена так, чтобы она адекватно аппроксимировала жесткость исходной системы. Для этого необходимо применение звеньев переменной длины с управляемой жесткостью.

Чтобы решить указанные проблемы, необходимо стремиться к тому, чтобы поведение деформируемого тела и дискретной системы было близко, то есть имело аналогичную геометрию масс и жесткостные свойства.

Результаты

Влияние динамики вращающегося ротора электродвигателя в плоской модели абсолютно твердого звена.

Современной тенденцией развития антропоморфных мехатронных устройств с изменяемой геометрией и наложенными связями, благодаря росту вычислительных возможностей компьютеров и развитию алгоритмов управления, является увеличение количества степеней свободы механизмов. Указанные факторы позволят создать механизмы с большими возможностями, чем у имеющихся в настоящее время антропоморфных роботов и экзоскелетов, что обеспечивает актуальность данного исследования.

Предложенная модель антропоморфного робота и экзоскелета отличается от ранее созданных в работах Борисова А.В. тем, что используются углы между звеньями, которые соответствуют реальной работе электроприводов с редукторами, которые изменяют относительные углы между звеньями. Таким образом, целенаправленное перемещение антропоморфного механизма осуществляется за счет изменения конфигурации звеньев, внутренних усилий и налагаемых внешних связей. Предложены плоские и пространственные модели из одного, двух, трех и пяти подвижных звеньев. Для них составлены системы дифференциальных уравнений движения в форме уравнений Лагранжа второго рода с использованием локальных систем координат и матриц поворота. Такие модели, в отличие от рассмотренных ранее [4], более точно моделируют степени подвижности между звеньями, имеющиеся в опорно-двигательном аппарате человека. Поэтому можно использовать данные модели при создании не только антропоморфных роботов, но и экзоскелетов, что имеет важное практическое значение.

Рассмотрим модель механизма с одним звеном, движущимся в вертикальной плоскости (рис. 6).

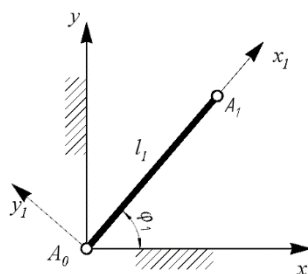


Рис. 6. Модель механизма с одним подвижным звеном и локальной системой координат, движущегося в вертикальной плоскости

Fig. 6. Model of a mechanism with one moving link and a local coordinate system moving in a vertical plane

Модель механизма, состоит из одного подвижного звена, с углами, отсчитываемыми между звеньями и двумя системами координат – абсолютной и локальной (рис. 6). Введем абсолютную неподвижную правую декартову систему координат A_0xyz , с плоскостью xA_0y , в которой происходит движение антропоморфного механизма (рис. 6). Для описания движения звена A_0A_1 введем подвижную локальную систему координат $A_0x_1y_1$, жестко

связанную со звеном. Подвижную ось A_0x_1 направим вдоль звена, ось A_0y_1 введем, исходя из условия правого базиса. В отличие от более ранних работ, в предлагаемой модели углы отсчитываются между осями локальной системой координат против хода часовой стрелки от абсолютной неподвижной системы координат к подвижной локальной системе, жестко связанной со звеном A_0A_1 .

Рассматриваемая модель механизма состоит абсолютно твердого весомого звена, представляющего собой стержень (рис. 6). Звено соединяется с опорной поверхностью посредством жестко закрепленного цилиндрического шарнира, расположенного в точке A_0 . Под действием реакции со стороны опоры, силы тяжести, управляющих усилий (не показанных на рис. 6) осуществляется поворот звена вокруг осей вращения цилиндрического шарнира. Тем самым, при заданном должным образом управлении, может быть реализовано требуемое движение механизма. Форма и длина звена: $A_0A_1 = l_1$, представляющего собой прямолинейный стержень, считаются неизменной во все время движения при любых прикладываемых нагрузках. Масса звена A_0A_1 равна m_1 . Так как звено механизма представляет собой абсолютно твердый весомый стержень, то момент инерции для него определяется, как момент инерции однородного твердого стержня. Тогда у звена A_0A_1 момент инерции относительно оси, проходящей через его начало – точку A_0 перпендикулярно плоскости движения $x_1A_0y_1$, обозначим I_1 . В силу однородности стержня $I_1 = m_1 l_1^2 / 3$. Звено A_0A_1 совершает вращательное движение в цилиндрическом шарнире A_0 . Положение звена однозначно определяется углом $\varphi_1(t)$. Обозначим через M_1 управляющий момент в шарнире A_0 . Примем за обобщенную координату угол $\varphi_1(t)$ между осями координат (рис. 6). Модель звена имеет одну степень свободы. Для реализации управляемого движения необходимо использовать один независимый привод для управления углом поворота звена. Приводы могут быть различными: гидравлическими, пневматическими, электрическими. В дальнейшей работе предполагается использовать электрические двигатели. Для управления угловыми координатами электродвигатели будут работать в паре с редукторами, понижающими обороты и увеличивающими крутящие моменты.

Кинетическая энергия механизма является энергией вращательного движения стержня A_0A_1 .

$$T = \frac{I_1 \dot{\varphi}_1^2}{2}. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение движения для рассматриваемой модели, составленное с использованием уравнений Лагранжа второго рода имеет вид.

$$I_1 \ddot{\varphi}_1 + (1/2)m_1 l_1 g \cos \varphi_1 = M_1. \quad (16)$$

Оценим управляющий момент, необходимый для целенаправленного антропоморфного движения звена и осуществления подбора электродвигателя, используя уравнение (16). Для этого применим метод программного управления движением. Определим аналитически угол в виде периодической дифференцируемой функции, синтезирующей антропоморфное движение звена. Предположим, что моделируется движение голени опорной ноги человека. Тогда траектория его движения может быть задана следующей функцией [14]:

$$\varphi_1(t) = \pi/2 + j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2], \quad (17)$$

где: T – период ходьбы, j_1 и f_1 – параметры ходьбы.

Выберем числовые характеристики механизма, соответствующими значениям для голени человека, информация о которых приводится в монографии [15]. Длина звена $l_1 = 0.385$ м, масса звена $m_1 = 2.91$ кг, момент инерции звена определим, исходя из формулы момента инерции стержня для оси, проходящей перпендикулярно через его конец $I_1 = m_1 l_1^2 / 3 = 0.144$ кг·м². Ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с². Время, в течение которого происходит одноопорная фаза шага, т.е. половина периода ходьбы $t_k = 0.36$ с. Параметры ходьбы: $j_1 = 0.25$, $f_1 = \pi/2$.

Приведем графики угла поворота (17) звена и его первой и второй производных – угловой скорости и углового ускорения звена (рис. 7).

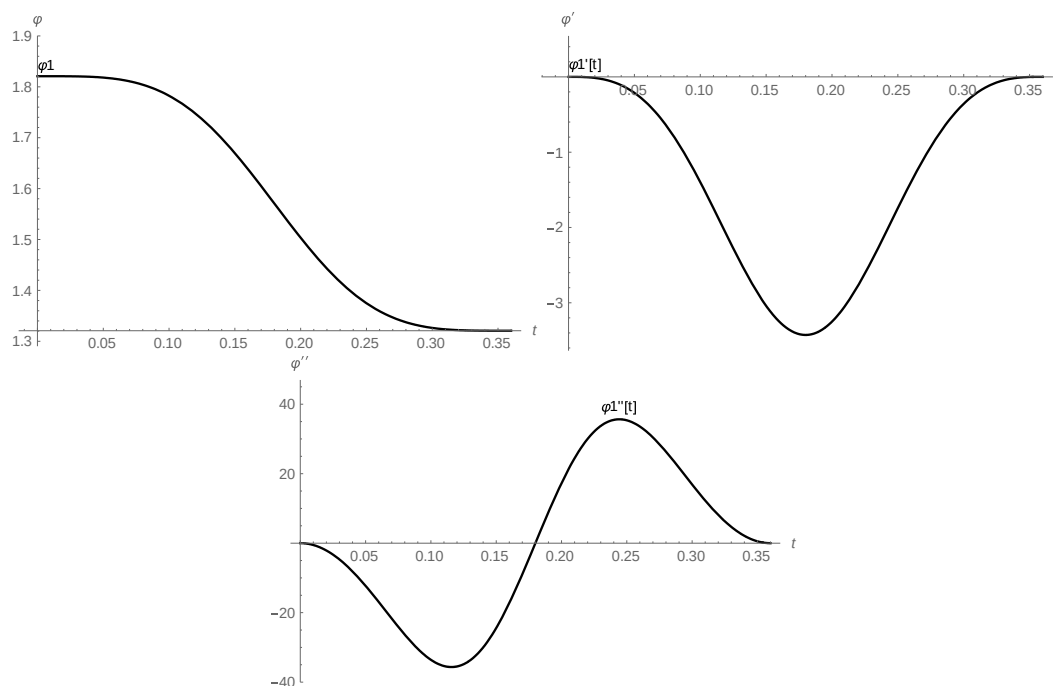


Рис. 7. Графики угла поворота φ_1 , угловой скорости $\dot{\varphi}_1$ и углового ускорения $\ddot{\varphi}_1$ звена от времени

Fig. 7. Graphs of the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link from time

Синтезируем анимацию движения звена (рис. 8).

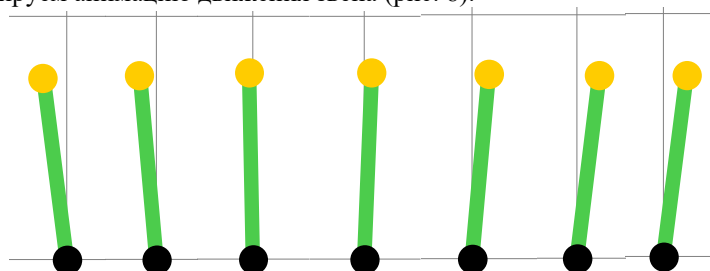


Рис. 8. Кадры анимации звена при движении по заданному в виде (17) углу φ_1

Fig. 8. Animation frames of the link when moving along the φ_1 angle specified in the form (17)

Из уравнения (16), решая обратную задачу динамики, находим управляющий момент (рис. 9).

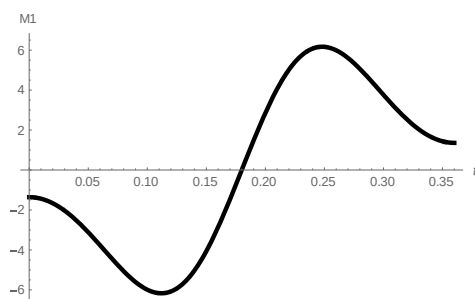


Рис. 9. График управляющего момента M_1 от времени

Fig. 9. Graph of the control moment M_1 against time

Максимальное значение управляющего момента $M_1 = 6,167$ Н·м, используем для подбора электродвигателя и редуктора.

Рассмотрим электромеханическую модель привода звена, состоящую из электродвигателя с редуктором, расположенными в неподвижном шарнире A_0 . Пусть ось вращения звена и ротора двигателя расположены на одной прямой. Рассмотрим влияние инерционных характеристик двигателя на дифференциальное уравнение движения (16). Так как двигатель с редуктором жестко закреплены и неподвижны, то их масса не дает вклад в

кинетическую энергию движения звена. Подвижным является ротор электродвигателя, совершающий в данном случае вращательное движение вокруг неподвижной оси, расположенной в точке A_0 . Его вклад в кинетическую энергию всей электромеханической системы учтем следующим образом [16]:

$$T_R = \frac{I_R k_R^2 \dot{\varphi}_1^2}{2}, \quad (18)$$

где I_R – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_R – передаточное число редуктора.

Вкладом в кинетическую энергию вращающихся элементов редуктора пренебрежем, т.к. конструкции редукторов бывают разными и здесь не конкретизируются, но обычно их масса и момент инерции гораздо меньше, чем у ротора электродвигателя. Также пренебрежем трением в подшипниках всех вращающихся элементов механизма.

Так как электродвигатель закреплен на горизонтальной поверхности, он не перемещается вдоль вертикали и его элементы не дают вклада в потенциальную энергию гравитационного взаимодействия. Таким образом, уравнение движения (16) принимает вид:

$$(I_1 + I_R k_R^2) \ddot{\varphi}_1 + (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 = M_1. \quad (19)$$

Управляющий момент M_1 – это момент на выходном валу редуктора, определенный выше из уравнения (16). Таким образом, проведен анализ влияния двигателя на механическую подсистему уравнений движения.

Проведем решение модельной задачи Коши для уравнения (19) с выбранным на основе рисунка 9 моментом, аппроксимируемым в виде ступенчатой кусочно-заданной функции. Разобьем время движения на шесть равных участков, на каждом из которых момент будем брать постоянным, а его значение подсчитаем как среднее арифметическое на данном участке.

$$M_\gamma = \frac{\int_{t_{\gamma-1}}^{t_\gamma} M_1(t) dt}{t_\gamma - t_{\gamma-1}}. \quad (20)$$

Здесь γ – ранжированная переменная, задающая участок разбиения. Разобьем на время движения на шесть участков $\gamma = 1, 2, \dots, 6$. График ступенчатой функции (20) для управляющего момента, полученного в результате решения обратной задачи (рис. 9), представлен на (рис. 10).

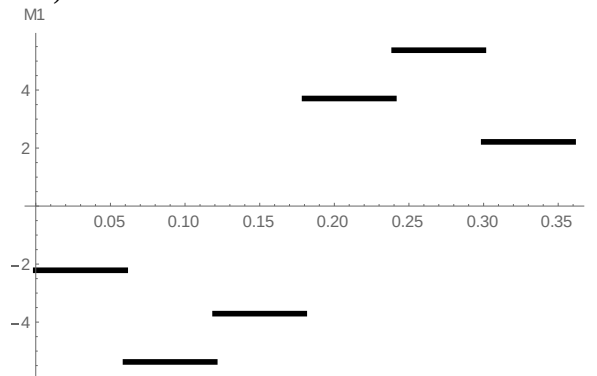


Рис. 10. График аппроксимации ступенчатой функцией управляющего момента M_1 от времени

В результате решения задачи Коши для уравнений (16) и (19) с управляющим моментом в виде ступенчатой функции, представленным на (рис. 10), получены следующие зависимости угла поворота звена от времени, показанные на (рис. 11). Сплошная линия представляет решение уравнения (16), пунктирная – (19).

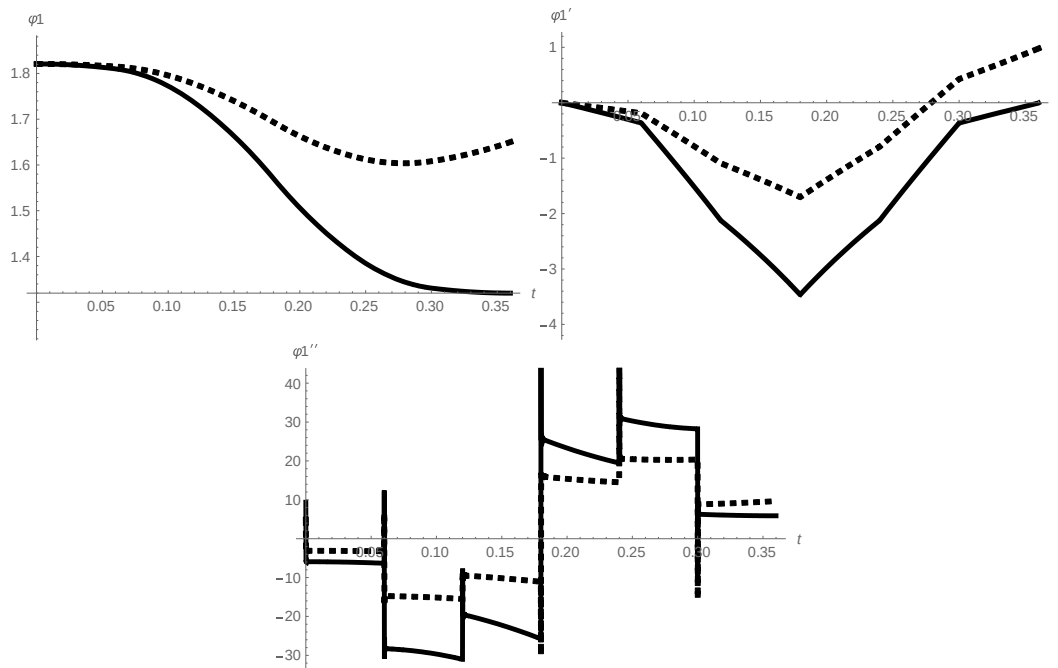


Рис. 11. Результаты решения задачи Коши – найденные угол поворота φ_1 , угловая скорость $\dot{\varphi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}_1$ звена

Fig. 11. The results of solving the Cauchy problem - found the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link

В результате полученного численного решения дифференциального уравнения (16), представленного сплошной линией на (рис. 11) сравнивая с исходным движением звена (рис. 7), видно, что получилось практически полное совпадение угла поворота, достаточно хорошее совпадение угловой скорости и приемлемое совпадение углового ускорения. Следовательно, импульсное управление в виде ступенчатой функции управляющего момента (рис. 10) является приемлемым и может быть использовано при управлении движением звена.

Решение дифференциального уравнения (19), в котором учтены инерционные характеристики ротора электродвигателя и передаточное число редуктора, представленное на (рис. 11) пунктирной линией, показывает значительные расхождения с исходным движением (рис. 7) особенно в конце интервала времени. Это представляет собой существенную проблему при оценке адекватности модели без учета динамики подвижных частей привода в стержневых механических системах. Однако, при этом, качественное поведение и вид всех кинематических характеристик остается прежним, если сравнивать с движением, полученным в результате численного решения задачи Коши для уравнения (16). Это свидетельствует о том, что пренебрегать вращением ротора электродвигателя нельзя, т.к. его вклад в динамику звена оказывается существенным. В этом случае имеем недостаточное управляющее воздействие для синтеза заданного движения механизма, следовательно, необходимо увеличивать управляющий момент.

Затраты энергии при анализе антропоморфной ходьбы, можно вычислить как работу управляющих моментов в предположении об отсутствии сил сопротивления и рекуперации энергии при торможении звена.

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^k |M_i| dt. \quad (21)$$

Здесь T – время одного шага, M_i – моменты, развиваемые приводами аппарата, k – число независимых приводов.

В результате применения формулы (21) к расчету энергетических затрат приводов, осуществляющих повороты звеньев при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций, имеем: $A_{\varphi_1} = 3.77$ Дж, являющиеся суммарными энергозатратами механизма.

Электромеханическая модель звена с электрическим двигателем постоянного тока. Введем электрическую часть управления движением электродвигателя. Уравнения

движения с электрической подсистемой записываются в виде уравнений Лагранжа-Максвелла [17-20].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi_1} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{\varphi}_1} = 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{i}_1} \right) + \frac{\partial \Phi}{\partial i_1} = U_1. \end{cases} \quad (22)$$

Функции Лагранжа и Релея для рассматриваемой модели звена экзоскелета могут быть записаны в виде.

$$L = \frac{1}{2} (I_1 + I_R k_R^2) \dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2} L_1 \dot{i}_1^2 + c_1 k_R \varphi_1 \dot{i}_1 - \frac{1}{2} m_1 l_1 g \sin \varphi_1, \quad (23)$$

$$\Phi = \frac{1}{2} R_1 i_1^2. \quad (24)$$

Тогда система уравнений движения предложенной электромеханической модели имеет вид.

$$\left\{ \frac{1}{c_1 k_R} \left[(I_1 + I_R k_R^2) \ddot{\varphi}_1 + (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 \right] = \dot{i}_1, \right. \quad (25)$$

$$\left. L_1 \dot{i}_1 + c_1 k_R \dot{\varphi}_1 + R_1 i_1 = U_1. \right. \quad (26)$$

Здесь R_1 , L_1 – обобщенные сопротивление и индуктивность обмоток ротора электродвигателя, c_1 – коэффициент электромеханического взаимодействия, $i_1 = i_1(t)$ – ток во внешней цепи ротора, $U_1 = U_1(t)$ – подаваемое на двигатель напряжение, I_R – момент инерции ротора электродвигателя относительно оси вращения, k_R – передаточное число редуктора.

Система уравнений (25)-(26) может быть преобразована подстановкой выражения для силы тока i_1 из уравнения (25) и ее производной в (26) к одному дифференциальному уравнению движения звена экзоскелета.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c_1 k_R} \left[(I_1 + I_R k_R^2) L_1 \ddot{\varphi}_1 + (I_1 + I_R k_R^2) R_1 \dot{\varphi}_1 + \right. \\ & \left. + (c_1^2 k_R^2 - (1/2) L_1 l_1 m_1 g \sin \varphi_1) \dot{\varphi}_1 + R_1 (1/2) m_1 l_1 g \cos \varphi_1 \right] = U_1. \end{aligned} \quad (27)$$

Управляющим параметром в системе будет напряжение. Незвестной искомой функцией является угол поворота звена φ_1 .

Исходя из максимальных значений момента нагрузки и скорости, в качестве примера выбираем подходящие электродвигатель и редуктор из номенклатуры выпускаемых в настоящее время. В результате подбора, выбираем двигатель постоянного тока серии DCX26L и планетарный редуктор серии GPX32 компании Maxon⁷. Момент инерции ротора электродвигателя $I_R = 1,97 \cdot 10^{-6}$ кг·м², передаточное число редуктора $k_R = 231$, номинальное напряжение $U_1 = 48$ В, сопротивление якоря $R_1 = 0,87$ Ом, индуктивность якоря $L_1 = 2,06 \cdot 10^{-3}$ Гн. Коэффициент электромеханического взаимодействия входит в уравнения (2.6) в виде произведения с передаточным числом редуктора, поэтому определим его совместно [18,20]:

$$c_1 k_R = \frac{M_{1P}}{U_1}. \text{ Пусковой момент на выходе редуктора оценим по формуле: } M_{1P} \approx \frac{g m_1 l_1}{2}.$$

Таким образом, получаем: $c_1 k_R = \frac{g m_1 l_1}{2 U_1} \approx 0,115$ Н·м/В, $c_1 \approx 4,98 \cdot 10^{-4}$ Н·м/В. Начальные условия имеют вид $\varphi_1(0) = 1,82$ рад, $\dot{\varphi}_1(0) = 0$ рад/с, $\ddot{\varphi}_1(0) = 0$ рад/с².

Используем программное управление движением модели, заданное формулой (17) и представленное на графиках (рис. 7). Используя их, решая прямую задачу динамики для системы уравнений движения (25)-(26), находим зависимости силы тока и напряжения графики которых представлены на (рис. 12).

⁷ <https://www.maxongroup.com/maxon/view/content/index>

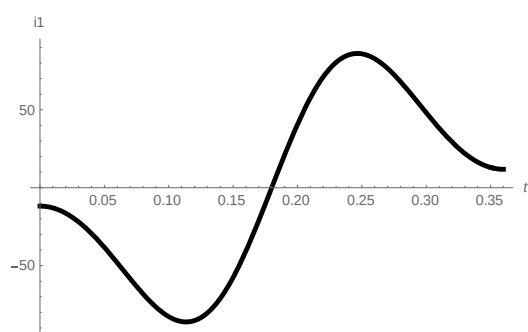


Рис. 12. Зависимости силы тока и напряжения от времени

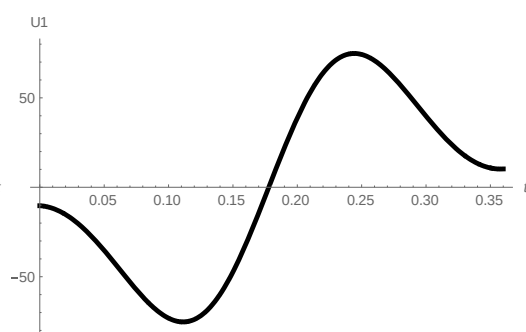


Fig. 12. Dependences of current and voltage on time

Далее, полученные зависимости силы тока и напряжения от времени были аппроксимированы ступенчатыми функциями (рис. 13).

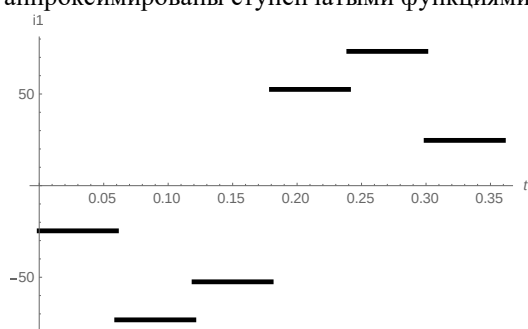


Рис. 13. График аппроксимации ступенчатой функцией силы тока и напряжения от времени

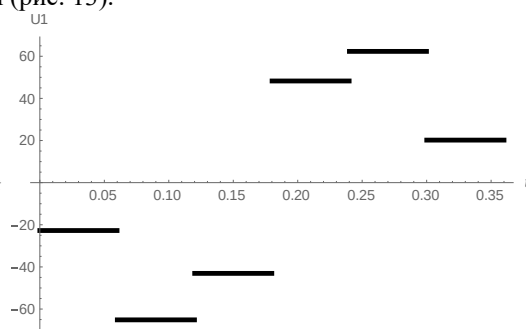


Fig. 13. Graph of approximation by a step function of current and voltage versus time

В результате решения задачи Коши для уравнения (27) с управляющим напряжением в виде ступенчатой функции, представленным на (рис. 13), получены следующие зависимости угла поворота звена от времени, показанные на (рис. 14).

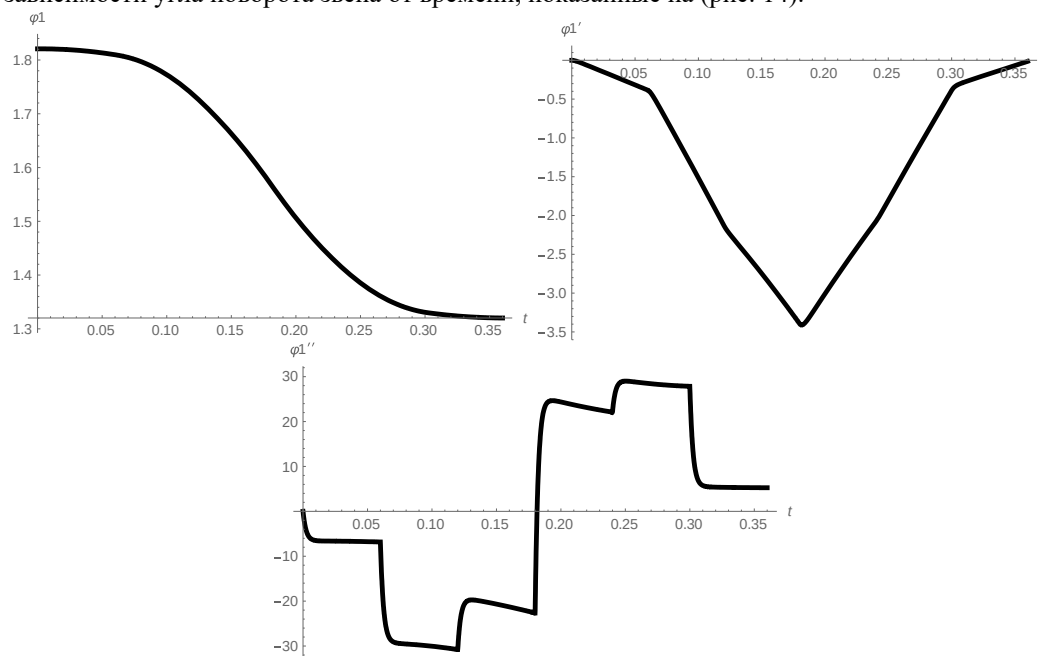


Рис. 14. Результаты решения задачи Коши — найденные угол поворота φ_1 , угловая скорость $\dot{\varphi}_1$ и угловое ускорение $\ddot{\varphi}_1$ звена

Fig. 14. The results of solving the Cauchy problem - found the angle of rotation φ_1 , angular velocity $\dot{\varphi}_1$ and angular acceleration $\ddot{\varphi}_1$ of the link

Затраты энергии при анализе антропоморфной ходьбы, можно вычислить как работу управляющих моментов в предположении об отсутствии сил сопротивления и рекуперации энергии при торможении звена.

$$A = \int_0^T \sum_{i=1}^k |U_i i_i| dt. \quad (28)$$

Здесь T – время одного шага, U_i, i_i – напряжение и сила тока в электродвигателях аппарата, k – число независимых приводов.

В результате применения формулы (28) к расчету энергетических затрат приводов, осуществляющих повороты звеньев при задании управляющих моментов в виде ступенчатых функций (рис. 13), имеем: $A_{\text{ф1}} = 911.56$ Дж, являющиеся суммарными энергозатратами механизма. Таким образом, проблемой является значительная разница в затратах энергии на перемещение при идеальных моментах и приводах и на основе реального электрического двигателя.

Обсуждение

Модель звена переменной длины, состоящего из трех участков. Частичным решением выявленных выше проблем может быть модель звена переменной длины [21-24], которая лучше будет аппроксимировать свойства биологического прототипа – опорно-двигательного аппарата человека, в том числе и проблему значительных ускорений, возникающих в момент постановки переносимой ноги на неподвижную опору. Эти ускорения в случае модели с абсолютно твердыми звеньями передавались бы по организму человека, достигая головной мозг, чего в реальности не наблюдается. Введем абсолютную неподвижную правую декартову систему координат $Oxyz$, в которой происходит движение звена переменной длины (рис. 15). Введем подвижную локальную систему координат $Ox_1y_1z_1$, жестко связанную со звеном. Подвижную ось Oz_1 направим вдоль звена, две другие оси введем, исходя из условия правого базиса. Пусть звено состоит из двух массивных абсолютно твердых частей, которые совершают движение относительно друг друга вдоль направления прямой A_0A_1 (рис. 15). В точке A_0 расположен сферический шарнир, жестко соединенный с опорной поверхностью.

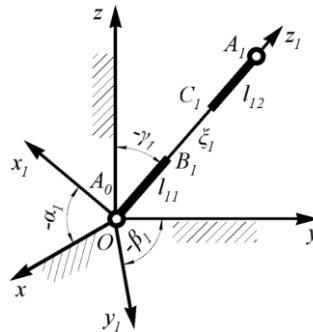


Рис. 15. Звено экзоскелета переменной длины в 3D пространстве

Fig. 15. Exoskeleton link of variable length in 3D space

Геометрические характеристики звена переменной длины: $A_0B_1 = l_1$, $C_1A_1 = l_2$, $B_1C_1 = \xi_1(t)$ размер участка переменной длины, считающегося невесомым. Пусть на участке B_1C_1 действует сила F_1 реализующая требуемое управление изменением длины звена.

Так как углы отсчитываются между осями абсолютной и локальной системы координат против хода часовой стрелки, то, в силу особенностей чертежа, на (рис. 15) углы $\alpha_1(t)$, $\beta_1(t)$, $\gamma_1(t)$ показаны в отрицательном направлении.

Положение в пространстве весомого участка C_1A_1 зависит от двух углов $\alpha_1(t)$, $\beta_1(t)$ и переменной длиной участка $\xi_1(t)$, следовательно, модель имеет три степени свободы. $M_{1\alpha}$, $M_{1\beta}$ – управляющие моменты в шарнире A_0 . Третьим управляющим параметром является сила F_1 , определяющая изменение длины участка стержня $\xi_1(t)$.

Масса участка A_0B_1 равна m_1 , момент инерции относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости движения – I_1 , участка C_1A_1 – m_2 , момент инерции относительно оси, проходящей через его конец перпендикулярно плоскости движения – I_{12} .

Кинетическая энергия звена является суммой энергий движения стержней A_0B_1 и C_1A_1 :

$$T = T_{A_0B_1} + T_{C_1A_1}, \quad (29)$$

$$2T = \dot{\xi}_1^2 m_{12} + (I_{11} + I_{12} + m_{12}(l_{11}^2 + l_{11}l_{12} + 2\xi_1 l_{11} + \xi_1 l_{12} + \xi_1^2)) \times \\ \times (\dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \beta_1 + \dot{\beta}_1^2).$$

Уравнения движения, составленные с помощью уравнений Лагранжа второго рода и применением локальной системы координат, имеют вид:

$$(I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2))(\ddot{\alpha}_1 \cos^2 \beta_1 - \\ - 2\dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 \cos \beta_1 \sin \beta_1) + m_{12} \cos^2 \beta_1 (2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\alpha}_1 + \\ + g(m_{11}l_{11} + m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1)) \cos \beta_1 = M_{1\alpha}, \quad (30)$$

$$(I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2)) \ddot{\beta}_1 + \\ + \cos \beta_1 \sin \beta_1 (I_{11} + I_{12} + m_{12}((2l_{11} + l_{12})\xi_1 + (l_{11} + l_{12})l_{11} + \xi_1^2)) \dot{\alpha}_1^2 + \\ + m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1) \dot{\xi}_1 \dot{\beta}_1 - \\ - g(m_{11}l_{11}/2 + m_{12}(l_{11} + l_{12}/2 + \xi_1)) \cos \alpha_1 \sin \beta_1 = M_{1\beta}, \quad (31)$$

$$- m_{12}(2l_{11} + l_{12} + 2\xi_1)(\dot{\alpha}_1^2 \cos^2 \beta_1 + \dot{\beta}_1^2)/2 + \\ + gm_{12} \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + m_{12} \ddot{\xi}_1 = F_{1..} \quad (32)$$

Таким образом, составлена система дифференциальных уравнений движения, описывающая модель звена экзоскелета переменной длины в пространстве. Данная модель позволит приблизить поведение стержневых систем к биомеханическим свойствам опорно-двигательного аппарата человека.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить проблемы, возникающие при моделировании опорно-двигательного аппарата человека стержневыми механическими и электромеханическими системами с абсолютно твердыми звеньями. Рассмотрены вопросы точности аппроксимации биологических прототипов стержневыми механическими системами. Установлено, что погрешность аппроксимации отдельных звеньев опорно-двигательного аппарата человека стержнями является сопоставимой величиной, и пренебрежение ею приведет к существенным неточностям модели.

Выявлено, что не следует пренебрегать влиянием подвижных частей приводов механизма на его динамику, так как на примере вращения ротора электродвигателя, показано, что он оказывает существенный вклад в движение управляемой модели звена. Возникают проблемы со значительным увеличением расхода энергии на движение, если в модели рассматривать реальный электрический двигатель постоянного тока.

Изучив недостатки моделей, основанных на абсолютно твердом звене, предложено решение указанных проблем на основе звена переменной длины, состоящего из трех участков. Для всех моделей были составлены дифференциальные уравнения движения, описывающие их поведение. Все модели были реализованы в среде универсальной системы компьютерной математики *Wolfram Mathematica* 11.3.

Литература

1. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons // (2021) Journal of Computer and Systems Sciences International, 60 (5), pp. 827-841. <https://link.springer.com/article/10.1134/S106423072104002X>
2. Tsukahara A., Hasegawa Y., Eguchi K., Sankai Y. Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2015. V. 23, №. 2. P. 308-318.
3. Павловский В.Е. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации - концепция, конструкция, модели и управление // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2014. №11. 19 с.
4. Блинов А.О., Борисов А.В., Борисова В.Л., Гончаров М.В., Гончарова И.А., Кончина Л.В., Куликова М.Г., Маслова К.С., Новикова М.А. Механика экзоскелета. Монография. Смоленск: Универсум. 2021. 220 с.

5. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., Carstairs G.L., Billing D.C., Garofolini A., Begg R.K. Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks. Hum Factors. 2020 Nov 18;18720820957467. doi: 10.1177/0018720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237.
6. Borisov A.V., Borisova V.L., Konchina L.V., Kulikova M.G., Maslova K.S. Application of active exoskeletons with touch sensing, electric drives, energy recuperators and gravity compensators in agricultural technologies // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V. 699 012019 doi:10.1088/1755-1315/699/1/012019.
7. Toshitake Araie, Tomozumi Ikeda, Uichi Nishizawa, Akira Kakimoto, Shigeki Toyama Mechanism evaluation of agricultural power assist suit under development // Vibroengineering PROCEDIA, Vol. 8, 2016, p. 328-333. <https://www.jvejournal.com/article/17391>
8. Борисов А.В., Чигарев А.В. Статистическое моделирование неточности и неповторяемости позы человека при ходьбе с использованием конфигурационной энтропии. // Математическое моделирование в области клеточной биологии, биохимии и биофизики: материалы научно-практической интернет-конференции. 25-26 ноября 2014 г. Ульяновск: SIMJET. ноябрь 2014. С. 152-158.
9. Борисов А.В., Волкова Ю.Е. Оценка точности движений при изменении количества звеньев экзоскелета и антропоморфного робота. // Естественные и технические науки. 2015. № 10(88). С. 23-26.
10. Борисов А.В., Буренин А.А., Поленов В.С., Чигарев А.В. Детерминированные и стохастические модели неоднородных сред в механике твердых тел. Монография. Под. ред. профессора Чигарева А. В. LAP LAMBERT Academic Publishing. 2020. 648 с.
11. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. 544 с.
12. Микулик Н.А. Динамические системы с реактивными звеньями. Минск: Высшая школа. 1985. 112 с.
13. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики. ч.4. Динамика. Москва: Высшая школа. 1966. 411 с.
14. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем – Киев: Наукова Думка. 1989. 192 с.
15. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота: монография. Москва: Спутник+. 2009. 212 с.
16. Колубин С.А. Динамика робототехнических систем. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 117 с.
17. Львович А.Ю. Основы теории электромеханических систем. Под ред. Н.Н. Поляхова Л. Издательство Ленинградского университета, 1973. 196 с.
18. Сирегар Х.П. Энергетические затраты при ходьбе антропоморфных роботов. Дисс. канд. технич. наук., М. 2003. 134 с.
19. Белов М.П., Чыонг Д.Д., Лань Н.В. Разработка математической модели и управление методом разделения закона управления для экзоскелета // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» № 1/2020. С. 71-77. https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-1_2020_p071-077.pdf
20. Варков А.А. Разработка и исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом на базе контроллера движения. Дисс. канд. технич. наук., Иваново. 2015. 133 с.
21. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Kulikova M., Maslova K. Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D. // Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics, 2021, vol.16, no.4, pp.122-134. DOI: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
22. Blinov A., Borisov A., Konchina L., Novikova M. Applying the models of magneto-rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness // Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.98, no.2, pp. 133-142. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
23. Borisov A.V., Chigarev A.V. Mathematical Models of Exoskeleton. Dynamics, Strength, Control. Monograph. Springer, 2022, 232 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>

24. Blinov A., Borisov A., Filippenkov K., Konchina L., Maslova K. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion // *Prikladnaya informatika=Journal of Applied Informatics*, 2022, vol.99, no.3, pp. 117-130. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130

Авторы публикации

Блинов Александр Олегович – ассистент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Борисов Андрей Валерьевич – д-р физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Кончина Лариса Владимировна – канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Куликова Марина Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра «Технологические машины и оборудование», филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

Маслова Ксения Сергеевна – студентка, филиал «Национальный исследовательский университет "МЭИ"» в г. Смоленске.

References

1. Borisov A.V., Kaspirovich I.E., Mukharlyamov R.G. On Mathematical Modeling of the Dynamics of Multilink Systems and Exoskeletons. (2021) *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2021;60(5):827-841. <https://link.springer.com/article/10.1134/S106423072104002X>
2. Tsukahara A., Hasegawa Y., Eguchi K., Sankai Y. *Restoration of gait for spinal cord injury patients using HAL with intention estimator for preferable swing speed*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2015. V. 23, №. 2. – P. 308-318.
3. Pavlovsky V.E. *Biomechatronic neurorehabilitation complex - concept, design, models and management*. Preprints of the IPM im. M.V. Keldysh - 2014. - No. 11 - 19 p.
4. Blinov A.O., Borisov A.V., Borisova V.L., et al. *Exoskeleton mechanics*. Monograph. Smolensk: Universum. 2021. 220 p.
5. Proud J.K., Lai D.T.H., Mudie K.L., et al. *Exoskeleton Application to Military Manual Handling Tasks*. *Hum Factors*. 2020 Nov 18;18720820957467. doi: 10.1177/0018720820957467. Epub ahead of print. PMID: 33203237.
6. Borisov A.V., Borisova V.L., Konchina L.V., et al. *Application of active exoskeletons with touch sensing, electric drives, energy recuperators and gravity compensators in agricultural technologies*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, V. 699 012019 doi:10.1088/1755-1315/699/1/012019.
7. Toshitake Araie, Tomozumi Ikeda, Uichi Nishizawa. *Mechanism evaluation of agricultural power assist suit under development*. Vibroengineering PROCEDIA. 2016. V. 8. p. 328-333. <https://www.jvejournal.com/article/17391>
8. Borisov A.V., Chigarev A.V. *Statistical modeling of inaccuracy and non-repeatability of human posture when walking using configuration entropy*. Mathematical modeling in the field of cell biology, biochemistry and biophysics: materials of scientific and practical internet-conference. November 25-26, 2014 - Ulyanovsk: SIMJET. - November 2014. - p. 152-158.
9. Borisov AV, Volkova YuE. Estimation of the accuracy of movements when changing the number of links of the exoskeleton and anthropomorphic robot. *Natural and technical sciences*. 2015;10(88). With. 23-26.
10. Borisov AV, Burenin AA, Polenov VS, et al. *Deterministic and stochastic models of inhomogeneous media in solid mechanics*. Monograph. Under. ed. Professor Chigarev A. V - LAP LAMBERT Academic Publishing. 2020. 648 p.
11. Kron G. *Study of complex systems in parts (diacoptics)*. M.: Nauka, 1972. 544 p.
12. Mikulik NA. *Dynamic systems with reactive links*. Minsk: Higher School. 1985. 112 p.

13. Yablonsky A.A., Nikiforova V.M. *Course of theoretical mechanics*. part 4. Dynamics. Moscow: Higher School. 1966. 411 p.
14. Berbyuk V. E. Dynamics and optimization of robotic systems - Kyiv: Naukova Dumka - 1989. - 192 p.
15. Borisov A. V. *Modeling of the human musculoskeletal system and the application of the results obtained to develop a model of an anthropomorphic robot: monograph*. - Moscow: Sputnik +. 2009. 212 p.
16. Kolyubin S.A. *Dynamics of robotic systems*. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 117 p.
17. Lvovich A.Yu. *Fundamentals of the theory of electromechanical systems*. Ed. N.N. Polyakhova L. Leningrad University Publishing House, 1973. 196 p.
18. Siregar H.P. *Energy costs when walking anthropomorphic robots*. Diss. cand. tech. nauk., M. 2003. 134 p.
19. Belov MP, Truong DD, Lan NV. *Development of a mathematical model and control of the method of separation of the control law for the exoskeleton*. pp. 71-77. https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-1_2020_p071-077.pdf
20. Varkov AA. *Development and research of a control system for a manipulative industrial robot based on a motion controller*. Diss. cand. tech. Sciences., Ivanovo. 2015. - 133 p.
21. Blinov A, Borisov A, Konchina L, et al. *Simulation of the movement of the supporting leg of an exoskeleton with two links of variable length in 3D*. *Prikladnaya informatika. Journal of Applied Informatics*. 2021;16(4):122-134. doi: 10.37791/2687-0649-2021-16-4-122-134
22. Blinov A, Borisov A, Konchina L, et al. Applying the models of magneto- rheological substances in the study of exoskeleton variable-length link with adjustable stiffness. *Prikladnaya informatika. Journal of Applied Informatic*. 2022;98(2):133-142. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-2-133-142
23. Borisov AV, Chigarev AV. *Mathematical Models of Exoskeleton*. Dynamics, Strength, Control. Monograph. Springer. 2022, 232 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-97733-7>
24. Blinov A, Borisov A, Filippenkov K, et al. Modeling the dynamics of an exoskeleton link of variable length using the Lagrange – Maxwell system of differential equations of motion. *Prikladnaya informatika. Journal of Applied Informatics*. 2022;99(3):117-130. doi: 10.37791/2687-0649-2022-17-3-117-130.

Authors of the publication

Alexander O. Blinov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Andrey V. Borisov – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Larisa V. Konchina – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Marina G. Kulikova – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Ksenia S. Maslova – Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk.

Получено 13.08.2022г.

Отредактировано 19.09.2022г.

Принято 20.09.2022г.

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



УДК 621.10+536

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178

ОЧИСТКА НЕФТИ ОТ АСФАЛЬТЕНО-СМОЛ И ПАРАФИНОВ

Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать новые методы экспресс-контроля характеристик скважинной жидкости и нефти, в частности асфальтено-смола и парафинов (АСП). Задача актуальна, поскольку из-за ухудшения свойств нефтестов АСП сопровождается явлением возникновения асфальто-смолисто-парафиновых отложений, что приводит к осложнению добычи нефти, увеличению расхода энергии и износу оборудования. Разработать технологию и установку удаления АСП из нефти воздействиями физических полей. **МЕТОДЫ.** Для разработки методик измерения физико-химических свойств нефти использовался метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), являющийся неконтактным и не требующим подготовки пробы. Для удаления АСП из нефти использовались: вращающееся магнитное поле, неоднородные переменные электрические и центробежные поля, отстой водонефтяной эмульсии. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработаны методики экспресс-контроля концентраций АСП, воды и дисперсного распределения капель воды в водонефтяной эмульсии. Получены экспериментальные соотношения между концентрациями асфальтено-смола, парафинов и временами спин-спиновой релаксации, позволяющие по параметрам ПМР определять характеристики нефти. Теоретически обоснована технология удаления АСП из нефти; описаны силы, действующие на капли водного раствора реагентов с АСП, во вращающемся магнитном и неоднородных переменных электрических полях. Разработана структурно-функциональная схема установки для удаления АСП из нефти, управляемая от разработанного релаксометра ПМР. Произведен расчет источника вращающегося магнитного поля, его оптимизация, физическое и математическое моделирование работы в MatlabSimulink. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Обзор методического и приборного оснащения нефтяных месторождений показал, что контроль АСП осуществляется в лабораториях и длителен по времени, инструментальный метод определения и удаления АС отсутствует. Получены экспериментальные уравнения для измерения концентраций асфальтено-смола в диапазоне 0-30% с относительной погрешностью $\approx \pm 2\%$, концентраций парафинов в диапазоне 0-30% с относительной погрешностью $\approx \pm 3\%$ и дисперсного распределения капель в диапазоне 0-20 мкм с абсолютной погрешностью $\gamma_H \approx \pm 1$ мкм, предложено устройство для очистки нефти от АСП с управлением от ПМР-анализатора.

Ключевые слова: экспресс-контроль; асфальтено-смола; парафины; протонный; магнитный; резонанс; поля; очистка.

Для цитирования: Сафиуллин Б.Р., Козелкова В.О., Кашаев Р.С., Козелков О.В. Очистка нефти от асфальтено-смола и парафинов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 166-178. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178.

REFINING OF THE OIL FROM ASPHALTENE-RESINS AND PARAFFINS

BR. Safiullin, VO. Kozelkova, RS. Kashaev, OV. Kozelkov
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the problems of express-control and asphaltene-resins and paraffins (ARP) purification of oil from them. Elaborate new methods of oil-well liquid and oil express-control, especially of ARP. The task is actual, because great amount of ARP lead to ARP – deposits in pipeline, which result to complications in oil-mining, increase of power consumption and wearing of machinery. Elaborate the technology and installation for removing ARP from oil under affect of physical fields. *METHODS.* When solving this problem, we used the backward/forward method of nuclear (proton) magnetic resonance (PMR) relaxometr, which is noncontact, nondestructive, does not need probe preparense. For ARP removing were used: rotating magnetic, nonuniform alternating electric, centrifugal fields and gravitation separation of emulsion. Was used also physica modeling and MatLab Simulink mathematical modeling. *RESULTS.* Elaborated the methodics of express-control of ARP and water concentrations, disperse distributions of water solutions of ARP with reagents in emulsions. Were received experimental equations between ARP and water concentrations and times of PMR spin-spin relaxations, which gives the opportunity determine the oil characteristics from NMR-parameters. Theoreticall grounded the technology of the ARP removing from oil, described the forces, affecting on droplets in the rotating magnetic, nonuniform alternating electric, centrifugal fields. Elaborated the structure-functional scheme of installation for purification of oil from ARP, controlled by elaborated relaxometer NMR-NP2. Made the calculation of the rotating magnetic resonance source, its optimization and physical, mathematical modeling of its function in Matlab Simulink program. *CONCLUSION.* The survey of methodic and instrumental equipment of oil-mining deposits showed, that control of studied oil characteristics is carried in laboratories, expensive and long in time, there is no instrumental method of ARP determination and removing. Were received experimental equations for the asphaltene-resins control in the range 0-30% withthe accuracy of $\approx \pm 2\%$, for paraffinsin the range 0-30% withaccuracy $\approx \pm 3\%$, droplets distribution in the range 1-20 μm withaccuracy $\approx \pm 1\mu\text{m}$, offered the installation for ARP removing from oil.

Key words: *express-control; express control; asphalten-resins; paraffins; proton; magnetic; resonance; fields; purifying.*

For citation: Safiullin BR, Kozelkova VO, Kashaev RS, Kozelkov OV. Refining of the oil from asphaltene-resins and paraffinsisolated power hub. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(5):166-178. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-166-178.

Введение

С усложнением условий нефтедобычи из-за ухудшения свойств нефти в связи с ростом в ней концентрации асфальтенов, смол и парафинов (*АСП*), обводненности, плотности и вязкости необходим постоянный автоматический контроль характеристик скважинной жидкости нефти для оперативного управления работой нефтедобывающего оборудования и оптимизации подготовки, сбора, сепарации и транспортировки нефти. Особого внимания требует меры по предотвращению асфальто-смолисто-парафиновых отложений (*АСПО*) (рис.1), наличие которых в насосно-компрессорных и магистральных трубах ведет к усложнению эксплуатации, затруднению учета нефти, снижению технико-экономических показателей работы нефтяных скважин и нефтепромысла в целом. Это делает актуальным экспресс-контроль *АСП* [1] и других характеристик нефти и автоматизированных способов их отделения от нефти для дальнейшей переработки с целью создания цифрового нефтяного промысла. Важность решения указанной проблемы отражена в Распоряжении Правительства РФ от 28.07.2017 N 1632-р «Об утверждении программы Цифровая экономика Российской Федерации».



Рис. 1 Асфальто-смолисто-парафиновые отложения в трубопроводе Fig. 1 Asphalt-resin-paraffin deposits in pipeline

К научной новизне данного исследования можно отнести:

- установлены взаимные корреляции между физико-химическими свойствами нефти и характеристиками АСП в нефти, являющиеся базой для методик их контроля при добыче нефти и очистки ее от АСП и ПМР-релаксационными параметрами, как основы методик их экспресс-контроля;

- предложены методы и алгоритмы экспресс-контроля АСП повременам спиновой релаксации T_{ZAC} , используемые для управления установкой по удалению АСП из нефти;

- разработана структурная схема, модель и блоки установки по отделению асфальтенов, смол и парафинов от нефти с экспресс-контролем по данным ПМР-релаксации.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования её результатов для создания новых систем управления нефтяным оборудованием по экспресс-данным ПМР-параметров. Предложенные методики развивают приборные средств до уровня автоматического цифрового контроля, что обеспечивает новый цифровой уровень методического и приборного оснащения месторождений. Авторами получен патент РФ №2689103, вошедший в число лучших в РФ за 2019-2020 гг на способ, позволяющий удалять АСП непосредственно в скважине, и добывать нефть более высокого качества.

Литературный обзор

По литературным данным в нефти и по характеристикам исследованных нами образцов АСП колеблются от долей процента до 30% [2]. В статье [3] установлено, что присутствие асфальто-смолистых (АС) веществ способствует устойчивости нефтяных дисперсий и формированию АСПО в насосно-компрессорных трубах и магистральных трубопроводах. Поэтому, вопрос контроля АСП, а также образованию АСПО посвящено большое число работ отечественных Сафиева Р.З., Евдокимов И.Н., Лосев А.П. [3,4] и зарубежных исследователей Mansourpoor., Chi, Kasumu, Yangetal [5-8]. Чан Ван Тунг, Козелковым О.В. была разработана аппаратура и технология экспресс-контроля характеристик нефти, а также структурно-функциональная схема установки по экспресс-контролю и удалению примесей (воды и солей) из нефти [2, 9, 10]. В статье [15] изложена разработанная методика определения распределения капель воды в эмульсиях для экспресс-контроля процесса удаления воды (водного раствора реагента) в установке, которая, однако еще не была адаптирована к применению для удаления АСП из нефти.

В связи с этим актуальна задача разработки новых методов проточного контроля АСП и характеристик скважинной жидкости и нефти при её добыче, подготовке и транспортировки во всем диапазоне их значений в едином проточном анализаторе.

Материалы и методы

Уникальными возможностями, отмеченными в главе зарубежной монографии [2] обладает один из наиболее современных - метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР), являющийся неконтактным, неразрушающим, не требующий подготовки пробы и легко автоматизируемый и экспрессным (время измерения в среднем < 2 минут). Аппаратура ПМР-релаксометрии может быть применена для контроля и управления работой установки по повышению качества нефти очисткой от АСП. На кафедре «Приборостроение и мехатроника» Казанского государственного энергетического университета с 2000 г. ведутся работы по созданию аппаратуры на базе протонной магнитной резонансной (ПМР) релаксометрии для экспресс-контроля и анализа физико-химических свойств и характеристик скважинной жидкости и нефти.

В данной статье нами исследованы нефти и стандартные образцы, предоставленные ПАО «Татнефть», АО «Транснефть», Томским ЦСМ. Их характеристики описаны в таблицах 1 и 2. Из-за практической химической неразличимости асфальтенов и смол, нами использованы данные по суммам (АС) этих компонентов в нефти.

Таблица1

Характеристики нефтей ПАО Татнефть, АО Транснефть, Томского ЦСМ

Характеристики образцов	СИК Н-215	СИК Н-223	СИК Н-224	СИК НС-1	СИК НС-4	Транс-нефть1	Транс-нефть2	Станд 1.2%	Станд 3.6%	Станд 3.7%	Станд 7%
$\rho_{20}(\text{кг/м}^3)$	866,6	879,9	902	918,4	920,6	863,2	879	-	-	-	-
Влажность W (%)	0,062	0,06	0,12	39,52	17,03	0,15	0,18	-	-	-	-
Соли (мг/л)	17,4	53,4	48,3	1732	590	18,2	24,4	-	-	-	-
Парафин (%)	4,2	1,8	3,7	-	-	-	-	1,2	3,6	3,7	7

Вязкость мм ² /с	-	-	-	-	-	14,45	19,23	-	-	-	-
-----------------------------	---	---	---	---	---	-------	-------	---	---	---	---

Таблица 2

Характеристики образцов нефтей от НГДУ ПАО Татнефть и модельных образцов

Образцы нефтей	Плотность кг/м ³	Асфальтены, %	Смолы, бз+сбз %	Парафины, %
Ленинградская	873	2,3	19,8	
Ленинградская	867	3,4	-	-
Альметьевская	867,5	3,3	17,4+7,1	3,1
Альметьев+0,5 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	6,2
Альметьев.+1 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	9,2
Альметьев+ 1,5 г C ₂₂ H ₄₆	867,5	3,3	17,4+7,1	11,9

Результаты

Зависимости T_{2B} от концентрации асфальтенов и асфальтено-смог, полученные для температур нефти 20, 30, 50 и 70°C, представлены на рисунке 2. Максимальная температура нефти на выходе из скважины обычно не превышает 70 градусов, но может быть и ниже (например, зимой), поэтому взяты и более низкие температуры.

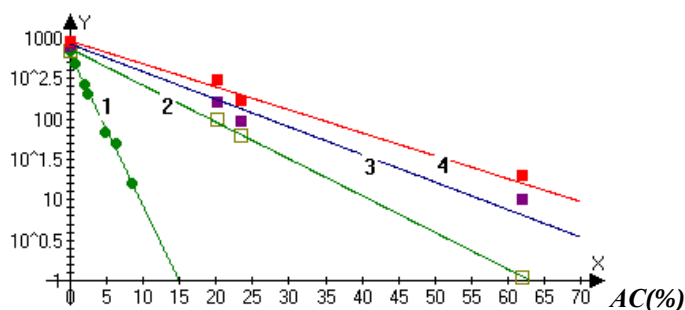
 $T_{2B}(мс)$ 

Рис. 2 Зависимости T_{2B} от концентрации асфальтенов (кривая 1) и асфальтено-смог, полученные для температур нефти 20, 30, 50 и 70°C (кривые 2-4).

Fig. 2 Dependence of T_{2B} on the concentration of asphaltenes (curve 1) and asphaltene resins obtained for oil temperatures 20, 30, 50 and 70°C (curves 2-4).

Они с коэффициентами корреляции $R^2 \approx 0.9$ описываются уравнениями:

$$\text{Для } 20^\circ\text{C} \quad T_{2B} = 626 \exp(-0,43 AC) \quad (1)$$

$$\text{Для } 30^\circ\text{C} \quad T_{2B} = 741 \exp(-0,104 AC) \quad (2)$$

$$\text{Для } 50^\circ\text{C} \quad T_{2B} = 844 \exp(-0,078 AC) \quad (3)$$

$$\text{Для } 70^\circ\text{C} \quad T_{2B} = 923 \exp(-0,065 AC) \quad (4)$$

На рисунке 3. представлены полученные зависимости концентраций парафинов Π от $T_{2a,b,c}$

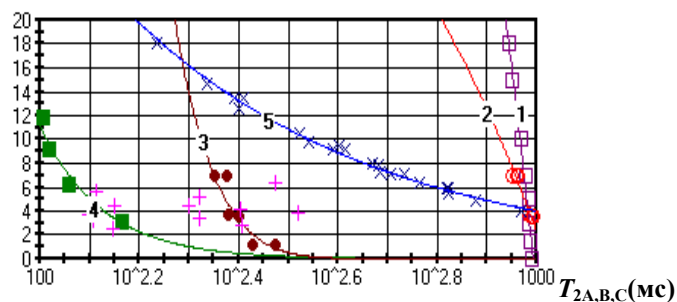
 Π (%)

Рис.3. Зависимости концентраций парафинов Π от времен релаксации $T_{2a,b,c}$ фаз А, В, С.

1,2,3 – кривые А, В и С в стандартных образцах Нефтемодульстрой, Омск; 4- кривая для разных концентраций парафина в Альметнефти; 5- кривая длины цепей парафинов CL по данным

Fig.3. Dependence of paraffin P concentrations on relaxation times $T_{2a, b, c}$ phases A, B, C.

1.2.3 - curves A, B and C in standard samples Neftemodulastroy, Omsk; 4 - curve for different concentration of paraffin in Almetneft; 5 - curve of length of paraffin CL chains by data [11], crosses

[11], крестами обозначены данные из работы [12]. denoted data from work [12].

Кривые на рисунке 3 описываются с коэффициентами корреляции $R^2 = 0,83-0,98$ и среднеквадратическими отклонениями $S = 0,5-1$ уравнениями:

$$\text{Кривая 1 } \Pi = 167,3 - 0,17T_{2A} \quad (5)$$

$$\text{Кривая 2 } \Pi = 52 - 0,05T_{2A} \quad (6)$$

$$\text{Кривая 3 } \Pi = 3722 \exp(-0,028T_{2B}) \quad (7)$$

$$\text{Кривая 4 } \Pi = 8,5 \cdot 10^7 \cdot (T_{2A})^{-3,44} \quad (8)$$

Ур (5-8) представлены в форме, удобной для определения концентраций Π по временам спин-спиновой релаксации T_{2A} протонов. Наличие зависимостей для времен релаксации разных протонных фаз позволяет верифицировать полученные данные по разным каналам.

В качестве технологий депарафинизации (ДП) и деасфальтизации (ДА) сырья и нефтепродуктов в настоящее время используется несколько способов: сольвентная, карбамидная, карбамидно-кристаллическая, карбамидно-сольвентная фирмы *Edeleanu Gesellschaft* (Германия) и каталитическая. Практически все они основаны на реакциях водных растворов карбамида с АСП, требуют пробоподготовки, термообработки и длительны во времени (до 20 ч.). Для карбамидно-сольвентной деасфальтизации и депарафинизации (напр. по технологии *Edeleanu Gesellschaft*), требуется вначале создать тонкодисперсную эмульсию из водного реагента, а затем удалить водный раствор из нефти, т.е. встает проблема удаления водных растворов АСП путем обезвоживания - деэмульсации.

Для обезвоживания ВНЭ наибольшее практическое применение в парках подготовки нефти и на нефтеперерабатывающих заводах нашёл способ ее обработки во внешнем переменном электрическом поле напряжённостью $E_0 = 15-33$ кВ, используемый в электрообезвоживающих установках (ЭЛОУ), наиболее продвинутой из которых является установка Швецова с сотр. (в чем преимущества данной установки) [13].

Нами предложено усовершенствовать установки обезвоживания введением вращающегося магнитного поля (ВМП), создаваемого статорными обмотками асинхронного двигателя с ферромагнитным ротором и неоднородных переменных электрических полей (НЭП) между электродами на роторе. На рисунке 4 представлена технологическая схема универсальной установки для удаления водной фазы с АСП из нефти.

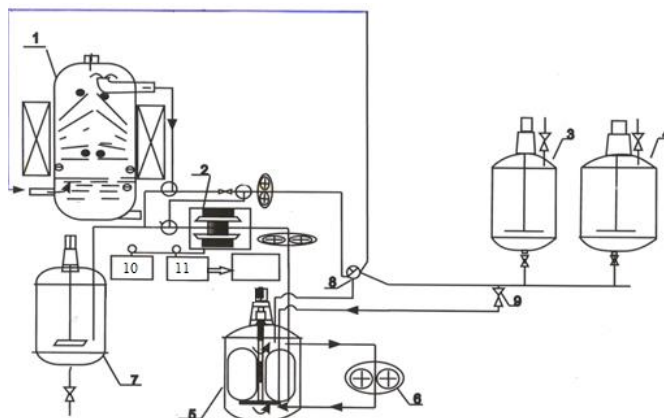


Рис. 4 Технологическая схема универсальной установки для удаления примесей (парафина, асфальтено-смола и водного раствора реагента с АСП из нефти. 1 - блок удаления водной фазы во ВМП и НЭП, 2 - магнит с датчиком ПМР-анализатора, 3 - емкость с нефтью; 4 - емкость с водным раствором реагента; 5 - блок эмульгирования нефти с реагентом; 6 - шестеренный насос, способствующий дополнительной эмульсации; 7 - емкость для очищенной нефти; 8 - трехходовой кран; 9 - автоматический кран; 10 - усилитель мощности радиочастотных импульсов; 11 - усилитель ЯМР-

Fig. 4 The technological scheme of the universal plant for removing impurities (paraffin, asphaltene-resin and aqueous solution of the reagent with ACP) from oil. 1 - aqueous phase removal unit in the WMP and NEP, 2 - magnet with MRR analyser sensor, 3 - tank with oil; 4 - tank with aqueous reagent solution; 5 - oil emulsification unit with reagent; 6 - gear pump promoting additional emulsion; 7 - purified oil tank; 8 - three-way crane; 9 - automatic crane; 10 - RF pulse power amplifier; 11 - NMR signal amplifier in PMR analyzer.

сигналов в ПМР-анализаторе.

Степень очистки зависит от степени загрязнения исходного сырья, и фактически трудно предсказуем, поэтому очистку ведет до требуемой степени, запуская процесс Очистка осуществляется до III категории по ГОСТ Р 51858-2002

На рисунке 5 представлена подробная структурная схема блока. Вращающееся магнитное поле создается статорными обмотками асинхронного двигателя с ферромагнитным ротором (АДФМР). Здесь цифрами на рисунке 5 обозначены: 1 - корпус с входными и выходными патрубками, расположенными под углом так, что придавать вращательное движение поступающей эмульсии, тем самым создавая центробежные силы к стенкам блока 1; 2 - источник ВМП; 3 - источник высокого переменного напряжения; 4 - отрицательно заряженный сетчатый электрод; 5, 6 и 7 - положительно заряженные конусные электроды на роторе; 8 - отстоявшаяся вода с водным раствором реагентов с АСП; 9 - поверхность отстоя воды; 10 - зона коалесценции капель воды с реагентом и АСП под действием ВМП; 11 - ферромагнитный ротор; 12 - патрубок вывода остаточного газа; 13 - патрубок слива отстоявшейся воды с АСП; 14 - магнитная система релаксометра ПМР с проточным датчиком; 15 - электронные блоки релаксометра, расположенные на расстоянии $l = v_0 c$ от магнитной системы 14 (здесь v_0 - резонансная частота ПМР, c - скорость света); 16 - емкость для очищенной нефти; 17 - емкость для отстоявшейся воды; ПП1-ПП3 - переключатели потоков эмульсии.

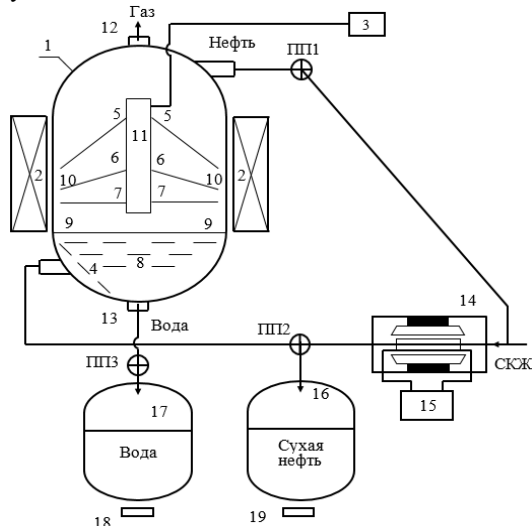


Рис. 5 Структурная схема блока разделения эмульсии нефти с АСП с реагентом

Fig.5. Structural diagram of oil emulsion unit with ACP with reagent

Исследования показывают [2], что для контроля и управления процессом из всех известных, метод ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР) является, пожалуй единственным, способным одновременно контролировать такие критически важные для деэмульсации характеристики, как: концентрация воды W в эмульсии, АСП, вязкость η , плотности ρ в нефти, а также дисперсность D_{CA} (среднеарифметический диаметр капель воды/раствора реагента) [15]. Контроль осуществляется проточным ПМР-анализатором.

Процесс удаления АСП в установке под контролем ПМРА включает стадии:

1. **Входной контроль** физико-химических свойств сырья (концентрации АСП, воды W и плотности ρ_H нефти) экспресс-методом в анализаторе ПМРА путем:

- предварительного измерения эффективных времен релаксации воды T_{2B} и нефти T_{2H} с использованием последовательности Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ) [14];
- измерении эффективного T_2^* времени релаксации в контролируемой ВНЭ;
- определении концентраций АС и П в нефти по ур. (1-8);
- определении влажности нефти по формуле: $W_{ПМР} = T_{2B}(T_2^* - T_{2H})100\% / T_2^*(T_{2B} - T_{2H})$ (9)

2. **Снижение W водной фазы АСП с реагентом** блоке 1.

Смесь АСП с водой и реагентом в виде водонефтяной эмульсии (ВНЭ) поступает в блок 1 через патрубок через сетку, предотвращающую попадание механических примесей и являющуюся одновременно отрицательно заряженным электродом, а затем через слой отстоя водной фазы, в которой улавливаются наиболее крупные капли воды. При прохождении эмульсии сквозь сетку патрубка капля и частицы АСП приобретает заряд q :

$$q \approx 1,64 E_0 r_0^2 \quad (10)$$

$$\text{Приобретя заряд, капля отталкивается с силой: } F \approx 1,37E_0^2 r_0^2 \epsilon_{cp} = 0,835 qE_0, \quad (11)$$

где r_0 и ϵ_{cp} - средний радиус капли и диэлектрическая проницаемость среды.

Выше зоны отстоя находится промежуточный слой, где более мелкие капли эмульсии коалесцируют, подвергаясь обработке ВМП, создаваемым обмотками АДФМР и одновременно НЭП между поверхностью воды и электродами на роторе, на которые подано положительное постоянное/переменное напряжение.

В промежуточной зоне на капли воды действуют силы:

$$\text{а) сила } F_L \text{ Лоренца: } F_L = q [v \cdot B] \quad (12)$$

где B - магнитная индукция ВМП, v - линейная скорость вращения ВМП. Под действием силы F_L заряженные капли перемещаются вниз, в зону отстоя. Из-за наличия заряда и дипольного момента капли движутся по направлению градиента магнитного поля, который максимален на периметре блока 1 и ближе к источнику вращающегося магнитного поля.

б) силы F_D диполь-дипольного взаимодействия между поляризованными каплями-диполями, определяемые формулой:

$$F_D = 6(|\alpha|)^2 E_0^2 \epsilon_{cp} / r^4 \quad (13)$$

Капли при таком типе взаимодействия притягиваются независимо от того, постоянное поле или переменное, поскольку в ур.(13) поле представлено в квадрате. Электрическое поле между электродами изменяется в сторону увеличения по мере повышения расположения электродов от $E_{уд} = 2,5$ кВ/см до 7,5 кВ/см в связи с тем, что для концентраций водной фазы $W < 2,9$ % расстояние между каплями-диполями становится больше $d \approx 6r_0$, силы притяжения по ур.(13) становятся малыми, и требуются более высокие поля $E_{уд}$;

$$\text{в) силы диэлектрфореза: } F_E = 2\pi\epsilon_0(\epsilon - 1)E_0 R^3 \text{grad} E^2 / (\epsilon + 2) \quad (14)$$

Силы F_G перемещают каплю в зону максимальных электрических полей, т.е. к отрицательно заряженным стенкам. В НЭП конусных электродов 5 все капельки движутся в сторону увеличения напряженности E^2 , и повышенной концентрации капель. Это приводит к повышению скорости коагуляции и более быстрому расслоению эмульсии.

Перед выходным патрубком обезвоженная нефть проходит через олеофильные фильтры, что позволяет повысить эффект отделения воды от нефти.

3. Контроль в ПМР-анализаторе характеристик нефти: концентраций АСП по ур. (1-8) и среднеарифметического диаметра капель воды $D_{CA}(\text{мкм}) = \sum N_i D_i / \sum N_i$ по формуле [15]:

$$D_{CA} = 0,1645 \cdot \exp(2,85 \cdot T_{1B}) \quad (15)$$

4. Альтернативный контрольный анализ дисперсности осуществляется также на микроскопе *Microscope MC-300 (Austria)*.

Разделение 50%-й эмульсии в макетной установке с ВМ и НЭП осуществлялось при включении на статорные обмотки АДФМР 3-х фазного напряжения в течение $t=10$ мин. Анализ релаксметром ПМР-NP2п, описанном в [2], нефти, полученной на выходе установки, показал, что концентрация воды в ней составляет 1,7 %. Удельные затраты электроэнергии составили $0,5 \div 1,5$ В·ч/дм³, что близко к значениям $0,2 \div 0,8$ кВ·ч/т затрат для на ЭЛОУ АВТ-6 с удельной напряженностью электрического переменного поля $E_{уд} = 1-3$ кВ/см. Сюда, однако, необходимо добавить мощность P_{CT} , потребляемую на питание статорных обмоток для вращающегося магнитного поля $P_{CT} = 1,25$ кВ·ч/дм³.

Характеристики АДФМР даны в работе [16]. Нами предложен метод расчета параметров АДФМР, оптимизирующий его конструкцию. В воздушном зазоре $\delta = 0,1 \div 0,9$ мм большинства электрических машин значение магнитной индукции составляет $B_0 = 0,6 \div 1$ Тл с номинальным скольжением $s = 0,7 \div 0,9$. Но так как нами как источник ВМП используется АДФМР, его номинальное скольжение - в пределах $s = 0,3 \div 0,4$.

Ротор имеет диаметр $D = 0,03$ м (при диаметре внутренней стороны статора 0,07 м), т.е. зазор равен $\delta = 0,02$ м для возможности размещения конических электродов для создания неоднородных электрических полей в установке по снижению концентраций АСП в нефтина рисунках 4 и 5. Уменьшение диаметра D ротора приводит к снижению индукции магнитного поля B_0 ввиду обратной пропорциональности B_0 величине δ , что по данным работы [17] отражено в таблице 3.

Таблица 3

Зависимость индукции магнитного поля $B(\text{Тл})$ от диаметра D якоря

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
--	---	---	---	---	---	---	---	---	---

$B(\text{Тл})$	0,4	0,5	0,59	0,65	0,71	0,76	0,8	0,84	0,88
$D(\text{м})$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5

По данным таблицы зависимость $B(D)$ может быть описана уравнением:

$$B(\text{Тл}) = 0,5 + 7,6 D(\text{м}) \quad (16)$$

Для того, чтобы определить, как скажется изменение диаметра ротора такой машины на скольжении сферромагнитного ротора (и соответственно на его угловой скорости вращения ω_2), воспользуемся уравнением из [17,] для активного сопротивления ротора из ферромагнитного материала:

$$R = 1,4 \cdot 4 \cdot m_1 l_1 w_{31}^2 k_{\text{л.с}} \sqrt{[\omega_1 \mu_0 \mu \rho (2s)^{-1}] / (\pi D)} \quad (17)$$

где $m_1 = 3$ число фаз обмотки статора, $l_1 = 0,1$ – длина ротора, w_{31} – эффективное число витков фазы обмотки статора, $k_{\text{л.с}} = 1$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления ротора за счет лобовых частей ротора, $\omega_1 = 2\pi n / 60 = 6,28 \cdot 1500 / 60 = 157$ рад/с – угловая скорость вращения ВМП, магнитная постоянная $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$, относительная магнитная проницаемость на поверхности ротора $\mu = 200$, $\rho = 1,3 \cdot 10^{-7}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление стали.

Уравнение (17) преобразуем к виду, удобному для расчетов скольжения:

$$s = 5,6^2 m_1^2 l_1^2 w_{31}^2 \omega_1 \mu_0 \mu \rho / 2 R^2 \pi^2 D^2 = 7200 / D^2 \quad (18)$$

Результаты расчетов представлены в виде графика на рисунке 6.

Видно, что со снижением диаметра ротора D скольжение растет по ур. (19):

$$s = 3,03 \cdot \exp(-46,3D) \quad (19)$$

С другой стороны, используя зависимость $B(D)$ и подставив ее в ур. (19), получим зависимость $s(B)$ в виде уравнения:

$$s = 8,9 \exp(-3,52 \cdot B) \quad (20)$$

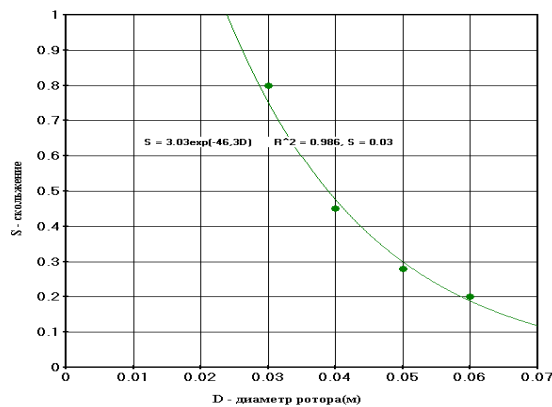


Рис. 6 Зависимость скольжения s в АДФМР от диаметра D ротора. Fig. 6 The dependence of the sliding s in the ADFMP on the diameter D of the rotor.

Анализ динамических свойств АДФМР является достаточно сложной задачей из-за существенной нелинейности описывающих их уравнений, обусловленной наличием произведений переменных. Поэтому, удобную форму математического описания дают уравнения относительно производной потокоцепления [18]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{1x}}{dt} &= u_{1x} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \omega_{0эл} \Psi_{1y}; \\ \frac{d\Psi_{1y}}{dt} &= u_{1y} - \frac{R_1 L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} - \omega_{0эл} \Psi_{1x}; \\ \frac{d\Psi_{2x}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2x} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1x} + (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2y}; \\ \frac{d\Psi_{2y}}{dt} &= -\frac{R'_2 L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{2y} + \frac{R'_2 L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} \Psi_{1y} - (\omega_{0эл} - \omega_{эл}) \Psi_{2x}; \\ M &= \frac{p_{\Pi} L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2} (\Psi_{1y} \Psi_{2x} - \Psi_{1x} \Psi_{2y}). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

В приведенных уравнениях индексы 1 соответствуют токам в обмотке статора, индексы 2 – в роторе. Структурная схема электрохимического преобразования энергии в АДФМР, полученная по ур. (21), представлена на рисунке 7. Схема, реализованная в среде *MatLabSimulink*, позволяет анализировать тенденции изменения выходных координат АДФМР при изменениях диаметра ферромагнитного ротора D .

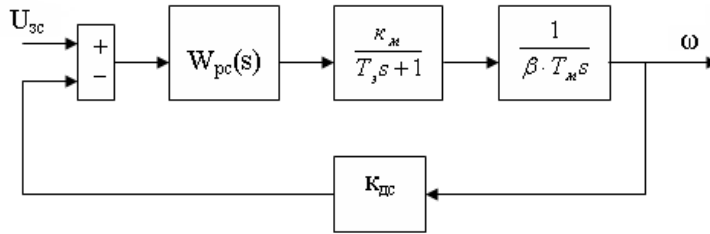


Рис.7 Структурная схема динамической модели контура скорости. Fig. 7 Flow diagram of the dynamic speed loop model.

Необходимо определить передаточную функцию регулятора скорости для разомкнутого контура регулирования с магнитными параметрами. Передаточная функция разомкнутой системы, настроенной на оптимум по модулю, должна иметь вид:

$$\text{Исходя из этого, имеем: } W_{\text{к}} = W_{\text{pc}} \cdot \frac{K_M}{T_s p + 1} \cdot \frac{1}{\beta T_m p} \cdot K_{\text{дс}} = \frac{1}{2T_{\Sigma}^{\text{к}} p (T_{\Sigma}^{\text{к}} p + 1)}, \quad (22)$$

$$W_{\text{pc}} = \frac{(T_s p + 1) \cdot \beta T_m p}{K_M \cdot K_{\text{дс}} \cdot 2T_{\Sigma}^{\text{к}} p (T_{\Sigma}^{\text{к}} p + 1)}.$$

С учетом уравнений для постоянных времени T_s и T_{ϕ} (которые малы), электромагнитная постоянная времени: $T_s = \frac{1}{\omega_{0элном} s_{\kappa}} = \frac{1}{314 \cdot 0.2} = 0,0159(c)$, где $\omega_{0элном} = 314$, рад/с.

Электрохимическая постоянная времени: $T_m = \frac{J}{\beta} = \frac{56 \cdot 10^{-4}}{2,06} = 0,0027$, где β - модуль жесткости линеаризованной механической характеристики.

$$\beta = \frac{2M_{\text{max}}}{\omega_{0ном} \cdot s_{\kappa}} = \frac{2 \cdot 32,43}{157 \cdot 0,2} = 2,06 \quad (23)$$

Соответственно, передаточная функция принимает вид: $W_{\text{pc}} = \frac{K_{\text{pc}}}{(T_{\phi} p + 1)}.$ (24)

Скорость вращения поля при $f=f_{\text{ном}}=50$ Гц: $\omega_{0ном} = \frac{314}{p_{\Pi}} = \frac{314}{2} = (157 \text{ рад/с})$ (25)

Коэффициент преобразователя частоты: $K_f = \frac{\omega_{0ном}}{U_{\text{вых}}} = \frac{314}{10} = 31,4$, где $U_{\text{вых}}=10$ В – напряжение управления инвертором.

Подбором значений $\kappa_{\text{р,м}}$ и $\kappa_{\text{п,с}}$ обеспечивается положительная связь по скорости:

$$(\kappa_{p,m} \cdot \kappa_{n,c}) = \frac{p_{\Pi}}{\kappa_f} = \frac{2}{31,4} = 0,0639 \approx 0,064. \quad (26)$$

Суммарная постоянная времени: $T_{\Sigma}^{kc} = T_{\phi} + T_{\tau} = 0,01 + 0,0159 = 0,0259(c)$, где $T_{\phi} = 0,01$ с – постоянная времени фильтра.

Коэффициент обратной связи по скорости (датчик скорости): $\kappa_{dc} = \frac{1,2 \cdot U_{вых}}{1,2 \cdot \omega_n} = \frac{1,2 \cdot 10}{1,2 \cdot 149,15} = 0,067$, где ω_n – номинальная угловая частота вращения:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1425}{30} = 149,15 \quad (27)$$

Коэффициент регулятора скорости

$$\kappa_{pc} = \frac{\beta T_M}{2 T_{\Sigma}^{kc} \kappa_M \kappa_{dc}} = \frac{2,06 \cdot 0,0027}{2 \cdot 0,0259 \cdot 0,067 \cdot 8,18} = 0,196. \quad (28)$$

С помощью программы *MatlabSimulink* настраиваем контур скорости на оптимум по модулю при моменте статической нагрузки $M_c = 0$. На рисунке 8 изображена структурная схема динамической модели контура скорости для переходных характеристик.

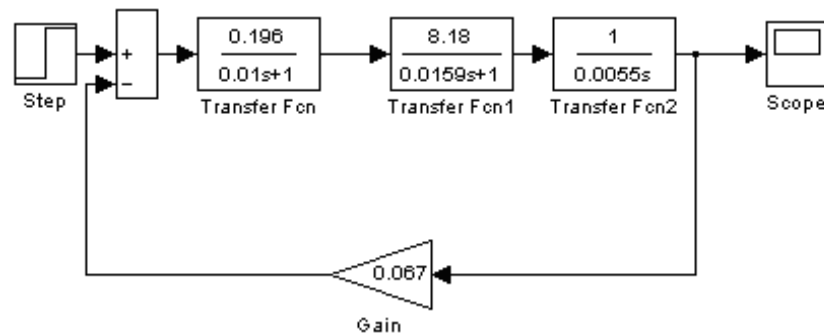


Рис.8 Структурная схема динамической модели контура скорости при построении переходных характеристик с применением *Matlab*.

Fig. 8 Structural diagram of dynamic model of speed contour when constructing transition characteristics using *Matlab*.

На рисунке 9 представлена переходная характеристика по управляющему воздействию.

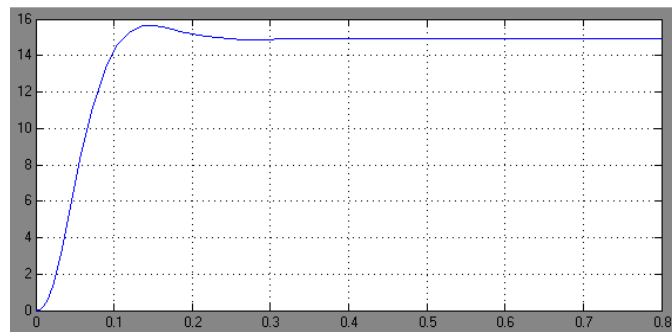


Рис.9. Переходная характеристика скорости по управляющему воздействию.

Fig. 9. Transient velocity of control action.

Данные рисунка 9 с максимальным отклонением $\Delta\omega_1 = 0,06$ рад/с совпадают с данными таблицы 1. Со снижением диаметра D ротора снижается и угловая скорость его вращения с $\omega_1 \approx 260$ рад/с до $\omega_2 \approx 75$ рад/с. Переходный процесс идет в колебательном режиме в течение 8.5 с с размахом $< \pm 2\%$, что позволяет конструктивно модифицировать АДФМР на разные диапазоны скоростей вращения и значений магнитных полей.

По результатам моделирования в среде *MatlabSimulink* перерегулирование системы составило: $\omega_{\max} = 15,63$ рад/с, $\omega_{\text{уст}} = 14,9$ рад/с, $\sigma = (\omega_{\max} - \omega_{\text{уст}}) \cdot 100\% / \omega_{\text{уст}} = 4,7\%$. Время первого согласования составило 0,11 с, запас по фазе 63,8 градуса; запас по амплитуде 18,6 Дб. По данным сделан вывод, что контур скорости настроен правильно.

Заключение

1. Обзор методического и приборного оснащения нефтяных месторождений для контроля асфальтено-смолисто-парафинов (АСП) показал, что приборно-методическая база контроля АСП на месторождениях практически отсутствует, диапазон и точность измерений низки и неоперативны, необходимы методики и устройства их проточного экспресс-контроля АСП для предотвращения АСПО-отложений в скважинах и трубопроводном транспорте. Этим условиям многопараметрического экспресс-контроля удовлетворяет метод ПМР-релаксометрии и проточный ПМР-анализатор.

2. Разработаны и апробированы методики экспресс-контроля, расширены номенклатура и диапазоны измерений компонент нефти, участвующих в формировании АСПО и приведены экспериментально зависимости между временами релаксации протонов нефтей для:

- концентраций асфальтено-смолов диапазоне 0-30% с погрешностью $\gamma_{AC} \approx \pm 2\%$.
- концентраций парафинов в диапазоне 0-30% с погрешностью $\gamma_{II} \approx \pm 3\%$.
- дисперсного распределения капель в диапазоне 0-20 мкм с погрешностью $\gamma_{II} \approx \pm 1$ мкм.

3. Предложен способ снижения концентрации АСП-компонент нефтей в установке с вращающимися магнитным и неоднородными электрическими полями с управлением от ПМР-анализатора, реализующей данный способ.

4. Представлены способ конструктивной оптимизации и расчет источника вращающегося магнитного поля для его применения в конкретных диапазонах конструктивных размеров и динамических параметров.

5. В *MatlabSimulink* осуществлено моделирование управления скоростью вращения магнитного поля в асинхронном двигателе с ферромагнитным ротором в установке очистки нефти от асфальтено-смолов и парафинов нефти.

Литература

1. Чан Ван Тунг, Кашаев Р.С. Радиочастотный генератор и программа импульсных последовательностей релаксометра ПМР // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 3. С. 90-96.
2. Злобин А.А. Экспериментальные исследования процессов агрегации и самосборки наночастиц в нефтяных системах // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2015. №15. С.57-72
3. Тихомирнов Л.И., Земцов С.А., Волков С.В., Мещеряков М.А., Волчков С.В. Интеллектуальное месторождение // Нефтегаз. 2019. №.1-2. С.142-143..
4. Евдокимов И.Н., Лосев А.П. Применение УФ-видимой абсорбционной спектроскопии для описания природных нефтей // Нефтегазовое дело. 2007. Т.2. С. 31-37. <http://www.ogbus.ru>.
5. Кашаев Р.С., Козелков О.В. Кубанго Б.Э. Проточные ПМР-анализаторы для контроля скважинной жидкости по ГОСТ 8.615-2005 // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №1-2. С. 137-151.
6. Швецов В. Н., Юнусов А. А., Набиуллин М. И. Новые технические решения по усовершенствованию электродегидраторов для обезвоживания и обессоливания нефти // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2012. № 5. С. 48-54.
7. Кашаев Р.С., Сафиуллин Б.Р., Козелков О.В. Paraffins in petroleum oils, studied by nuclear magnetic resonance relaxometry. Advanced Aspectsof Engineering Research. London, 2021. No.:2021/BP/2354F.
8. Safieva R.Z., Mishin V.D. Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics // Pet. Chem. 2021. V.61,p.539-554.
9. Mansourpoor M., Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures // Applied Petrochemical Research, V.9, Issue 2, pp 77–90.
10. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water “Waxy” mixtures using a cold finger apparatus // Energy Fuels. 2015. V.29. P.501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.
11. Mansourpoor M., Azin R. Osfour S., Izadpanah A. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures // Applied Petrochemical Research, V.9, Issue 2.
12. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water “Waxy” mixtures using a cold finger apparatus // Energy Fuels. 2015. V.29. P.501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.
13. Nikolskaya E., Hiltunen Y. Molecular properties of fatty acid mixtures estimated by on-line time domain NMR // Appl. Magn. Res. 2019. 50 (1-3), 159-170.

14. Kozelkova V.O., Kozelkov O.V., Kashaev R.S. Nuclear magnetic resonance relaxometry method for the study of crude oil/water emulsions and dispersion of water droplets./ Intern.Conf «Process Management and Scientific Developments» Abstracts. Birmingham, UK.2021. p.208-214.

15. Шпиганович А.Н., Шпиганович А.А. Оценка эффективности безотказности систем // Вести вузов Черноземья. 2013. №1. с.25–33.

16. Бертинов А.И., Бут Д.А., Мизюрин С.Р. Специальные электрические машины. – М.: Энергоиздат, 1982. -552 с.

17. Арсеньев О.В., Коновалов Ю.В.. Электрические машины. – Ангара. Изд. АГУ, 2016. -17с.

18. Терехов В. М. Системы управления электроприводов. М.: Изд.«Академия», 2006.

19. Петров И.В., Иванов Р.Н. Название патента. Патент РФ на изобретение №2193864. 10.12.2002. Бюл. №34. Доступно по: http://www.ntpo.com/patents_technical/technical_1/technical_432.shtml. Ссылка активна на 12 ноября 2017.

Авторы публикации

Сафиуллин Б.Р.– ассистент кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Козелкова В.О.– инженер кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Кашаев Р.С.– д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

Козелков О.В. - канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры «Приборостроение и мехатроника», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Tran Van Tung, Kashaev R.S., Radiochastotny generator I programma impuls nichposledovatelnoy relaksometriy PMR. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):90-96.

2.Zlobin A.A. Ekspimentalniye issledovaniya prosessov agregatsiy I samosborki nanochastits v neftyanich sistemach. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe I gornedelo*. 2015;15:57-72

3. Tihomirnov LI, Zemtsov SA, Volkov SV, et al. Intellekturnoye mestorogdenie. *Neftegaz*. 2019;1-2:142-143.

4. Evdokimov IN, Losev AP. *Application of UV-Visible Absorption Spectroscopy for Description of Natural Oil and Gas Business*. <http://www.ogbus.ru>.

5.Kashaev RS, Kozelkov OV, Kubango BE. *Prochnyye PMR-analizatory dlya kontrolya skvazhinnoy gidkosti po GOST 8.615-2005*. 2017;1-2:137-151.

6. Shvetsov VN, Yunusov AA, Nabiullin MI. *Novye technicheskie resheniya po usovershenstvovaniyu elektrodehidratorov dlya obezvozhivaniya I obessolivaniya nefti. Oborudovanie I tehnologii neftegazovogo kompleksa*. 2012;5:48-54.

7. Kashaev RS, Safiullin BR, Kozelkov OV. *Paraffins in petroleum oils, studied by nuclear magnetic resonance relaxometry*. *Advanced Aspectsof Engineering Research*. London, 2021. No.: 2021/BP/2354F

8. Safieva RZ., Mishin V.D. Systems Analysis of the Evolution of Views on Oil Systems: From Petroleum Chemistry to Petroinformatics. *Pet. Chem*. 2021;61:539-554.

9. Mansourpoor M., Azin R. Osfoury S., IzadpanahA. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures. *Applied Petrochemical Research*. 2020;9(20):77–90.

10. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water «Waxy» mixtures using a cold finger apparatus *Energy Fuels*. 2015;29:501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.

11. Mansourpoor M, Azin R. Osfoury S., IzadpanahA. Experimental investigation of wax deposition from waxy oil mixtures. *Applied Petrochemical Research*. 2020;9(2):77–90.

12. Kasumu A. Mehrotra A. Solids deposition from wax–solvent–water «Waxy» mixtures using a cold finger apparatus. *Energy Fuels*. 2015;29:501–511. <https://doi.org/10.1021/ef501835b>.

13. Nikolskaya E, Hiltunen Y. Molecular properties of fatty acid mixtures estimated by on-line time domain NMR. *Appl. Magn. Res.* 2019;50 (1-3);159-170.
14. Kozelkova VO, Kozelkov OV, Kashaev RS. *Nuclear magnetic resonance relaxometry method for the study of crude oil/water emulsions and dispersion of water droplets.* Intern.Conf «Process Management and Scientific Developments» Abstracts. Birmingham, UK.2021. p. 208-214.
15. Shpiganovich AN, Shpiganovich AA. Ocenka ehffektivnosti bezotkaznosti system. *Vesti vuzov CHernozem'ya.* 2013; 1:25-33.
16. Bertinov AI, But DA, Mizyurin SR. *Spetsialnyie elektricheskie mashiny.* M.:Energoizdat, 1982. -552 с.
17. Arsen'ev OV, Kononov YuV. *Elektricheskie mashiny.* Angara. Izd. AGU, 2016. 17 p.
18. Terechov VM. *Sistemyupravleniyaelectroprivodov.*M.: Izd.«Akademiya», 2006
19. Petrov IV, Ivanov RN. *Nazvaniepatenta – транслитерацией.* Patent RUS. №2193864. 10.12.2002. Byul. №34. Available at: [http://www.ntpo.com/patents_ technical / technical _1/technical _432.s.html](http://www.ntpo.com/patents_technical/technical_1/technical_432.s.html). Accessed: 12 Nov 2017.

Authors of the publication

Bulat R. Safiullin – Kazan State Power Engineering University.

Valeriya O. Kozelkova – Kazan State Power Engineering University.

Rustem S. Kashaev – Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Kozelkov. – Kazan State Power Engineering University.

Получено

31.08.2022г.

Отредактировано

09.09.2022г.

Принято

16.09.2022г.

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ВОЗДУХО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Федюхин А.В., Дронов С.А., Семин Д.В., Гусенко А.Г., Панарин В.Э.

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

ORCID: 0000-0002-1819-0450, Fediukhinav@mpei.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработка лабораторного стенда воздухо-аккумулирующей электростанции и расчет ее режимов работы с использованием программных пакетов Aspen HYSYS и ANSYS. *МЕТОДЫ.* Авторами была разработана экспериментальная установка воздушно-аккумулирующей электростанции мощностью 1 кВт. Принцип действия установки заключается в закачивании компрессором сжатого воздуха в ресивер, с последующем выпуском воздуха из ресивера в детандер оригинальной конструкции, который вырабатывает электрическую энергию. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В процессе разработки опытного образца были изготовлены 4 шестерни из различных конструкционных материалов: нержавеющая сталь марки AISI 304, латунь марки ЛС59-1 и полиацеталь марки ПОМ-С. В ходе сборки, притирки и обкатки опытным путем было установлено, что оптимальным решением с точки зрения антифрикционных характеристик, прочности и большего ресурса является применение шестерен из полиацетала. Для моделирования режимов работы лабораторного стенда была составлена модель в программном пакете Aspen HYSYS. Необходимость в динамической модели возникла для моделирования процесса разгрузки ресивера. Представлен график изменения расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения регулирующего клапана. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* К плюсам применения ВАЭС в качестве способа аккумулирования электрической энергии можно отнести высокую маневренность и работу в широких диапазонах температуры и давления, что делает такие электростанции более дешевыми и долговечными. ВАЭС аккумулирует энергию в форме сжатого воздуха, который в дальнейшем идет на выработку электроэнергии во время пиков нагрузки.

Ключевые слова: воздухо-аккумулирующая электростанция; ВАЭС; накопитель энергии; возобновляемая энергетика; воздушная турбина.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700/>.

Для цитирования: Федюхин А.В., Дронов С.А., Семин Д.В., Гусенко А.Г., Панарин В.Э. Разработка лабораторного стенда воздухо-аккумулирующей электростанции // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 5. С. 179-188. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-179-188.

DEVELOPMENT OF LABORATORY UNIT OF COMPRESSED AIR ENERGY STORAGE

AV. Fedyukhin, SA. Dronov, DV. Semin, AG. Gusenko, VE. Panarin

National Research University, MPEI, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0002-1819-0450, Fediukhinav@mpei.ru

Abstract: *PURPOSE.* Development of a laboratory unit for a compressed air energy storage and calculation of its operating modes using Aspen HYSYS and ANSYS software packages. *METHODS.* The authors have developed an experimental unit of a compressed air energy storage and calculation with a capacity of 1 kW. The principle of operation of the unit consists in pumping compressed air into the receiver by a compressor, followed by the release of air from the receiver into the expander of the original design, which generates electrical energy. *RESULTS.* During the

development of the prototype, 4 gears were made of various structural materials: AISI 304 stainless steel, LS59-1 brass and POM-S polyacetal. During assembly, lapping and running-in, it was found experimentally that the optimal solution in terms of antifriction characteristics, strength and longer service life is the use of gears made of polyacetal. To simulate the operating modes of the laboratory stand, a model was compiled in the Aspen HYSYS software package. The need for a dynamic model arose to simulate the process of unloading the receiver. A graph of the change in air flow at the inlet to the expander depending on the position of the control valve is presented. **CONCLUSION.** The advantages of using CAES as a method of accumulating electrical energy include high maneuverability and operation in wide ranges of temperature and pressure, which makes such power plants cheaper and more durable. The CAES accumulates energy in the form of compressed air, which then goes to generate electricity during peak loads.

Keywords: compressed air energy storage; CAES; energy storage; renewable energy; air turbine.

Acknowledgments: The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation Grant No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700>

For citation: Fedyukhin AV., Dronov SA., Semin D.V., Gusenko AG., Panarin V.E. Development of laboratory unit of compressed air energy storage. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(5):179-188. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-5-179-188.

Введение

Важной задачей является выравнивание графика суммарной нагрузки потребителей. Для решения этой задачи вводится дифференцированная стоимость электроэнергии в зависимости от времени, в котором происходит пик нагрузок. Таким образом, при потреблении в часы пиковых нагрузок стоимость устанавливается выше. В связи с этим потребители пытаются подстраиваться и снижать потребление электроэнергии в пиковый период. Периодический запуск и остановка ТЭС не позволяют решить проблему регулирования мощности из-за больших временных затрат на данные мероприятия. На включение тепловой станции потребуется не один час. Кроме того, частое включение и выключение блоков крупных ТЭС приводят к увеличенному износу оборудования, увеличению расхода топлива – все это сказывается на надежности станции [1]. Поэтому, в настоящее время использование аккумулирующих станций для покрытия дефицита мощности в пиковые часы является перспективным направлением, так как на их полный запуск требуется несколько минут. Одной из таких электростанций является воздушно аккумулирующая электростанция (ВАЭС), которая располагает запасом сжатого воздуха. Энергия сжатого воздуха затрачивается для приведения в действие турбин, вращающих генераторы, которые будут отдавать свою энергию в сеть во время пиковых нагрузок.

Литературный обзор

Улучшение электрических режимов в энергосистеме возможно в случае реализации программ строительства энергоэффективной пиковой генерации или аккумулирования электрической энергии [2-4]. Отечественный опыт строительства крупных аккумулирующих станций на сегодняшний день ограничен внедрением гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), среди которых стоит выделить Загорскую ГАЭС, Кубанскую ГАЭС [5]. Кубанская ГАЭС представляет собой средненапорную деривационную гидроаккумулирующую электростанцию. Она расположена в п. Водораздельный Карачаево-Черкессии на Большом Ставропольском канале и запущена в эксплуатацию в 1968 – 1969 гг. На станции установлено 6 обратимых радиально - осевых турбин 63НТВ-30 с расходом воды 11,3 м³/с в турбинном режиме и 10,5 м³/сек. насосном режиме. Также на станции имеется 6 генераторов ВГДС 260/64-20 мощностью 2,65 МВт в турбинном режиме и 2,4 МВт в насосном режиме. Работу ГАЭС обеспечивает земляная плотина высотой 12 метров (расчетный напор – 24 метра) и длиной 6800 метров, а также КРУЭ 110 кВ. Загорская ГАЭС – это крупнейшая в России гидроаккумулирующая электростанция, расположенная на реке Кунья в Загорском районе Московской области. Первая очередь ГАЭС (Загорская ГАЭС – 1), мощностью 1200 МВт в турбинном режиме и 1320 МВт в насосном режиме была запущена в эксплуатацию в 1987 – 2000 годах, вторую очередь (Загорская ГАЭС – 2) проектной мощностью 840 МВт в турбинном режиме и 1000 МВт в насосном режиме планируют запустить в 2024 году.

Другие популярные накопители – литий-ионные аккумуляторы неплохо зарекомендовали себя на транспорте и набирают популярность в использовании в качестве накопителей энергии для автономного электроснабжения [6]. Однако в случае холодных температур ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже) их эффективность падает, а дополнительные мероприятия по теплоизоляции повышают стоимость $1\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ с $30 - 50$ тысяч рублей в средней полосе России до 100 тысяч в условиях низких температур. Опыта массового внедрения литий-ионных накопителей в условиях севера в России еще нет. В то же время при высоких температурах ($+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше) существует опасность воспламенения литий-ионных батарей поэтому их эксплуатация в жарком климате тоже находится под вопросом.

Перспективными областями хранения энергии также являются проточные окислительно-восстановительные батареи и системы хранения водородной энергии [7]. Проточные батареи в принципе напоминают аккумуляторы, но в отличие от обычных батарей, они отличаются от обычных батарей тем, что электролиты в них находятся не в самом реакторе, а поступают в него из отдельных емкостей вне зоны реакции. Это позволяет легко увеличить емкость аккумулятора. Системы хранения водородной энергии состоят из блока генерации водорода (кроме электролиза воды, такой блок включает в себя обработку воды, электролизные ячейки, очистку водорода и сушку), блока хранения (обычно баллоны или ресиверы с водородом, сжатым до давления $35 - 900$ бар) и электрохимического генератора энергии (в случае из твердополимерных топливных элементов на выходе получается $50 - 55\%$ электроэнергии и до 35% тепла).

Такие технологии как маховики, проточные накопители электроэнергии, лифты твердых грузов существуют в России только в виде лабораторных образцов и их развитие в стране пока что находится под вопросом. Поэтому использование достаточно простых по конструкции и работающих на протяжении нескольких десятилетий воздушно-аккумулирующих электростанций является перспективным решением [8, 9].

Активной разработкой различных тепловых схем ВАЭС занимаются ряд научных коллективов США, Германии, Индии и Китая [10 – 12]. Мировой опыт эксплуатации ВАЭС (преимущественно в Германии и США) вкупе с заметной тенденцией к развитию данной отрасли (проекты ВАЭС *United Technologies*, *Seneca* ВАГТЭ Матагорда, Нортон и пр.) показывает большую заинтересованность в использовании подобных пиковых или околорезервуарных установок [13, 14]. Среди российских исследователей стоит отметить коллектив в лице Ольховского Г.Г., Казаряна В.А. и Столяревского А.Я., которые в работе [15] представляет всестороннее исследование перспектив применения ВАЭС в России и мире с анализом различных схемных модификаций и разработкой конкретных технических решений в части подбора оборудования для ВАЭС.

Материалы и методы

На кафедре Промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ» была разработана экспериментальная установка воздушно-аккумулирующей электростанции малой мощности 1 кВт . Принципиальная схема установки с расположением КИПа изображена на рисунке 1. Установка состоит из поршневого компрессора со встроенным ресивером марки *Fubag B5200B/200 CT4* объемом 200 л , создающим давление в 10 бар , заявленной производительностью 530 л/мин , потребляемой мощностью 3 кВт .

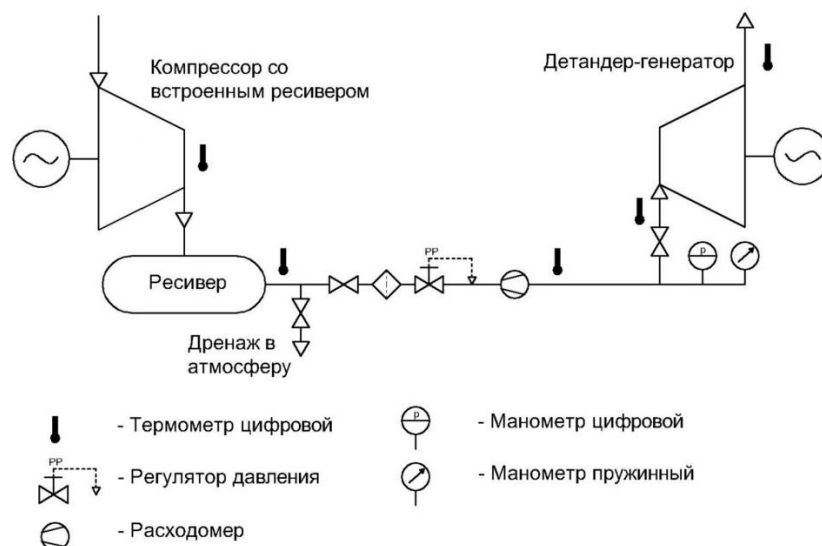


Рис.1. Принципиальная схема ВАЭС мощностью 1 кВт Fig.1. Schematic diagram of a 1 kW CAES

Принцип действия установки заключается в закачивании компрессором сжатого воздуха в ресивер, с последующим выпуском воздуха из ресивера в детандер оригинальной конструкции, который вырабатывает электрическую энергию. На рисунке 2 показан общий вид экспериментальной установки.



Рис.2. Внешний вид ВАЭС мощностью 1 кВт

Fig.2. View of a 1 kW CAES

Прототип воздушного детандера (рис. 3) должен обеспечивает выработку электрической энергии и обладает следующими основными техническими характеристиками:

- Номинальная электрическая мощность - 1 кВт;
- Номинальное напряжение - 28 В (постоянный ток);
- Номинальное давление воздуха на входе в детандер - $0,3 \div 0,6$ МПа;
- Расход воздуха через турбину при номинальной нагрузке – $80 \div 120$ м³/ч;
- Частота вращения роторов турбин при номинальной электрической нагрузке - 5000 об/мин.



Рис.3. Прототип детандера: 1 - крышка электрической распределительной коробки; 2 - электрическая распределительная коробка; 3 - корпус генератора; 4 - промежуточный корпус (корпус муфты привода); 5 - кожух; 6 - крышка полости шестерен синхронизатора вращения роторов; 7 - входное отверстие труба; 8 - монтажный кронштейн; 9 - выпускная труба.

Fig.3. Expander prototype: 1 - electrical junction box cap; 2 - electrical junction box; 3 - generator casing; 4 - intermediate casing (drive clutch casing); 5 - casing; 6 - cap of the cavity of the gears of the synchronizer of rotation of the rotors; 7 - inlet pipe; 8 - mounting bracket; 9 - outlet pipe.

Для обеспечения синхронности вращения роторов предусмотрены косозубые синхронизирующие шестерни, закрепляемые на хвостовиках валов роторов. Шестерни располагаются в полости синхронизатора, образуемой торцевым фланцем корпуса детандера и объемной крышкой. В процессе разработки опытного образца были изготовлены 4 шестерни из различных конструкционных материалов: нержавеющая сталь

марки AISI 304, латунь марки ЛС59-1 и полиацеталь марки ПОМ-С. В ходе сборки, притирки и обкатки опытным путем было установлено, что оптимальным решением с точки зрения антифрикционных характеристик, прочности и большего ресурса является применение шестерен из полиацетала. Применение биметаллической пары нержавеющая сталь/латунь хотя и обеспечивает нормальное вращение роторов детандера, однако наблюдается механический износ шестерен, и без применения смазочных материалов длительная эксплуатация невозможна. На рисунке 4 показаны синхронизирующие шестерни, изготовленные из различных конструкционных материалов и кулачковые роторы, изготовленные из полиацетали марки ПОМ-С. Кулачок (тело ротора) в поперечном сечении имеет 8-образную форму. Центральное отверстие предназначено для напрессовки кулачка на стальной вал, боковые отверстия сделаны с целью облегчения ротора. Фиксация кулачка на валу ротора обеспечивается посадкой с натягом и нанесением на сопрягаемые поверхности эпоксидного клея-фиксатора типа ВК-9 или аналогичного.



а)



б)

Рис.4. Синхронизирующие шестерни (а) и кулачковые роторы (б).

Fig.4. Synchronizing gears (a) and lobe rotors (b).

Фиксация лепестка на валу ротора обеспечивается посадкой с натягом и покрытием сопрягаемых поверхностей эпоксидным клеем-фиксатором. Валы изготовлены из прутка из нержавеющей стали AISI 304. Валы установлены в корпусе генератора с помощью двухрядных шарикоподшипников SKF 4200 ATN9. На хвостовиках валов выполнены шпоночные пазы для установки синхронизирующих шестерен, и нарезана резьба для их фиксации гайками. Установка собранных роторов в корпус детандера осуществляется с помощью специального устройства, обеспечивающего их ортогональность относительно друг друга в момент установки. Шестерни расположены в полости синхронизатора, образованной торцевым фланцем корпуса детандера и объемным колпачком.

Результаты

Для моделирования режимов работы лабораторного стенда была составлена модель в программном пакете Aspen HYSYS (рис. 5). Для работы модели в динамическом режиме необходимо, чтобы количество уравнений технологической схемы совпадало с количеством переменных, если это не будет соблюдено, то программа выдаст ошибку и не сможет «запустить» модель. Главным достоинством динамического режима является возможность в реальном времени следить за всеми узлами системы. За это отвечает вкладка *Integrator*, которая позволяет управлять временем – ускорять его, замедлять, перематывать и инструмент *Strip Charts*, который является графическим самописцем. Все это позволяет понять, как работает модель в течение любого промежутка времени.

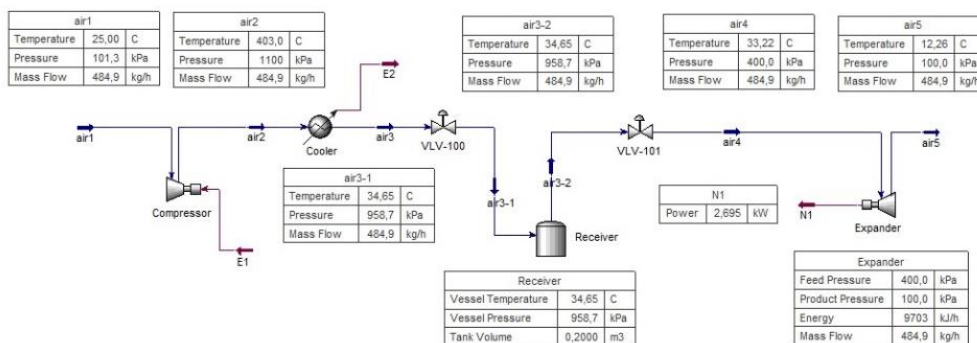


Рис.5. Динамическая модель в Aspen HYSYS

Fig.5. Dynamic model in Aspen HYSYS

В данной работе необходимость в динамической модели возникла для моделирования процесса разгрузки ресивера. Отслеживать все необходимые показатели в процессе симуляции мы будем при помощи инструмента *Strip Charts*, при открытии которого, необходимо задать максимальное количество точек и интервал, с которым они будут выводиться на экран. После чего, необходимо выбрать те показатели, за которыми требуется наблюдать. Сам процесс разгрузки ресивера, моделируется за счет изменения положения регулирующего клапана VLV-100, при постепенном закрытии которого давление и расход в системе будут уменьшаться, что позволит смоделировать разгрузку. Всего в данной работе будет пять положений открытия клапана: 100%, 75%, 50%, 25%, 0%, что позволит нам понять, как изменяются показатели во всем диапазоне работы модели.

На рисунке 6 представлен график изменения расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения регулирующего клапана. По графику видно, что с закрытием клапана происходит падение массового расхода воздуха за счет уменьшения проходного диаметра. Точно такой же процесс будет происходить при работе ресивера с отключенным компрессором. Объем воздуха в ресивере будет постепенно уменьшаться, что приведет к снижению давления и массового расхода. При полностью закрытом клапане имитируется полная разгрузка воздуха в ресивере, поэтому расход падает до нуля.

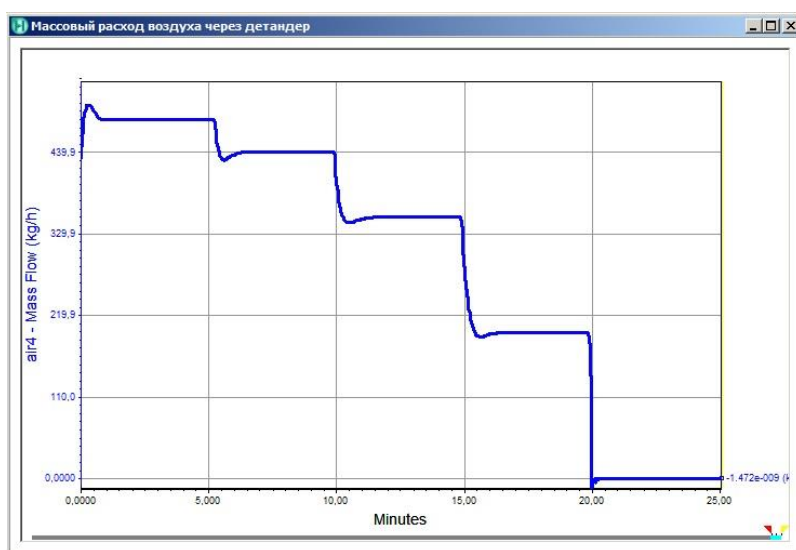


Рис.6. Изменение расхода воздуха на входе в детандер в зависимости от положения клапана

Fig.6. Air flow at the inlet to the expander depending on the position of the valve

Дополнительно для моделирования истечения воздуха в проточной части была составлена трехмерная модель детандера в программном пакете ANSYS. Данные по скорости воздуха и профилю давления представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

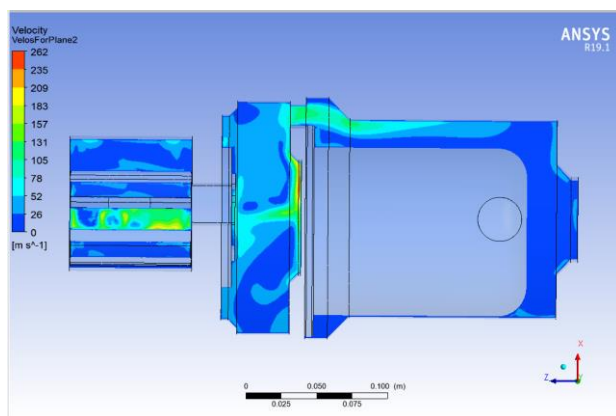


Рис.7. Скорость воздуха в детандере, м/с

Fig.7. Air velocity in expander, m/s

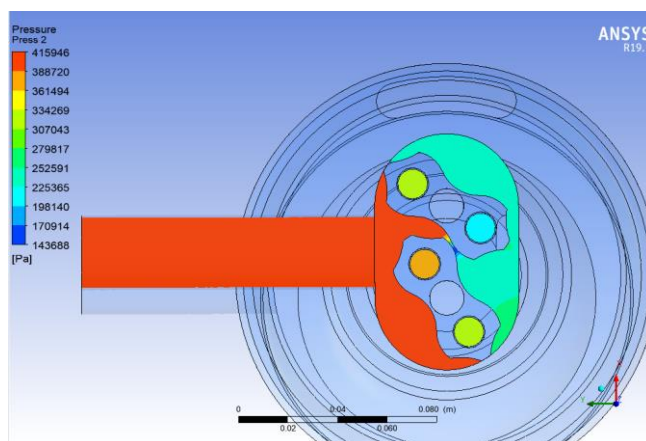


Рис.8. Профиль давления в детандере, Па

Fig.8. Pressure profile in expander, Pa

Обсуждение

В зависимости от режима использования можно выделить 2 комплектации установки – южную, с упором на выработку электроэнергии и холода для систем кондиционирования и северную, с упором только на выработку электроэнергии. В северном исполнении (рисунок 9) возможны три варианта – классический адиабатический (рисунок 9), изотермический и прямоточный. В первом случае тепло нагретого воздуха отбирается каким-либо теплоносителем (это может быть то же масло или гликоль), храниться отдельно от воздуха и используется для подогрева воздуха перед его редуцированием на пункте редуцирования или непосредственно перед турбиной. Во втором случае тепло, которое отводится из нагретого при сжатии воздуха используется для нужд теплоснабжения, а поступающий на турбину воздух подогревается, чтобы избежать выпадения углекислого газа в жидком виде. В третьем случае горячий воздух поступает в теплоизолированную емкость для его хранения, далее из этой емкости он по необходимости поступает на пункт редуцирования (если он предусмотрен) или на воздушную турбину.

Первый вариант выглядит значительно более предпочтительным по сравнению со вторым так как после нагрева воздух значительно увеличивается в объеме и отвод тепла позволяет снизить размеры необходимых для хранения сжатого воздуха емкостей. С целью повышения КПД установки находящийся под остаточным давлением на выходе из турбины воздух может быть направлен на компрессор для повторного сжатия, в этом случае значительно снижаются затраты электроэнергии на сжатие воздуха в компрессоре.

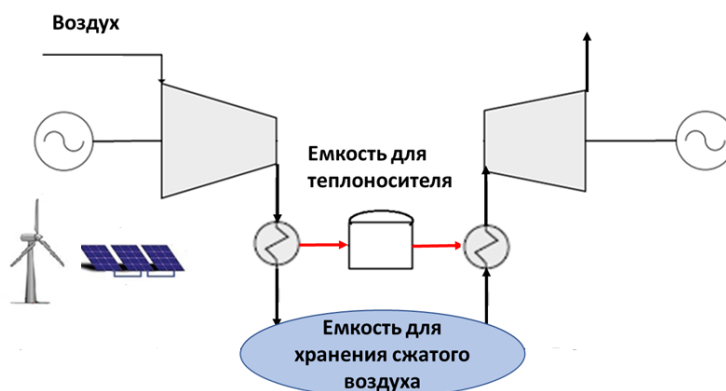


Рис.9. ВАЭС в северном исполнении

Fig.9. CAES in northern modification

В южном исполнении (рисунок 10) тепло выходящего из компрессора нагретого воздуха перед его помещением в емкость для хранения отводится (оно, в частности может быть использовано для нагрева воды для нужд горячего водоснабжения). При этом выходящий из емкости для хранения воздух идет на пункт редуцирования (или напрямую на воздушную турбину) без предварительного подогрева (или с минимальным подогревом чтобы избежать выпадения в турбине конденсата). Полученный на выходе из пункта редуцирования и воздушной турбины холодный воздух может нагреваться атмосферным воздухом. Охлажденный при этом атмосферный воздух используется для целей кондиционирования (возможен вариант его смешивания с неохлажденным атмосферным

воздухом). Как и в случае с северным вариантом для повышения КПД установки есть смысл рассмотреть вариант рекуперации находящегося под остаточным давлением воздуха из установки.

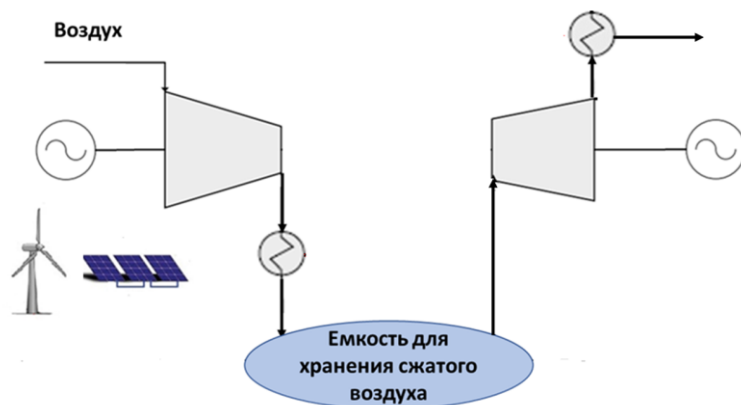


Рис.10. ВАЭС в южном исполнении

Fig.10. CAES in southern modification

При необходимости установка в южном исполнении может также отпускать отводящееся от воздуха после его компримирования тепло для нужд отопления и горячего водоснабжения, также возможна модификация установки с добавлением теплового контура, через который можно обеспечить при необходимости подогреть воздух перед его редуцированием.

Выводы

К плюсам применения ВАЭС в качестве способа аккумулирования электрической энергии можно отнести высокую маневренность и работу в широких диапазонах температуры и давления, что делает такие электростанции более дешевыми и долговечными. ВАЭС аккумулирует энергию в форме сжатого воздуха, который в дальнейшем идет на выработку электроэнергии во время пиков нагрузки. Цикл ВАЭС похож на цикл выработки энергии газотурбинной установки (ГТУ). Однако в цикле ГТУ турбина физически соединена с компрессором, а при использовании ВАЭС цикл сжатия воздуха протекает отдельно от циклов выработки электроэнергии. Не менее актуальным вопросом для Российской Федерации является возможность когенерации на базе ВАЭС, в частности, с выработкой дополнительной энергии на нужды теплофикации или холодоснабжения (в зависимости от особенностей региона и отдельно взятых потребителей).

Современный подход к интегрированию систем аккумулирования энергии на сжатом воздухе можно представить в виде иерархической структуры:

1. Глобальный подход – создание единой системы аккумулирования энергии всей равнинной части Российской Федерации. Географический критерий обусловлен нерациональностью использования для местности, на которой отсутствуют большие перепады высот, гидроаккумулирующих электростанций;

2. Региональный подход – внедрение ВАЭС высокой мощности для аккумулирования энергии крупных источников со слабыми возможностями регулирования отпускаемой в сеть электроэнергии (например, АЭС), замена крупных пиковых энергоустановок, использование комбинированных схем работы воздушных аккумуляторов с действующими крупными ТЭЦ и региональными ГРЭС, а так же совместная работа с установками возобновляемой энергетики (ветроэнергетическими установками и солнечными батареями);

3. Локальный подход – сочетание ВАЭС с иными современными энергоэффективными системами в рамках общей энергосистемы локального потребителя, оперативно реагирующего на изменение тарифов (т.н. «активный пользователь»).

Проработка подобного подхода вкупе с развитием новых схемных решений ВАЭС с учетом российских реалий представляется одним из эффективных этапов по повышению энергетической эффективности и безопасности всей энергосистемы страны в целом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-00700, <https://rscf.ru/project/22-29-00700/>.

Литература

1. Султанов М.М. Разработка методологии и мероприятий по обеспечению надежности оборудования энергетических систем. Известия высших учебных заведений.

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(5):46-55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55>.

2. Белобородов С.С., Гашо Е.Г., Ненашев А.В. Оценки «углеродоёмкости» и углеродной «нейтральности» экономики ЕС и РФ // Промышленная энергетика – 2021 – №11, стр. 38 – 47.

3. Белобородов С.С., Дудолин А.А. Влияние развития ВИЭ на сбалансированность производства и потребления электроэнергии в ЕЭС России // Новое в российской электроэнергетике – 2020 – №5, стр. 6 – 17.

4. Лукутин Б.В., Каррар Хамид А. Оптимизация энергетических балансов фотоэлектрической станции с электрохимическим и тепловым аккумулированием солнечной энергии. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13>

5. Малега А.А., Бородулин А.А., Панов В.Н., Пастухов В.В., Филатова О.В., Подвысоцкий А.А. Комплексная реконструкция и модернизация Кубанской ГАЭС // Гидротехническое строительство – 2020 – №8, стр. 27 – 35.

6. M. De Rosa, O. Afanaseva, A. Feduykhin, V. Bianco Prospects and characteristics of thermal and electrochemical energy storage systems. Journal of Energy Storage, Volume 44, Part B, 15 December 2021, 103443.

7. Ubertini, S., Facci, A.L., & Andreassi, L. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage // Energies, 2017, 10, 2035.

8. Peng Li, Qingya Hu, Ye Sun, Zhonghe Han Thermodynamic and economic performance analysis of heat and power cogeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage coupled with solar auxiliary heat // Journal of Energy Storage. - 2021. - №42.

9. Shadi Bashiri Mousavi, Mahdieh Adib, M. Soltania, Amir Reza Razmi, Jatin Nathwani Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials // Energy Conversion and Management. - 2021. - №243.

10. Marcus Budt, Daniel Wolf, Roland Span, Jinyue Yan A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments // Applied Energy. - 2016. - №170. - P. 250-268.

11. Qian Zhou, Dongmei Du, Chang Lu, Qing He, Wenyi Liu A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system // Energy. - 2019. - №188.

12. Marcus King, Anjali Jain, Rohit Bhakar, Jyotirmay Mathur, Jihong Wang Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2021. - №139.

13. Peng Li, Qingya Hu, Zhonghe Han, Changxin Wang, Runxia Wang, Xu Han, Yongzhen Wang Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a trigenerative system based on compressed air energy storage under different working media and heating storage media // Energy. - 2022. - №239.

14. NYSEG SENECA // Compressed air energy storage (CAES) demonstration project, Final Phase 1 Technical Report. September 2012. – 66 P.

15. Ольховский Г.Г., Казарян В.А., Столяревский А.Я. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. – 358 с.

Авторы публикации

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

Дронов Станислав Анатольевич – аспирант, Московский энергетический институт.

Семин Даниил Владимирович – аспирант, Московский энергетический институт.

Гусенко Алексей Геннадьевич – студент, Московский энергетический институт.

Панарин Владислав Эдуардович – студент, Московский энергетический институт.

References

1. Sultanov MM. Development of methodology and measures to ensure the reliability of energy systems equipment. *News of higher educational institutions. Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(5):46-55. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55>

2. Beloborodov SS, Gasho EG, Nenashev AV. Estimates of the «carbon intensity» and carbon «neutrality» of the EU and Russian economy. *Industrial Energy* – 2021 – No. 11, pp. 38-47.
3. Beloborodov SS, Dudolin AA. The influence of renewable energy development on the balance of electricity production and consumption in the UES of Russia. *New in the Russian electric power industry* – 2020 – No. 5, pp. 6-17.
4. Lukutin BV, Karrar Hamid A. Optimization of energy balances of a photovoltaic plant with electrochemical and thermal storage of solar energy. *News of higher educational institutions. Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;24(2):3-13. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-2-3-13>
5. Malega A.A., Borodulin A.A., Panov V.N., Pastukhov V.V., Filatova O.V., Podvysotsky A.A. Complex reconstruction and modernization of the Kuban PSPP. *Hydrotechnical construction* – 2020 – No.8, pp. 27-35.
6. De Rosa M., Afanaseva O., Fedyukhin A., Bianco V. Prospects and characteristics of thermal and electrochemical energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, Volume 44, Part B, 15 December 2021, 103443.
7. Ubertini S, Facci AL, & Andreassi, L. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage. *Energies*. 2017; 10:2035.
8. Peng Li, Qingya Hu, Ye Sun, Zhonghe Han Thermodynamic and economic performance analysis of heat and power cogeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage coupled with solar auxiliary heat. *Journal of Energy Storage*. - 2021. - №42.
9. Shadi Bashiri Mousavi, Mahdieh Adib, M. Soltania, Amir Reza Razmi, Jatin Nathwani Transient thermodynamic modeling and economic analysis of an adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) based on cascade packed bed thermal energy storage with encapsulated phase change materials. *Energy Conversion and Management*. - 2021. - №243.
10. Marcus Budt, Daniel Wolf, Roland Span, Jinyue Yan A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*. - 2016. - №170. - P. 250-268.
11. Qian Zhou, Dongmei Du, Chang Lu, Qing He, Wenyi Liu A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system. *Energy*. - 2019. - №188.
12. Marcus King, Anjali Jain, Rohit Bhakar, Jyotirmay Mathur, Jihong Wang Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. - 2021. - №139.
13. Peng Li, Qingya Hu, Zhonghe Han, Changxin Wang, Runxia Wang, Xu Han, Yongzhen Wang Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a trigenerative system based on compressed air energy storage under different working media and heating storage media. *Energy*. 2022. №239.
14. NYSEG SENECA. *Compressed air energy storage (CAES) demonstration project*, Final Phase 1 Technical Report. September 2012. 66 P.
15. Olkhovsky GG, Kazaryan VA, Stolyarevsky A.Ya. *Air-accumulating gas turbine power plants (VAGTE)* – Izhevsk: Institute of Computer Research, 2011. – 358 p.

Authors of the publication

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

Stanislav A. Dronov – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Daniil V. Semin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Alexey G. Gusenko – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Vladislav E. Panarin – Moscow Power Engineering Institute, Russia.

Получено

02.10.2022г.

Отредактировано

02.10.2022г.

Принято

14.10.2022г.

Номенклатура-переходник рубрикатора журнала «ИЗВУЗ. Проблемы энергетики»

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты	2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы	2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
05.09.12 – Силовая электроника	
05.11.01 – Приборы и методы измерения (по видам измерений)	
05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий	2.2.8 Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)	
05.14.01 – Энергетические системы и комплексы	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)
05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы	2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатации и вывод из эксплуатации	
05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика	2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки)
05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты	2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки) 2.5.4 Роботы, мехатроника и робототехнические системы 2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Сдано в набор 15.09.2022
Бумага офсет 80 г. Печать
ризографическая
Тираж 100 экз.

Подписано к печати
Усл. печ. л. 22,2
Заказ № 5269
Дата выхода в свет: 19.12.2022

Формат 60х90/8
Уч.изд. л. 16,62
Цена свободная